



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

RECUPERACIÓN FRENTE DE HUNDIMIENTO MINA PANEL CAVING

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JAVIER ALBERTO OYARZÚN SOTO

PROFESOR GUÍA:
HANS GÖPFERT HIELBIG

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SEBASTIÁN CARMONA CALDERA
JAIME CHACÓN FERNANDEZ

SANTIAGO DE CHILE
2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Javier Alberto Oyarzún Soto
FECHA: 05/05/2016
PROFESOR GUÍA: Hans Göpfert Hielbig

RECUPERACIÓN FRENTE DE HUNDIMIENTO MINA PANEL CAVING

En minas explotadas por el método de panel caving convencional, la ocurrencia de eventos tales como colapsos o estallidos de roca ha sido frecuente a lo largo de la historia. Ambas situaciones conducen a pérdidas productivas y a un aumento de los costos, puesto que se debe desarrollar un proyecto de contingencia para recuperar las reservas afectadas.

Los eventos sísmicos son propios del proceso de caving. Sin embargo, en algunos casos existe una anomalía donde la cantidad de sismos supera los valores normales. Esta anomalía ocurre como consecuencia de la inestabilidad geomecánica insostenible del sector afectado.

El caso de estudio en este trabajo, comprende la recuperación del frente de hundimiento del sector Centro-Fw de la mina Reservas Norte, División El Teniente, luego de un evento geomecánico ocurrido en el mes de marzo del año 2014. Cabe destacar que en este caso se pudo evitar que los daños aumentaran y causaran el colapso de las galerías de la mina.

El principal objetivo de este estudio es documentar la recuperación de un sector, que se vio afectado por daños geomecánicos severos en las galerías del nivel de hundimiento, y cuyo resultado principal fue permitir la continuidad de la variante de explotación y evitar que se genere un colapso.

Para abordar este trabajo se debió caracterizar detalladamente el caso de estudio, para identificar las actividades claves en este. Así, se realizó un ordenamiento y análisis de los hechos, que permitió documentar de manera clara los aspectos relevantes para la recuperación del sector estudiado.

Gracias a las actividades realizadas fue posible reiniciar el frente de hundimiento y, más importante aún, se pudo continuar con el sistema de explotación, sin necesidad de implementar una variante en este.

El diseño de la solución y la planificación de la extracción, resultaron posibles gracias al sistema de extracción del sector (variante convencional). Esto genera una ventaja para la variante convencional de panel caving, la cual se puede considerar para la elección del método de explotación en proyectos futuros.

Así, dadas las actividades claves identificadas en el caso de estudio y considerando el éxito en el trabajo realizado, se listan las actividades claves para afrontar daños geomecánicos severos ubicados por delante del frente de hundimiento. Estas actividades claves generan una importante fuente de información, en caso de la ocurrencia de eventos similares en un futuro.

Dentro de las actividades claves identificadas en el caso de estudio, se realiza una recomendación con respecto al diseño de la solución, específicamente en el diagrama de perforaciones. Esta modificación implica reducir el largo de las perforaciones realizadas desde el nivel de producción, permitiendo disminuir costos y tiempo de desarrollo.

ABSTRACT

In mines exploited by conventional panel caving method, the occurrence of events such as collapses or rock bursts has been common throughout history. In both situations, a contingency project must be developed to recover the reserves affected, causing production loss and increased costs.

Seismic events are common on the caving process. However, in some cases there is an abnormality where the amount of seism exceeds normal values. This anomaly occurs as a result of unsustainable geomechanical instability in the affected sector.

The study analyzed in this report comprehends the recovery of the caving front in the Centro-Fw area after a geomechanical event on March of 2014 in the “Reservas Norte” mine, El Teniente division. Interestingly, on this event they were able to avoid more damage that could cause the collapse of the galleries in the mine.

The main aim of this study is to document the recovery of a sector, which was affected by severe geomechanical damages in the galleries of the caving level, and whose main result was allow the continuity of the variant of exploitation and avoid the generation of a collapse.

To accomplish this work, a full and detailed characterization of the study case was carried out to identify key activities executed on this event. Thus, facts were reordered and analyzed for gather a better and clearer documentation of the relevant aspects performed to recover the sector in study.

Because of the performed activities, the caving front was able to be recovered and more importantly, the exploitation system didn't suffer any alterations, with no need to implement changes on it.

The solution design and the extraction planning used to recover the caving front were possible thanks to the extraction system of the sector (conventional variant). This generates an advantage for the conventional variant of the panel caving method, which can be considered for choosing the method of future projects.

Thus, given to the key activities identified in the study case and having in mind the success on the performed work, this key activities are listed to affront severe geomechanical damage localized ahead of the caving front. These key activities produce an important source of information for future and similar events.

Within the key activities identified on the study case, a recommendation related to the design of the solution was performed, specifically on the drilling diagram. This modification implicates the reduction of the length of the drill from the production level, allowing the decrease of the costs and time of work.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia, en especial a mis padres por su cariño, esfuerzo, paciencia e incansable trabajo durante todos estos años. Sin sus valores, consejos y sacrificio nada de esto hubiese sido posible. También mencionar a mis abuelos, por el apoyo entregado desde que llegué a Lautaro. A mis hermanos Geanella y Mauricio por su preocupación, cariño y complicidad; y a mis sobrinos Ricardo, Vicente, Josefa y Geaed por su alegría y motivación constante.

A Sandra por los momentos de felicidad que me ha entregado, por su paciencia y compañía incondicional.

Al Departamento de Ingeniería de Minas, a los profesores por su tiempo y dedicación. A mis compañeros, amigos y a toda la comunidad minera.

Al profesor Hans Göpfert por el gran apoyo entregado para el desarrollo de este trabajo y a los profesores Sebastián Carmona y Jaime Chacón por sus consejos y buena voluntad.

A Nicole Cid por su increíble disposición durante todo este tiempo.

Doy las gracias a todos mis amigos: los de Lautaro, los de Temuco, los de la Universidad de Chile por aportar siempre con alegría, entretenimiento y compañía.

Finalmente agradezco a Codelco Chile, por la oportunidad de realizar esta memoria en la División El Teniente. A mi tutor Cristóbal Cisternas y a todos los trabajadores de la división que aportaron con su vasta experiencia y conocimientos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
TABLA DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación del trabajo	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcances.....	2
1.4. Metodología.....	3
1.5. Identificación de fuentes.....	4
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Métodos de explotación por hundimiento	5
2.2. Panel caving.....	5
2.2.1. Panel caving con hundimiento convencional	5
2.2.2. Panel caving con hundimiento previo	6
2.2.3. Panel caving con hundimiento avanzado	7
2.2.4. Panel caving convencional con fracturamiento hidráulico.....	7
2.3. Efecto sísmico del caving	8
2.4. Inestabilidad geomecánica.....	8
2.4.1 Colapso.....	9
2.4.2 Estallido de roca	9
3 ANTECEDENTES GENERALES.....	10
3.1. Codelco	10
3.2. El Teniente.....	10
3.3. Mina Reservas Norte	11
3.3.1. Geología mina Reservas Norte.....	12
3.3.2. Geotecnia mina Reservas Norte	14
3.3.3. Esfuerzos	16
3.3.4. Malla de extracción	16
3.3.5. Perforación y tronadura	17
4 CASO DE ESTUDIO: DAÑOS SEVEROS EN FRENTE DE HUNDIMIENTO MINA RESERVAS NORTE	22
4.1. Estado de la mina.....	22
4.1.1. Perforación y tronadura	22
4.1.2. Sismicidad	25
4.1.3. Extracción.....	27
4.2. Situación inicial de daños	29
4.2.1. Sismicidad - inicio de clúster sísmico	29
4.2.2. Fotografías del sector.....	32
4.2.3. Levantamiento de daños según criterios geomecánicos.....	34
4.2.4. Cuantificación de daños.....	35
4.2.5. Cuantificación de Reservas afectadas.....	35

4.2.6.	Acciones inmediatas	36
4.2.7.	Evolución de los daños	37
4.2.8.	Evolución actividad sísmica - fin de clúster sísmico.....	40
4.3.	Estudio y control de la situación.....	41
4.3.1.	Definición de criterios de éxito	41
4.3.2.	Levantamiento de información.....	41
5	SOLUCIÓN.....	50
5.1	Planificación de la extracción	50
5.2	Diagramas de perforación.....	55
5.2.1	Perforación desde el nivel de producción.....	55
5.2.2	Perforación desde nivel de hundimiento	57
5.3.	Implementación de la solución y resultados	61
5.3.1.	Secuencia de actividades	61
5.3.2.	Seguimiento de la extracción.....	61
5.3.3.	Perforación y Tronadura.....	70
6.	ACTIVIDADES CLAVES.....	92
6.1	Resumen de actividades claves.....	92
7.	CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.....	94
8	BIBLIOGRAFÍA	95
9	ANEXOS.....	97
	ANEXO A: Nomenclatura interior mina.....	97
	<i>Orientación</i>	97
	<i>Galerías</i>	97
	ANEXO B: Cálculo de beneficio económico reservas afectadas.....	98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. VISTA EN PLANTA MINA RESERVAS NORTE (EDICIÓN DE IMAGEN PRESENTADA EN CUBILLOS ET AL., 2013).	3
ILUSTRACIÓN 2. PANEL CAVING CON HUNDIMIENTO CONVENCIONAL (CAVIERES, 1999).	6
ILUSTRACIÓN 3. PANEL CAVING CON HUNDIMIENTO PREVIO (CAVIERES, 1999).	6
ILUSTRACIÓN 4. PANEL CAVING CON HUNDIMIENTO AVANZADO (CAVIERES, 1999).	7
ILUSTRACIÓN 5. PANEL CAVING CONVENCIONAL CON FH	8
ILUSTRACIÓN 6. VISTA 3D MINA EL TENIENTE.	10
ILUSTRACIÓN 7. LAYOUT EXTRACCIÓN MINA RESERVAS NORTE (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE, 2012).	11
ILUSTRACIÓN 8. LITOLOGÍA MINA RESERVAS NORTE (EDICIÓN DE IMAGEN PRESENTADA EN CUBILLOS ET AL., 2013.)	12
ILUSTRACIÓN 9. MODELO ESTRUCTURAL SECTOR CENTRO - FW MINA RESERVAS NORTE (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	13
ILUSTRACIÓN 10. ZONACIÓN GEOTÉCNICA CON BASE EN FRECUENCIA DE VETILLAS BLANDAS POR METRO MEDIDAS EN SONDAJES ORIENTADOS, MINA RESERVAS NORTE (EDICIÓN DE IMAGEN PRESENTADA EN SUPERINTENDENCIA GEOLOGÍA, 2014).	15
ILUSTRACIÓN 11. DIMENSIONES MALLA DE EXTRACCIÓN.	16
ILUSTRACIÓN 12. VARIANTES DE PANEL CAVING EN MINA RESERVAS NORTE (CODELCO CHILE, DIVISIÓN EL TENIENTE, 2014).	17
ILUSTRACIÓN 13. DIAGRAMA DE PERFORACIÓN RADIAL ESTÁNDAR. (EDICIÓN DE IMAGEN PRESENTADA EN SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (A), 2014).	18
ILUSTRACIÓN 14. PEFIL HW-FW, DISEÑO ZANJA CONVENCIONAL MINA RESERVAS NORTE (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (A), 2014).	20
ILUSTRACIÓN 15. VISTA EN PERFIL TRONADURA DE FASES BATEAS (EDICIÓN DE IMAGEN PRESENTADA EN SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (A), 2014).	21
ILUSTRACIÓN 16. VISTA EN PLANTA TRONADURA DE FASES BATEAS (EDICIÓN DE IMAGEN PRESENTADA EN SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (A), 2014).	21
ILUSTRACIÓN 17. PERFORACIONES RADIALES RESERVAS NORTE Y DACITA, PAM DE MARZO DEL 2014.	22
ILUSTRACIÓN 18. PERFORACIÓN DE BATEAS RESERVAS NORTE Y DACITA, PAM DE MARZO DEL 2014.	22
ILUSTRACIÓN 19. VISTA EN PLANTA FRENTE DE HUNDIMIENTO SECTOR CENTRO-FW, MINA RESERVAS NORTE.	23
ILUSTRACIÓN 20. ÚLTIMAS TRONADURAS REALIZADAS EN EL SECTOR DE DAÑOS (EDICIÓN DE IMAGEN PRESENTADA EN SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	24
ILUSTRACIÓN 21. EVENTOS SÍSMICOS POR DÍA DESDE NOVIEMBRE DEL 2013 HASTA FEBRERO DEL 2014 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	25
ILUSTRACIÓN 22. POLÍGONO DE ESTUDIO SISMICIDAD (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	25
ILUSTRACIÓN 23. ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA DURANTE EL MES DE FEBRERO DEL 2014, MINA RESERVAS NORTE. (EDICIÓN DE IMAGEN PRESENTADA EN BIZAMA, 2014)	26
ILUSTRACIÓN 24. VISTA EN PLANTA E ISOMÉTRICA DE EVENTOS SÍSMICOS EL DÍA 8 DE MARZO DEL 2014 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	26
ILUSTRACIÓN 25. VELOCIDADES DE EXTRACCIÓN RECOMENDADAS PARA EL MES DE MARZO DE 2014, SECTOR CENTRO-FW, RESERVAS NORTE.	28
ILUSTRACIÓN 26. PORCENTAJE DE ALTURA DE COLUMNA EXTRAÍDA, ZONA DE DAÑOS.	28
ILUSTRACIÓN 27. DETALLE DE ALTURA DE COLUMNA EXTRAÍDA [%] E INCORPORACIÓN DE PUNTOS, ZONA DE DAÑOS.	28
ILUSTRACIÓN 28. ACTIVIDAD SÍSMICA DEL SECTOR (INICIO CLÚSTER SÍSMICO) (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	29
ILUSTRACIÓN 29. VISTA EN PLANTA E ISOMÉTRICA DE EVENTOS SÍSMICOS EN EL SECTOR CENTRO - FW MINA RESERVAS NORTE (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	29
ILUSTRACIÓN 30. UBICACIÓN CLÚSTER SÍSMICO (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	30
ILUSTRACIÓN 31. FALLAMIENTO ES/EP (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	31
ILUSTRACIÓN 32. DAÑO C10 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B), 2014)	32
ILUSTRACIÓN 33. DAÑO C14 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B), 2014).	32

ILUSTRACIÓN 34. DAÑO C12OP-5N NP (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B), 2014)	32
ILUSTRACIÓN 35. DAÑO C11 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B), 2014).	33
ILUSTRACIÓN 36. DAÑO C12 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B), 2014).	33
ILUSTRACIÓN 37. DAÑO C13 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B), 2014)	33
ILUSTRACIÓN 38. LEVANTAMIENTO DE DAÑOS GEOMECÁNICOS UCL (PARRAGUEZ ET AL., 2014).	34
ILUSTRACIÓN 39. CUANTIFICACIÓN DE DAÑOS Y ÁREA COMPROMETIDA (GERENCIA DE RECURSOS MINEROS Y DESARROLLO (GRMD), 2014).	35
ILUSTRACIÓN 40. AISLACIÓN SECTOR AFECTADO (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	36
ILUSTRACIÓN 41. EVOLUCIÓN DE LOS DAÑOS GEOMECÁNICOS EN C14 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014).	37
ILUSTRACIÓN 42. EVOLUCIÓN DE LOS DAÑOS GEOMECÁNICOS EN C10 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014).	37
ILUSTRACIÓN 43. EVOLUCIÓN DE LOS DAÑOS GEOMECÁNICOS EN C11 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014).	37
ILUSTRACIÓN 44. EVOLUCIÓN DE LOS DAÑOS GEOMECÁNICOS EN C12 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014).	37
ILUSTRACIÓN 45. EVOLUCIÓN DE LOS DAÑOS GEOMECÁNICOS EN C13 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014).	38
ILUSTRACIÓN 46. EVOLUCIÓN DE DAÑOS, LEVANTAMIENTO SEGÚN CRITERIOS GEOMECÁNICOS (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	38
ILUSTRACIÓN 47. EVOLUCIÓN DAÑOS GEOMECÁNICOS C12 OP-5N NP (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014).	39
ILUSTRACIÓN 48. EVOLUCIÓN ACTIVIDAD SÍSMICA DEL SECTOR CENTRO-FW (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	40
ILUSTRACIÓN 49. EVOLUCIÓN EVENTOS SÍSMICOS, VISTA EN PLANTA Y VISTA EN PERFIL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	40
ILUSTRACIÓN 50. AUSCULTACIÓN DE PERFORACIONESS UCL.	41
ILUSTRACIÓN 51. AUSCULTACIÓN PERFORACIÓN DE LEVANTE FW, C11.	42
ILUSTRACIÓN 52. AUSCULTACIÓN PERFORACIÓN DE LEVANTE CENTRO, C12.	43
ILUSTRACIÓN 53. SEGUIMIENTO AUSCULTACIÓN PERFORACIÓN DE LEVANTE CENTRO, C12 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	43
ILUSTRACIÓN 54. AUSCULTACIÓN PERFORACIÓN DE LEVANTE CENTRO, C13 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	44
ILUSTRACIÓN 55. SEGUIMIENTO AUSCULTACIÓN PERFORACIÓN DE LEVANTE CENTRO, C13 (1-7-2014).	44
ILUSTRACIÓN 56. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CALLES 11 A 15, UCL. (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	45
ILUSTRACIÓN 57. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO C13 NP (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	45
ILUSTRACIÓN 58. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO C14 NP (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	46
ILUSTRACIÓN 59. VISTA EN PLANTA SECTOR DE DAÑOS, UBICACIÓN OP-5N.	46
ILUSTRACIÓN 60. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO NIVEL DE PRODUCCIÓN OP-5N, C12 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	47
ILUSTRACIÓN 61. EVOLUCIÓN CONDICIÓN DE AGUA EN ZONA DE DAÑOS (GERENCIA DE RECURSOS MINEROS Y DESARROLLO, 2014)	48
ILUSTRACIÓN 62. CONDICIÓN DE AGUAS ZONA DE DAÑOS. (GERENCIA DE RECURSOS MINEROS Y DESARROLLO (GRMD), 2014).	49
ILUSTRACIÓN 63. VISTA EN PLANTA Y PERFIL DE ZANJA 16N A ZANJA 19N (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	50
ILUSTRACIÓN 64. DAÑOS C15 UCL, PERFIL Z16N (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	51
ILUSTRACIÓN 65. ESQUEMA SECUENCIA DE EXTRACCIÓN, VISTA EN PERFIL Z18N (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	52
ILUSTRACIÓN 66. VISTA EN PLANTA (IZQUIERDA) Y VISTA ISOMÉTRICA (DERECHA) DEL ESTADO DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN INICIAL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	53
ILUSTRACIÓN 67. PLANIFICACIÓN DE EXTRACCIÓN 19 DE MARZO (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	54

ILUSTRACIÓN 68. ESQUEMA DE DIAGRAMA DE PERFORACIONES DESDE EL NIVEL DE PRODUCCIÓN (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).....	55
ILUSTRACIÓN 69. ESQUEMA DE DIAGRAMA DE PERFORACIONES DESDE EL NIVEL DE PRODUCCIÓN (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).....	56
ILUSTRACIÓN 70. DIAGRAMA CROWN PILLAR Y BATEA GENERADA POR PERFORACIONES DESDE EL NIVEL DE PRODUCCIÓN (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).....	57
ILUSTRACIÓN 71. ESQUEMA EN PERFIL N-S DE DIAGRAMA DE PERFORACIONES UCL. (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).....	57
ILUSTRACIÓN 72. PERFIL HW-FW PARADAS DE LEVANTE DESDE UCL. (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	58
ILUSTRACIÓN 73. PERFIL HW-FW PARADAS NEGATIVAS DESDE UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014)..	58
ILUSTRACIÓN 74. SLOT DESDE UCL EN ZONA SIN DAÑOS (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	59
ILUSTRACIÓN 75. DISEÑO PERFORACIÓN CHIMENEA DE LEVANTE DESDE UCL. (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	59
ILUSTRACIÓN 76. DISEÑO SLOT, VISTA EN PLANTA (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	60
ILUSTRACIÓN 77. PLANIFICACIÓN DE EXTRACCIÓN 26 DE MARZO (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	61
ILUSTRACIÓN 78. PERFIL DE EXTRACCIÓN C11F (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	62
ILUSTRACIÓN 79. PERFIL DE EXTRACCIÓN C11H (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	62
ILUSTRACIÓN 80. PERFIL DE EXTRACCIÓN C12F (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	63
ILUSTRACIÓN 81. PERFIL DE EXTRACCIÓN C12H (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	63
ILUSTRACIÓN 82. RETRASO EN LA PROPAGACIÓN DE LAS EXTRAÍDAS (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	64
ILUSTRACIÓN 83. PLANIFICACIÓN DE EXTRACCIÓN 8 DE ABRIL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	64
ILUSTRACIÓN 84. ESTATUS PUNTOS DE EXTRACCIÓN C10 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	65
ILUSTRACIÓN 85. ESTATUS PUNTOS DE EXTRACCIÓN C11 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	65
ILUSTRACIÓN 86. ESTATUS PUNTOS DE EXTRACCIÓN C12 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	66
ILUSTRACIÓN 87. ESTATUS PUNTOS DE EXTRACCIÓN C13 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	67
ILUSTRACIÓN 88. ESTATUS PUNTOS DE EXTRACCIÓN C14 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	67
ILUSTRACIÓN 89. PLANIFICACIÓN DE EXTRACCIÓN 5 DE MAYO (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	68
ILUSTRACIÓN 90. PRODUCCIÓN ACUMULADA AL 10 DE JULIO DEL 2014 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	68
ILUSTRACIÓN 91. ALTURAS EXTRAÍDAS AL 5 DE MAYO. VALORES MEDIDOS EN METROS (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	69
ILUSTRACIÓN 92. ALTURA ACUMULADA EN PUNTOS DE EXTRACCIÓN (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	69
ILUSTRACIÓN 93. AUSCULTACIÓN PERFORACIONES C12 NP (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	71
ILUSTRACIÓN 94. AUSCULTACIÓN PERFORACIONES C13 NP (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	72
ILUSTRACIÓN 95. AUSCULTACIÓN PERFORACIONES C11 NP (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C) 2014).	73
ILUSTRACIÓN 96. TRONADURA DE PERFORACIONES DESDE NIVEL DE PRODUCCIÓN.....	74
ILUSTRACIÓN 97. RECUPERACIÓN PERFORACIONES RADIALES C10.	79
ILUSTRACIÓN 98. FOTOGRAFÍAS PRE Y POST TRONADURA C10 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014). .	79
ILUSTRACIÓN 99. FOTOGRAFÍAS PRE Y POST TRONADURA C11 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014). .	80
ILUSTRACIÓN 100. FOTOGRAFÍAS PRE Y POST TRONADURA C12 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014).	80
ILUSTRACIÓN 101. DETALLE DE CARGUÍO EN PERFORACIONES PARA CHIMENEA PILOTO.	81
ILUSTRACIÓN 102. SECUENCIA DE TRONADURA CHIMENEA PILOTO.	82
ILUSTRACIÓN 103. RESULTADOS PERFORACIÓN CHIMENEA PILOTO, PRUEBA C7 UCL.	83
ILUSTRACIÓN 104. DISPERSIÓN EN FONDOS DE PERFORACIONES.	83
ILUSTRACIÓN 105. FOTOGRAFÍA RESULTADO TRONADURA CHIMENEA PILOTO, PRUEBA C7 UCL.	84
ILUSTRACIÓN 106. DETALLE DISEÑO PARADAS DE LEVANTE.	85
ILUSTRACIÓN 107. SECUENCIA DE TRONADURA CUÑAS.	86
ILUSTRACIÓN 108. SECUENCIA DE TRONADURA CANALÓN C11.....	87
ILUSTRACIÓN 109. FOTOGRAFÍAS POST TRONADURA LEVANTE, C11 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014).	87

ILUSTRACIÓN 110. SECUENCIA DE TRONADURA CANALÓN C13.....	88
ILUSTRACIÓN 111. SECUENCIA DE TRONADURA CANALÓN C14.....	88
ILUSTRACIÓN 112. FOTOGRAFÍAS POST TRONADURA LEVANTE, C15 UCL (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (B) 2014).	89
ILUSTRACIÓN 113. SECUENCIA DE TRONADURA CANALÓN C15.....	89
ILUSTRACIÓN 114. AUSCULTACIÓN ESPECIAL C12 (SUPERINTENDENCIA MINA NORTE (C), 2014).	90
ILUSTRACIÓN 118. DISEÑO ESTÁNDAR MODIFICADO DE PERFORACIONES REALIZADAS DESDE EL NIVEL DE PRODUCCIÓN.	93
ILUSTRACIÓN 119. NOMENCLATURA DE ORIENTACIÓN INTERIOR MINA.....	97
ILUSTRACIÓN 120. NOMENCLATURA DE ORIENTACIÓN. IZQUIERDA: BARRIO CÍVICO - DERECHA: NIVEL DE PRODUCCIÓN.	97

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ROCA INTACTA, MINA RESERVAS NORTE.	14
TABLA 2. CALIDAD MACIZO ROCOSO, SECTOR CENTRO-FW.	15
TABLA 3. DETALLE TRONADURA PARADA RADIAL.....	18
TABLA 4. PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN PERFORACIONES RADIALES.	19
TABLA 5. PARÁMETROS DE TRONADURA PERFORACIONES RADIALES.	19
TABLA 6. PARÁMETROS DE DISEÑO ZANJAS.	20
TABLA 7. DETALLE ÚLTIMAS TRONADURAS REALIZADAS EN EL SECTOR.	24
TABLA 8. VELOCIDADES DE EXTRACCIÓN SEGÚN PORCENTAJE DE ALTURA DE COLUMNA EXTRAÍDA.....	27
TABLA 9. DETALLE PERFORACIONES DESDE NIVEL DE PRODUCCIÓN.....	56
TABLA 10. PARÁMETROS DE DISEÑO PERFORACIÓN CHIMENEA DE LEVANTE.....	59
TABLA 11. INCREMENTO ALTURAS DE EXTRACCIÓN [M].	70
TABLA 12. DETALLE TRONADURA PARADAS 3 Y 4, C12 NP.	75
TABLA 13. DETALLE TRONADURA PARADAS 5, 6 Y 7, C12 NP.	76
TABLA 14. DETALLE TRONADURA PARADAS 7, 8 Y 9, C11 NP.	77
TABLA 15. DETALLE TRONADURA PARADAS 3, 4 Y 5, C13 NP.	78
TABLA 16. RETARDO ENTRE CEBOS Y SECUENCIA DE TRONADURA.	82
TABLA 17. DETALLE AUSCULTACIÓN ESPECIAL C12.	90
TABLA 18. CALENDARIO DE ACTIVIDADES.	91
TABLA 19. LEYENDA PARA CALENDARIO DE ACTIVIDADES	91
TABLA 20. DATOS PARA CÁLCULO DE BENEFICIO.	98

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación del trabajo

Durante el desarrollo de una mina subterránea explotada por el método de panel caving, es frecuente que se produzcan estallidos de roca o colapsos de grandes extensiones de zonas ya preparadas, los cuales ocasionan daños graves en la mina, ya sea en las galerías del nivel de producción, en las del nivel de hundimiento o en ambos niveles. Estos efectos responden a una consecuencia de la actividad minera, así como también a diferentes factores geomecánicos, producto de la presencia de estructuras dominantes.

En el mes de marzo del año 2014 ocurrieron daños severos en la mina Reservas Norte, específicamente en las galerías cercanas al frente de hundimiento. Sin embargo, luego de planificar una solución en conjunto de las distintas disciplinas de la mina, se logró impedir que estos daños se convirtieran progresivamente en un colapso, y así se evitó que influyeran sobre la producción planificada. Esta solución estuvo sujeta a distintas consideraciones de aplicación, entre las cuales se pueden mencionar:

- Planificación de actividades.
- Condiciones de seguridad asociadas a los eventos sísmicos.
- Restricciones geomecánicas.
- Condiciones máximas de avance (para reiniciar / recuperar el frente de hundimiento).

A pesar de que los daños tuvieron las características como para iniciar un colapso, esto se evitó y se logró impedir pérdidas en la producción.

Históricamente, los distintos eventos que han ocurrido en minas explotadas por panel caving, ya sean estallidos de roca o colapsos, han resultado en un abandono de las labores o en una recuperación parcial de las reservas y modificaciones en la variante de explotación, lo que no ocurrió en este caso.

Debido a lo anterior, este estudio tiene importancia desde el punto de vista ingenieril, ya que no se tiene registro de la recuperación de un frente de hundimiento en minas de panel caving convencional (retomando el sistema de explotación y sin pérdidas productivas), lo que permite identificar las actividades claves aplicadas en este caso y obtener experiencia para otros eventos similares.

Los documentos entregados por la gerencia de minas, los documentos de evaluación entregados por el área de geomecánica, y el trabajo interactivo de consulta con varios especialistas y operadores de la División El Teniente, constituyen los principales antecedentes para la ejecución del presente informe.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estudiar y documentar la recuperación de un sector, ante la ocurrencia de daños geomecánicos severos en las galerías del nivel de hundimiento.

Detallando las actividades realizadas por las distintas disciplinas (geología, geomecánica, extracción, perforación y tronadura, topografía, entre otras) de una mina explotada con el método panel caving convencional, de manera de lograr continuidad operacional, evitar merma en producción, recuperar las labores del frente de hundimiento y retomar así el método de explotación.

1.2.2. Objetivos específicos

- Recolectar y filtrar la información relevante del caso de estudio.
- Estudiar las tareas realizadas en el caso de estudio para recuperar o reiniciar el frente de hundimiento (definir área de seguridad, preparar las labores, iniciar recuperación).
- Identificar y describir de manera clara las actividades claves para la recuperación del frente de hundimiento en el caso de estudio.

1.3. Alcances

Este estudio se refiere a las acciones a tomar en la operación de una mina explotada por el método de panel caving convencional, ante la ocurrencia de “daños geomecánicos severos” por delante del frente de hundimiento, que dañen severamente las galerías de este nivel, imposibilitando así realizar la socavación mediante perforación radial de manera normal.

El presente estudio se restringe al sector donde ocurrieron los daños estructurales, el cual corresponde al nivel de hundimiento y producción sector “Centro – Fw¹” de la mina Reservas Norte y las zonas en que se efectuaron trabajos relativos a los daños. La Ilustración 1 muestra una vista en planta de la mina Reservas Norte y el límite de batería del estudio.

¹ Abreviatura del inglés Foot Wall perteneciente a la Nomenclatura de la Mina el Teniente que hace referencia al punto cardinal Este. En la Mina se traduce como “Patilla” (Nomenclatura interior mina se detalla en el Anexo A).

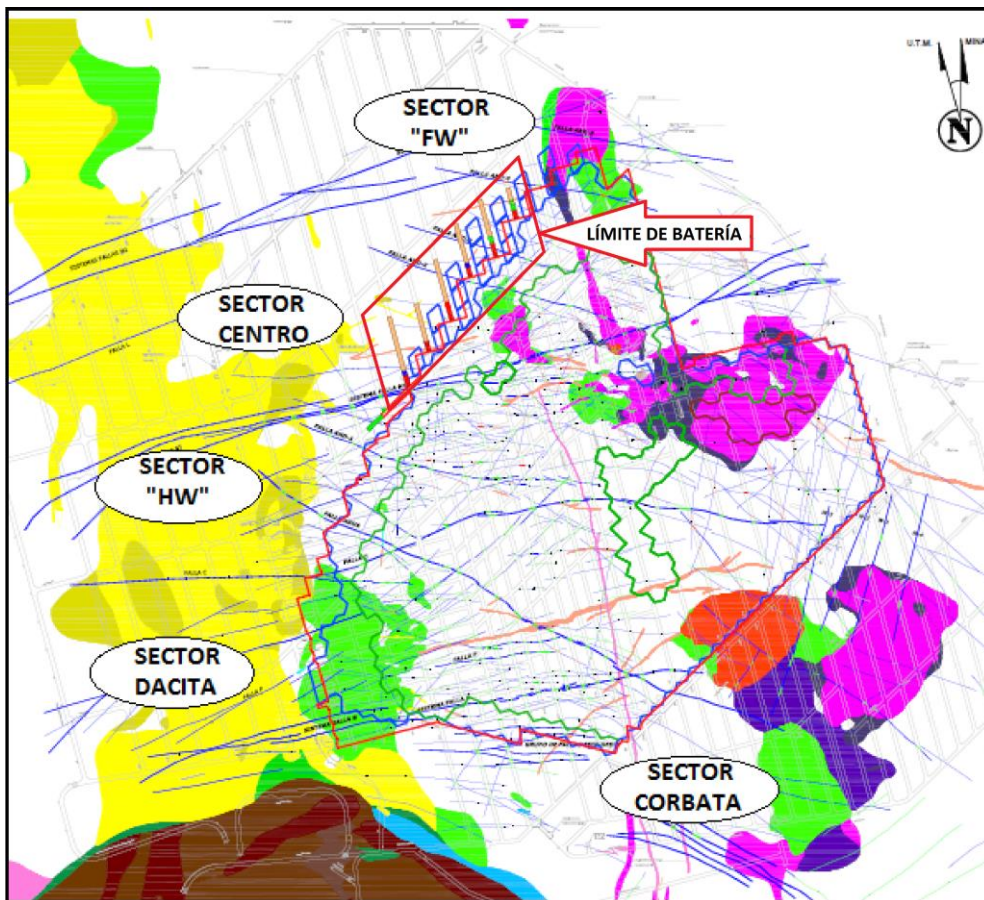


Ilustración 1. Vista en planta mina Reservas Norte (Edición de imagen presentada en Cubillos et al., 2013).

1.4 Metodología

Para la realización de este estudio se ha dividido el trabajo en diferentes etapas, las cuales se exponen a continuación:

- Recopilación de los datos y antecedentes relacionados con el caso de estudio.
- Descripción del caso de estudio, detallando el estado previo de la mina, los daños iniciales, la evolución de estos daños y las distintas acciones tomadas para recuperar el frente de hundimiento.
- Análisis a partir de la visualización, ordenamiento y resumen de los antecedentes y datos del caso, pudiendo encontrar patrones y/o las decisiones más relevantes que contribuyeron a permitir la recuperación / reinicio del frente de hundimiento y a evitar merma productiva. Se busca identificar las actividades claves para lograr la recuperación del frente de hundimiento y consecuentemente retomar el método de explotación.
- El estudio finaliza con una etapa de discusión, aprendizaje y conclusiones.

1.5 Identificación de fuentes

Las fuentes asociadas al estudio son, en primer lugar, las relacionadas con los métodos de caving para la extracción de yacimientos mineros, enfocándose principalmente en el panel caving y sus variantes.

En segundo lugar, se estudian las fuentes asociadas a inestabilidades geomecánicas, para así entender los conceptos de estallido de rocas y colapsos. A esto se agrega el conocimiento referido a la respuesta sísmica en métodos de hundimiento y también lo relativo a recuperación de sectores colapsados.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Métodos de explotación por hundimiento

Los métodos de explotación por hundimiento pueden definirse como un conjunto de operaciones mineras destinadas a cortar la base de sustentación de una columna de mineral, de tal manera que, gracias a la acción de la fuerza gravitacional, se produzca el desplome sucesivo de fragmentos de roca mineralizada, los que al ser extraídos, permiten que se eleve progresivamente el techo de la cavidad que forma tal desprendimiento. Así, a medida que se desprenden fragmentos de roca mineralizada, estos son extraídos y transportados de acuerdo al diseño minero y al sistema de manejo de materiales del sector productivo en cuestión (Cavieres, P., 1999), proceso conocido como caving.

El cambio de mineralización secundaria a primaria se tradujo en cambios importantes en la metodología del hundimiento. En un principio el caving se utilizaba en mineral secundario, que corresponde a un material ubicado en la porción superior del yacimiento, de mayor ley, menor rigidez, baja dureza y fragmentación más fina comparada con la roca de mineralización primaria ubicada a mayor profundidad. Es así como el método block caving usado en mineral secundario dio paso al panel caving aplicado en roca de mineralización primaria. Este método ha evolucionado notablemente, existiendo una gama de variantes.

2.2. Panel caving

El método de extracción panel caving es una forma de explotación masiva por hundimiento gravitacional, en la cual el yacimiento se prepara, socava y extrae incorporando área progresivamente en paneles paralelos. Se tiene un frente de explotación “dinámico”.

Debido a la fragmentación más gruesa del mineral primario, las mallas de extracción del panel caving son de mayores dimensiones que las de un block caving convencional, con variaciones según el sector productivo de la mina.

Con la aplicación de este método en minería subterránea, han aparecido distintos desafíos desde el punto de vista principalmente del estado de esfuerzos o también de la logística en la preparación y desarrollo del nivel de producción. De esta manera se han implementado 3 variantes del método las cuales se mencionan a continuación.

2.2.1. *Panel caving con hundimiento convencional*

Se caracteriza por mantener paralela la línea de incorporación de puntos de extracción con la línea de avance del frente de hundimiento.

La secuencia de desarrollo de las labores se muestra en la Ilustración 2 y se detalla a continuación:

1. Desarrollo labores niveles de producción y hundimiento.
2. Excavación de las zanjas o “bateas” recolectoras de mineral.
3. Socavación alta, con perforación del tipo “radial” desde el nivel de hundimiento, avanzando con el frente de hundimiento hacia las bateas abiertas.
4. Inicio de la extracción.

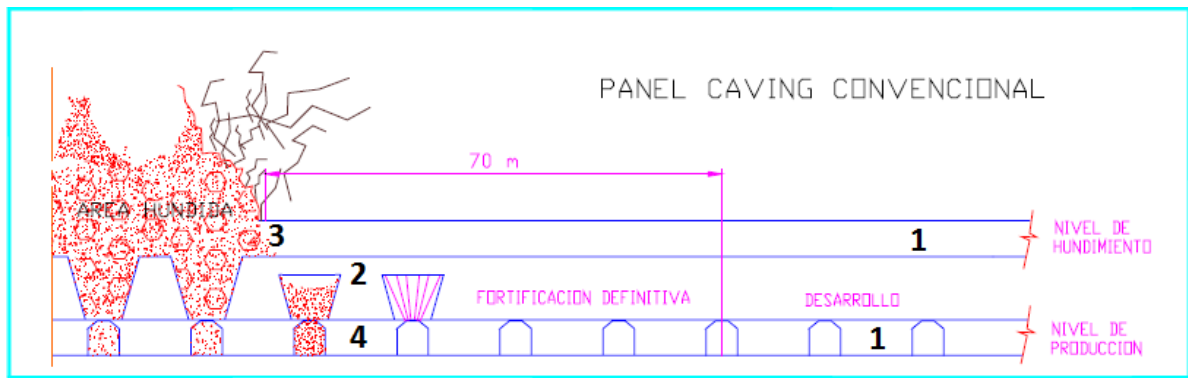


Ilustración 2. Panel caving con hundimiento convencional (Cavieres, 1999).

2.2.2. Panel caving con hundimiento previo

Con la finalidad de disminuir el efecto de la concentración de esfuerzos en las labores cercanas al frente de hundimiento se definió la variante conocida como “hundimiento previo”, que consiste en anticipar la socavación con respecto al desarrollo de las galerías del nivel de producción.

La principal característica de esta variante es el desarrollo de todas las labores del nivel de producción bajo área completamente socavada, hasta una distancia de seguridad por detrás del frente de socavación. La secuencia de excavación de las labores se muestra en la Ilustración 3 y es la siguiente:

1. Desarrollo de las labores del nivel de hundimiento.
2. Socavación de baja altura, con perforaciones radiales laterales (de baja altura), avanzando con el frente de socavación hasta alcanzar una cierta distancia por delante del futuro frente de extracción.
3. Desarrollo de las labores del nivel de producción.
4. Apertura de bateas bajo área socavada.
5. Inicio de la extracción.

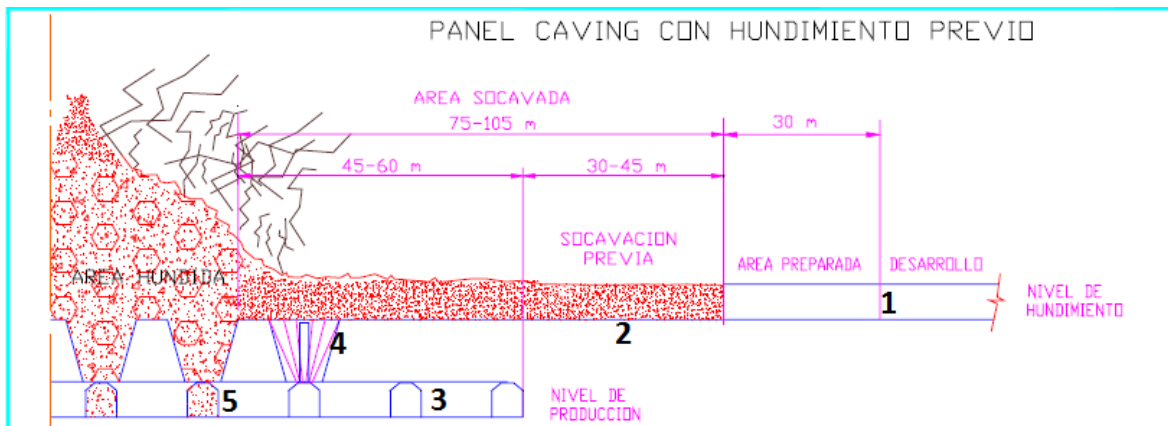


Ilustración 3. Panel caving con hundimiento previo (Cavieres, 1999).

2.2.3. Panel caving con hundimiento avanzado

En esta variante la socavación en el nivel de hundimiento se realiza sobre un nivel de producción parcialmente desarrollado, dejando las galerías de zanjas y bateas para ser excavadas bajo área hundida o socavada.

La ventaja de esta variante con respecto a la anterior es que proporciona una mayor flexibilidad en el desarrollo del nivel de producción. La secuencia de excavación de las labores se aprecia en la Ilustración 4 y se detalla a continuación:

1. Desarrollo de las labores del nivel de hundimiento y de algunas del nivel de producción, en general solamente se construyen las calles de producción.
2. Socavación de baja altura en el nivel de hundimiento, avanzando con el frente hasta alcanzar una cierta distancia por delante del futuro frente de extracción.
3. Se desarrollan las restantes labores del nivel de producción en el sector bajo el área socavada.
4. Se realiza la apertura de las bateas.
5. Se inicia la extracción.

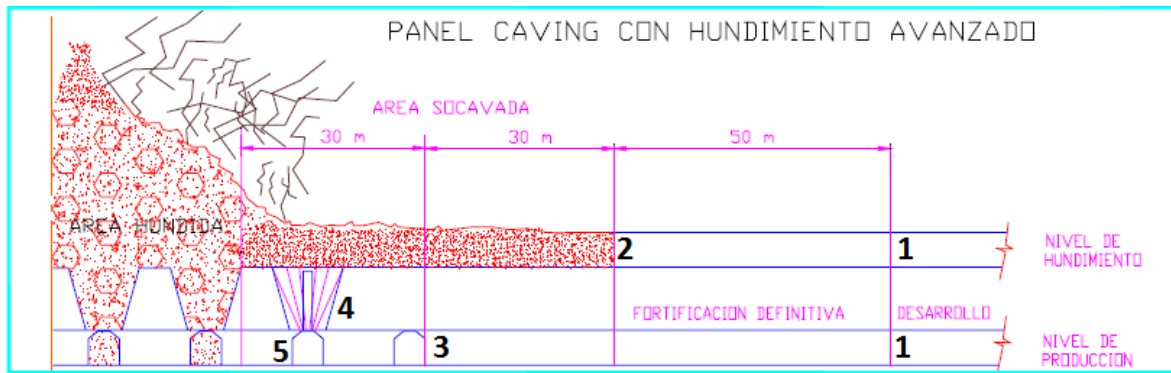


Ilustración 4. Panel caving con hundimiento avanzado (Cavieres, 1999).

2.2.4. Panel caving convencional con fracturamiento hidráulico

El Teniente está generando un quiebre mundial en los métodos subterráneos de explotación, a través de la tecnología de precondicionamiento.

Consiste en intervenir el macizo rocoso antes del proceso de hundimiento, con el objeto de reducir el riesgo sísmico y el tamaño de la roca en los puntos de extracción, provocando que el proceso sea más rápido, seguro y económicamente rentable. Esto se logra mediante la combinación de dos tecnologías: fracturamiento hidráulico (utilizando agua a presión) y debilitamiento dinámico con explosivos (sucesivos estallidos menores distribuidos en el macizo).

En el Sector Centro - Fw de la Mina Reservas Norte, lugar donde ocurrieron los daños estructurales a estudiar, el método de explotación usado es el panel caving convencional con fracturamiento hidráulico, proceso que se realiza previo a la socavación. Este se muestra en la Ilustración 5, donde los números 1 y 2 representan la apertura de bateas y la socavación alta respectivamente.

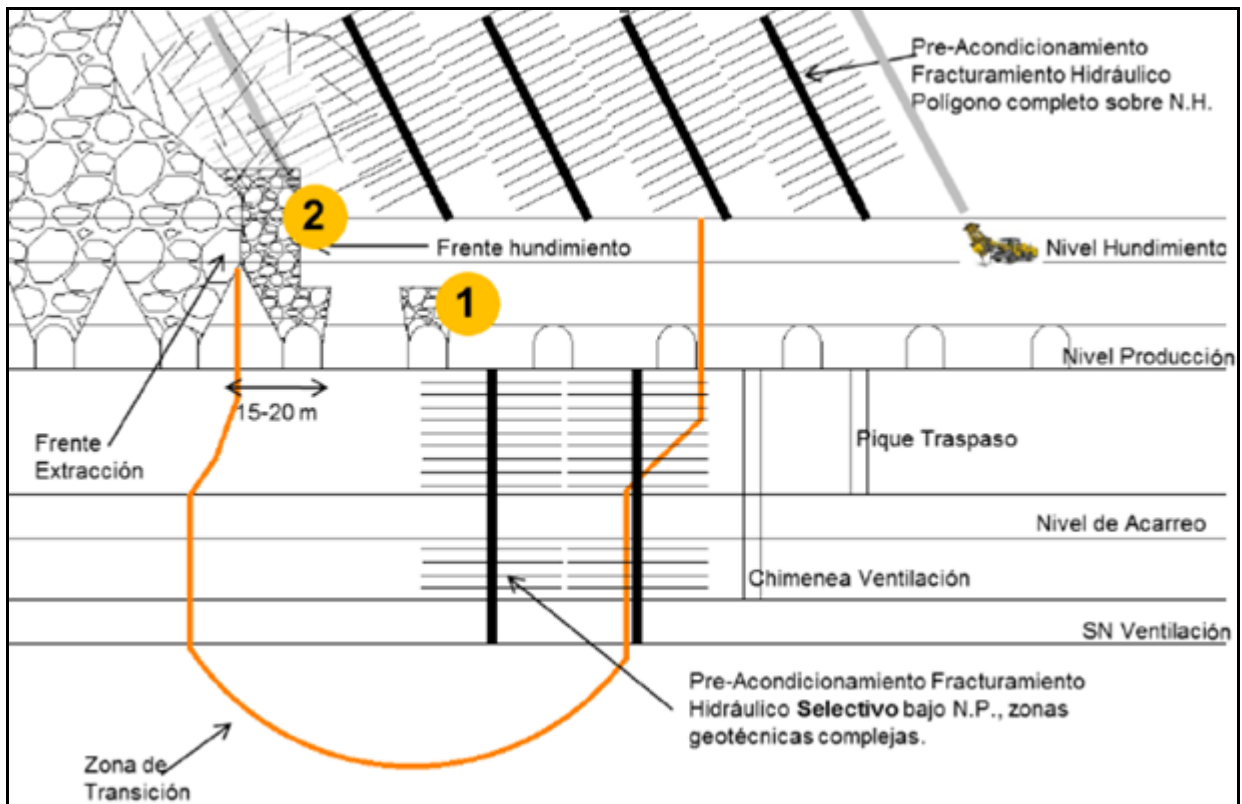


Ilustración 5. Panel caving convencional con FH (Pardo, 2014).

2.3. Efecto sísmico del caving

Globalmente los métodos de explotación por hundimiento buscan un desarme controlado de un conjunto de bloques, partiendo por la tronadura en la base de estos bloques para generar la cara libre y la cavidad que posibiliten la liberación y hundimiento del material. Estos bloques se destraban producto de la gravedad, la cual genera un quiebre en el macizo rocoso; este quiebre tiene un efecto sísmico, el cual se traduce en eventos sísmicos puntuales.

Las posteriores socavaciones y extracciones deberán ser tales que definan la cara libre para el desarme controlado del resto de los bloques que conforman el macizo de interés, lo cual hace que este efecto sísmico ocurra durante todo el proceso de caving. En otras palabras, si hay hundimiento hay eventos sísmicos.

2.4. Inestabilidad geomecánica

Cada variante del panel caving lleva consigo distancias permisibles que permiten reducir el nivel de riesgo asociado a las operaciones unitarias requeridas para poner en producción el sector. Este riesgo es la resultante de un estado tensional variable en magnitud y dirección de los esfuerzos, y del avance del frente de hundimiento.

En la zona de transición el riesgo es mayor, por lo que pueden ocurrir fenómenos que dificulten la continuidad de la actividad minera. En la Ilustración 5 se aprecia la zona de transición para el panel caving convencional.

A continuación se definen los principales fenómenos que ocurren en minería subterránea producto de inestabilidad geomecánica.

2.4.1 Colapso

Derrumbe paulatino de un área, generalmente en el nivel de producción, con daño observado en los pilares corona (crown pillar) y calle/zanja, con pérdidas productivas y cuya expresión máxima es el cierre total de las galerías afectadas, reduciendo el área productiva debido a la pérdida de los accesos a ella.

2.4.2 Estallido de roca

Inestabilidad en que se produce una pérdida de la continuidad del proceso productivo de la operación minera, provocado por la ruptura (evento sísmico) y proyección instantánea del macizo rocoso como consecuencia de las grandes presiones ejercidas en el contorno de una excavación, generalmente ocurre a grandes profundidades.

3 ANTECEDENTES GENERALES

3.1. Codelco

La Corporación Nacional del Cobre de Chile, Codelco, es una empresa minera comercial e industrial de propiedad del estado de Chile.

Su principal producto comercial es el cátodo de cobre grado A, además comercializa concentrados y calcinas del mismo mineral. Sus principales subproductos son el molibdeno, ácido sulfúrico, oro y plata. Los productos mencionados se producen y procesan en sus cinco divisiones. Además posee la Vicepresidencia de Proyectos, la Gerencia de Exploraciones y la Casa Matriz.

Dentro de estas divisiones se encuentra la División El Teniente, que es la mina subterránea de cobre más grande del mundo.

3.2. El Teniente

La División El Teniente se ubica en la comuna de Machalí, 50 kilómetros al este de Rancagua, 80 kilómetros al sur de Santiago y aproximadamente a 2,300 metros sobre el nivel del mar.

El Teniente, que comenzó a ser explotado en 1904, posee alrededor de 3,000 kilómetros de galerías subterráneas y en el año 2013 inició la explotación del Rajo Sur, primera explotación a cielo abierto de la división.

La División El Teniente posee un conjunto de operaciones. En la actualidad existen 9 minas produciendo de manera simultánea, estas son el Rajo Sur, Esmeralda, Teniente 4 Sur, Fortuna, Diablo Regimiento, Sur Andes Pipa, Pipa Norte, Pilar Norte y Reservas Norte. La Ilustración 6 muestra una vista en 3 dimensiones de la Mina, donde se aprecian algunas de las operaciones mencionadas y también se encuentran los proyectos a futuro Nuevo Nivel Mina y Nivel Profundo.

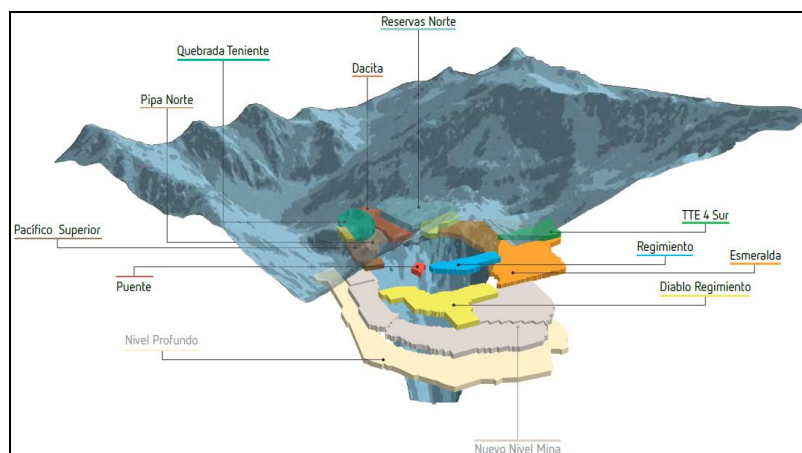


Ilustración 6. Vista 3D mina El Teniente.

Con las operaciones actuales, la división alcanza una producción cercana a las 140 mil toneladas de mineral por día, lo que se traduce en 450 mil toneladas métricas finas anuales de cobre en

forma de barras de cobre anódico y ánodos de cobre. Como resultado del procesamiento del mineral también se obtiene molibdeno.

La mina El Teniente se ha explotado históricamente por métodos de hundimiento. En particular en las últimas dos décadas, la mina El Teniente ha tenido que enfrentar grandes desafíos en su proceso productivo, como consecuencia del cambio de las condiciones geotécnicas del macizo rocoso, la profundización de los sectores productivos, mayores exigencias de producción y la garantía de minimizar el riesgo de exposición de las personas. Parte de estos desafíos se manifiestan a través de las dificultades propias del método de explotación (panel caving en sus 3 variantes) donde destacan la sobre excavación de galerías, los colapsos, los estallidos de rocas y la insuficiente fragmentación.

3.3. Mina Reservas Norte

La mina Reservas Norte (RENO) es una de las operaciones de la mina El Teniente. Se emplaza en el sector norte del yacimiento, dependiendo de la superintendencia de Mina Norte. Contiene reservas extraíbles de 116 millones de toneladas con una ley media de 1,17 [%] de cobre y 0,023 [%] de molibdeno. Reservas Norte contempla producción hasta el año 2022, año en el que se prevé el empalme con el proyecto Nuevo Nivel Mina.

Reservas Norte corresponde a la mina de mayor producción actualmente en El Teniente, alcanzando alrededor de 40.000 toneladas por día, aplicando el método de explotación panel caving en sus variantes convencional y avanzado.

El área en producción actual de la mina Reservas Norte es cercana a 70.000 [m²] con mineral 100 [%] primario. Se tienen 16 calles productivas y alrededor de 270 puntos de extracción. A continuación en la Ilustración 7 se muestra un esquema de operación de la mina, con las cotas asociadas y los principales equipos que se utilizan.

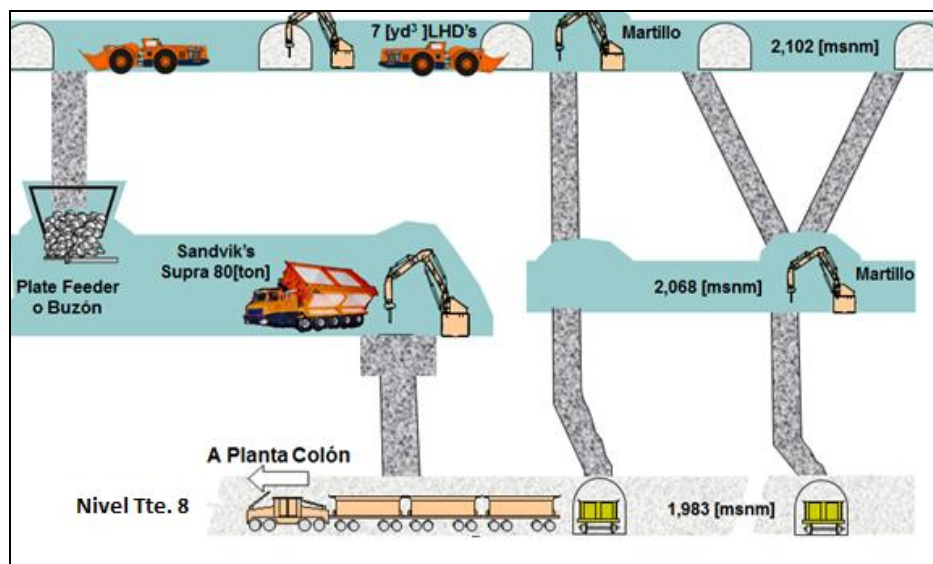


Ilustración 7. Layout extracción mina Reservas Norte (Superintendencia Mina Norte, 2012).

La distancia entre los niveles de producción y hundimiento, medida de piso a piso, corresponde a 18,6 [m]. De esta manera considerando una sección de galerías en ambos niveles de 3,6 [m] x 3,6 [m] (Teórica), se tiene una distancia desde el techo del nivel de producción al piso del nivel de hundimiento de 15 [m].

A continuación se incluyen algunos antecedentes importantes de la mina Reservas Norte. Es preciso mencionar que este estudio fue guiado por el Área de Perforación y Tronadura, por lo que sus características y parámetros se estudian más detalladamente.

3.3.1. Geología mina Reservas Norte

En este capítulo se menciona la geología netamente descriptiva (estructuras y litologías) para los principales sectores de la mina Reservas Norte. La Ilustración 8 presenta una vista en planta de la mina, donde se aprecian las litologías presentes.

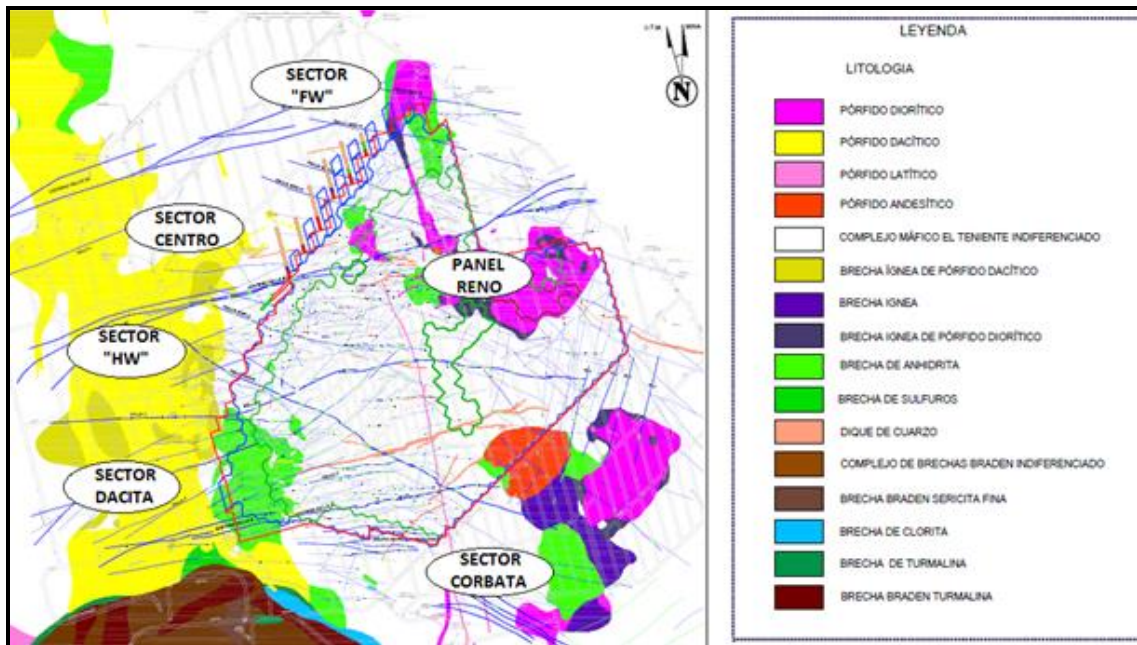


Ilustración 8. Litología Mina Reservas Norte (Edición de imagen presentada en Cubillos et al., 2013.)

A continuación se describen las litologías presentes en la mina.

Complejo Máfico El Teniente (CMET): corresponde a microgabros intruidos por diabasas de textura gruesa y pórfidos basálticos de textura gruesa y fina, estas unidades pueden ser reconocida macroscópicamente y básicamente su principal diferencia es la textura. La roca CMET se caracteriza principalmente por ser un macizo con calidad de roca competente.

Pórfido Dacítico (PDA): corresponde por su parte a rocas de textura porfídica que contienen fenocristales de plagioclasa (20-40 [%]), biotita (1 a 12 [%]) y cuarzo con embahamiento (3 [%]). La masa fundamental está compuesta por 50 [%] de cuarzo microcristalino, 20 [%] de plagioclasa y 5 [%] de biotita fina.

Brechas Ígneas: agrupan rocas de matriz de roca intrusiva-hipavital y clastos de roca caja. Se ubican preferentemente en el contacto entre el CMET y los distintos pórfidos félsicos que la intruyen, desarrollando potencias desde algunos centímetros a decenas de metros.

Brechas de Anhidrita: se desarrollan preferentemente en los contactos de los pórfidos que intruyen al CMET, incorporando fragmentos de rocas máficas y félsicas.

Las estructuras más importantes presentes corresponden a fallas clasificadas como maestras²: Falla N1, Falla C, Falla F, Falla G, Grupo de Fallas Oeste, Falla Agua y fallas mayores³: Falla AND-2, Falla AND-3 y Falla AND-4, las cuales se describen a continuación:

Falla N1: Falla maestra de orientación N74°E/83°S, presenta rellenos principalmente de salbanda y minerales anhidrita, carbonato, turmalina, yeso y tenantita. Su espesor está en el rango de 5 a 50 [cm], con un espesor típico de 15 [cm].

Falla C: Falla maestra de orientación N80°E/68°N, presenta rellenos principalmente de anhidrita, carbonato, yeso, calcopirita y tenantita. Su espesor está en el rango entre 1 y 10 [cm], con un espesor típico de 4 [cm].

Falla F: Falla mayor de orientación N82°E/72°S, presenta rellenos principalmente de carbonato, anhidrita y yeso. Su espesor está en el rango 1 a 7 [cm], con un espesor típico de 2.5 [cm].

Falla G: Falla mayor de orientación N80°E/86°N, presenta rellenos principalmente de carbonato, anhidrita, molibdenita y yeso. Su espesor está en el rango 1 a 15 [cm], con un espesor típico de 3.5 [cm].

Grupo de Fallas Oeste: Falla mayor, presenta una geometría sinuosa de varios planos con una orientación N87°E/88°S, presenta rellenos de anhidrita, salbanda, yeso y carbonatos. Su espesor está en el rango 1 a 3 [cm], con un espesor típico de 2 [cm].

Falla Agua: Falla maestra de orientación N65°W/35°SW, presenta rellenos de carbonatos, yeso, anhidrita y óxidos de hierro y cobre, de espesor en el rango 0.3 a 2 [cm], con espesor típico de 1 [cm].

Falla AND-2: Falla mayor de orientación N75°W/80°S, presenta rellenos de carbonatos, anhidrita, turmalina y salbanda, con un espesor típico de 2 [cm].

Falla AND-3: Falla mayor de orientación N75°W/75°S, presenta rellenos de calcopirita, anhidrita, carbonatos, turmalina y salbanda, con un espesor típico de 3 [cm].

Falla AND-4: Falla mayor de orientación N75°W/75°S, presenta rellenos de calcopirita, anhidrita, carbonatos, turmalina y salbanda, con un espesor típico de 2 [cm].

El modelo estructural del sector Centro - Fw de la mina Reservas Norte se muestra en la Ilustración 9, donde se aprecian las principales estructuras existentes en la zona de daños.

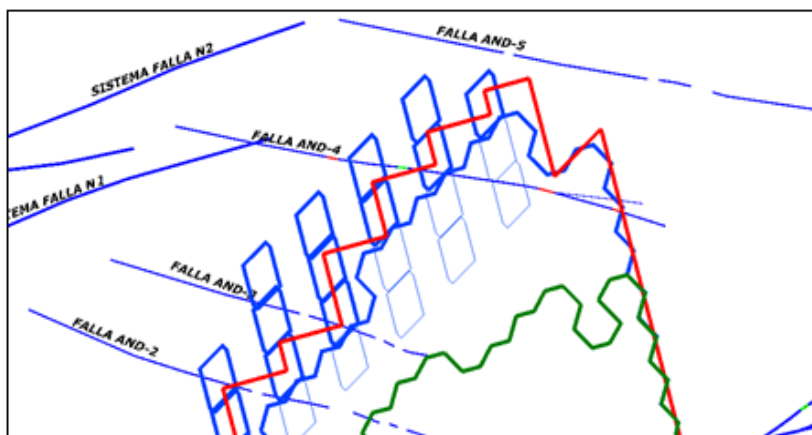


Ilustración 9. Modelo estructural sector Centro - Fw mina Reservas Norte (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

² Fallas con una traza reconocida mayor a 500 [m].

³ Fallas con una traza reconocida entre 100 [m] y 500 [m].

3.3.2. Geotecnia mina Reservas Norte

La roca intacta representativa de la mina El Teniente presenta una alta resistencia con valores de UCS desde 100 a 130 [Mpa] y caracterizada también por su baja elasticidad, propiciando un comportamiento de ruptura frágil. Basado en estas evidencias, el macizo rocoso globalmente se caracteriza por ser muy resistente, con un fallamiento violento propenso a la liberación súbita de energía.

La Tabla 1 presenta el resumen de las propiedades físicas de las principales unidades litológicas presentes en la mina Reservas Norte.

Tabla 1. Propiedades geotécnicas roca intacta, mina Reservas Norte.

Parámetros	Brecha de anhidrita	Pórfido diorítico	Coefficiente de Variación [%]	CMET	Coefficiente de Variación [%]	Pórfido Dacítico	Coefficiente de Variación [%]	Brecha ígnea de pórfido diorítico	Brecha ígnea de pórfido dacítico
E [Gpa]	41	47	19	55	43	30	30	Similar a pórfido diorítico	Similar a pórfido dacítico
ν	0.10	0.25	8	0.25	31	0.18	40		
B [Gpa]	17.10	31.30	-	36.70	-	15.60	35		
G [Gpa]	18.60	18.80	-	22	-	12.70	35		
γ [ton/m ³]	2.72	2.71	1	2.84	1	2.63	4		
η [%]	2.32	-	-	-	-	3	17		
UCS [Mpa]	102	144	30	121	26	110	30		
T _i [Mpa]	13	16	30	13	30	12	20		
E/UCS	402	326	-	455	-	273	30		
UCS/T _i	8	9	-	9	-	9,2	25		
V _p [m/s]	-	-	-	-	-	4,800	6		
V _g [m/s]	-	-	-	-	-	2,900	7		
m _i	7.70	7	-	12.10	-	20.20	-		
σ_{ci} [Mpa]	94	148	-	132	-	112	-		
σ_{ti} [Mpa]	12	-21	-	-11	-	6	-		
c [Mpa]	19	30	-	24	-	19	-		
ϕ [°]	36	34	-	42	-	48	-		

Dónde: **E**: Módulo de Young. **ν** : Razón de Poisson. **B**: Módulo de deformación volumétrica. **G**: Módulo de corte. γ : Densidad. **UCS**: Resistencia a la compresión uniaxial. **T_i**: Resistencia a la tracción. **m_i**: Parámetro del criterio de falla de Hoek-Brown. **σ_{ci}** : Resistencia a la compresión según el criterio de falla de Hoek-Brown. **σ_{ti}** : Resistencia a la tracción según el criterio de falla de Hoek-Brown. **c**: Cohesión. **Φ** : Angulo de fricción interna.

En la industria existen variados índices geotécnicos de calidad del macizo rocoso, tales como: IRMR (Laubscher y Jakubec, 2001), GSI (Marinos y Hoek, 2000), RMR (Bieniawski, 1989), Q y Q' (Barton et al., 1974). Estos difieren principalmente en los parámetros geológicos usados para su cálculo y son relevantes para los distintos procesos mineros, desde la planificación hasta la operación.

La calidad del macizo rocoso se resume en la Tabla 2, con los distintos índices geotécnicos y para las principales unidades litológicas de la mina Reservas Norte.

Tabla 2. Calidad macizo rocoso, Sector Centro-Fw.

Litología	IRMR	Q'	Q	RMR(B)	GSI
Pórfido Diorítico	59-62	263-355	1.7-2.29	68-72	75-90
Pórfido Dacítico	58-63	400-576	1.57-2.26	62-77	75-90
CMET	52-57	148-220	0.74-1.22	66-72	70-85
BX ANH	58-62	468-513	1.74-1.9	70-74	80-90

De la tabla anterior básicamente se desprende que el sector Centro-Fw posee macizo rocoso con calidad competente.

La Ilustración 10 presenta el modelo geotécnico del macizo rocoso de la mina Reservas Norte (cuadrado verde), generado por la Superintendencia de Geología a partir de porcentajes de vetillas blandas medidas en sondajes orientados y validados con mapeos en la mina. Globalmente se reconoce en color azul asociado a intrusivos félsicos, sectores con bajo porcentaje de vetillas blandas (0,5 a 2 [v/m]) lo que le confiere regulares características por la hundibilidad. Una franja global, en color verde, con mediana frecuencia de vetillas (4 a 5,5 [v/m]) y una franja externa, color rojo, con alta frecuencia de vetillas (7,5 a 9 [v/m]), lo que le confiere en general, buenas características geotécnicas para la hundibilidad.

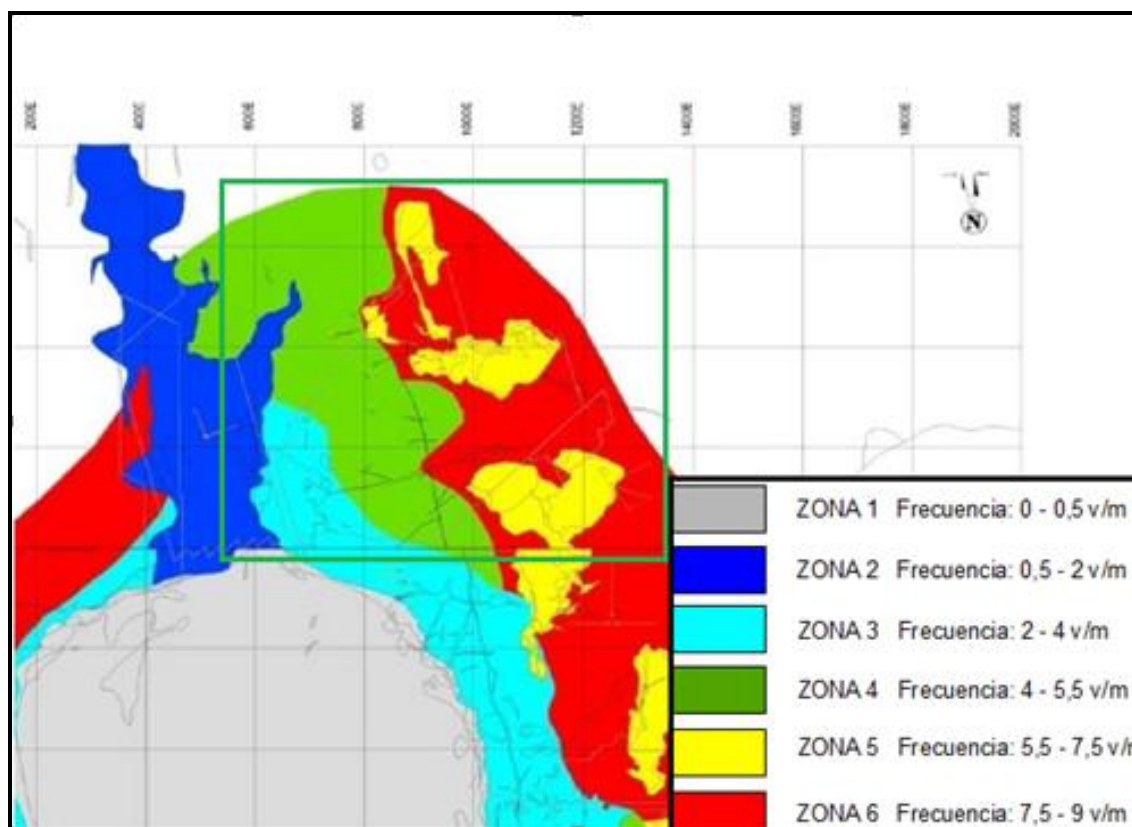


Ilustración 10. Zonación geotécnica con base en frecuencia de vetillas blandas por metro medidas en sondajes orientados, mina Reservas Norte (Edición de imagen presentada en Superintendencia Geología, 2014).

3.3.3. Esfuerzos

Para la caracterización del yacimiento en términos del estado esfuerzos representativos, se puede señalar que el esfuerzo principal mayor in situ representativo varía de 30 a 50 [Mpa].

Las evidencias empíricas por comportamiento del macizo rocoso en las zonas de abutment stress (mayor concentración de esfuerzos) inducido por las cavidades generadas, junto con el post análisis y back análisis de las siniestralidades geotécnicas (Rojas et al., 2005; Karzulovic, 2005 y Krstulovic, 1994) permiten señalar que las cavidades amplifican el esfuerzo in situ en al menos 1,5 a 2,0 veces en la zona de abutment stress.

Finalmente, para poner en contexto la realidad de mina El Teniente respecto de otras operaciones de caving en el mundo, los esfuerzos característicos de mina El Teniente son superiores a los de la mayoría de las otras minas, que bordean valores in situ menores incluso a 30 [Mpa] (Rojas, 2013).

3.3.4. Malla de extracción

Para verificar las dimensiones de la malla de extracción se midió la distancia entre calles en sentido perpendicular a ellas ($D_{C\perp C}$) y la distancia entre zanjas en sentido paralelo a las calles ($D_{Z//C}$) en el plano de El Teniente Sub-6. Esto se aprecia en la Ilustración 11.



Ilustración 11. Dimensiones malla de extracción.

De esta manera se tiene que $D_{C\perp C} = 30$ [m] y $D_{Z//C} = 20$ [m], por lo que la malla corresponde a una malla tipo Teniente de 15x20, donde operan equipos LHD de 7 [yd³].

3.3.5. Perforación y tronadura

Es necesario explicar la aplicación de los métodos de explotación en la mina Reservas Norte, ya que en la actualidad existen el panel caving convencional y el panel caving con hundimiento avanzado. La Ilustración 12 entrega la distribución de estas variantes.

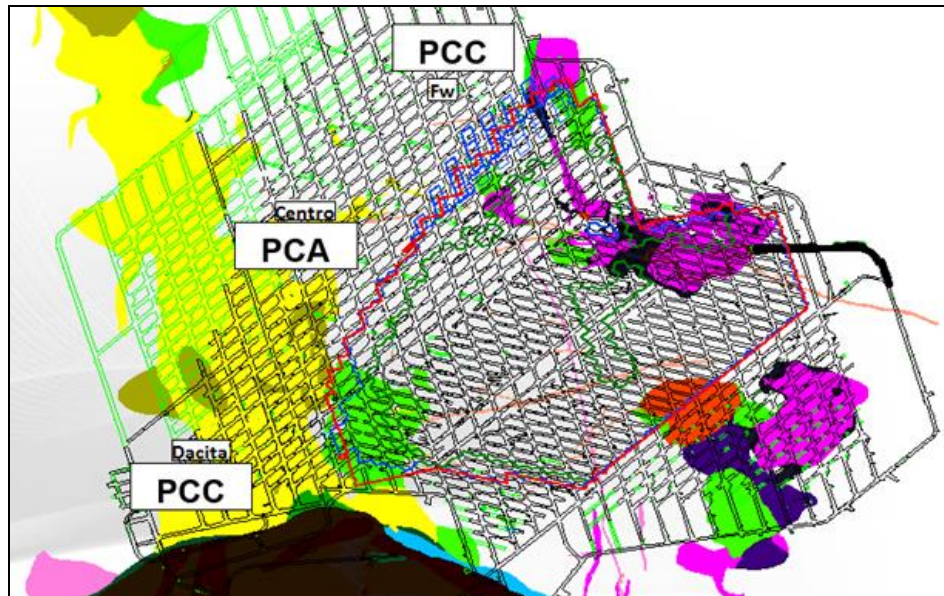


Ilustración 12. Variantes de panel caving en mina Reservas Norte (Codelco Chile, División El Teniente, 2014)

Gran parte de la zona ya hundida (interior línea roja) se explotó con hundimiento avanzado y por lo tanto existen zanjas donde se tiene el empalme de los dos métodos, con presencia en este sector de bateas mixtas.

En sectores de panel caving con hundimiento avanzado se registraron daños en los pilares del UCL lo que imposibilitaba la correcta socavación. Producto de estos daños se construyeron las llamadas “zanjas altas”, donde se excavaron zanjas hasta el techo del nivel de hundimiento, en otras palabras la zanja alta surge como solución a la imposibilidad de socavar con el método de hundimiento avanzado.

A continuación, y dado que la zona de estudio contempla el uso de panel caving convencional, se detallan los principales diseños y parámetros de perforación ocupados en el sector.

La Ilustración 13 muestra el diagrama de perforación radial para la socavación alta en el nivel de hundimiento.

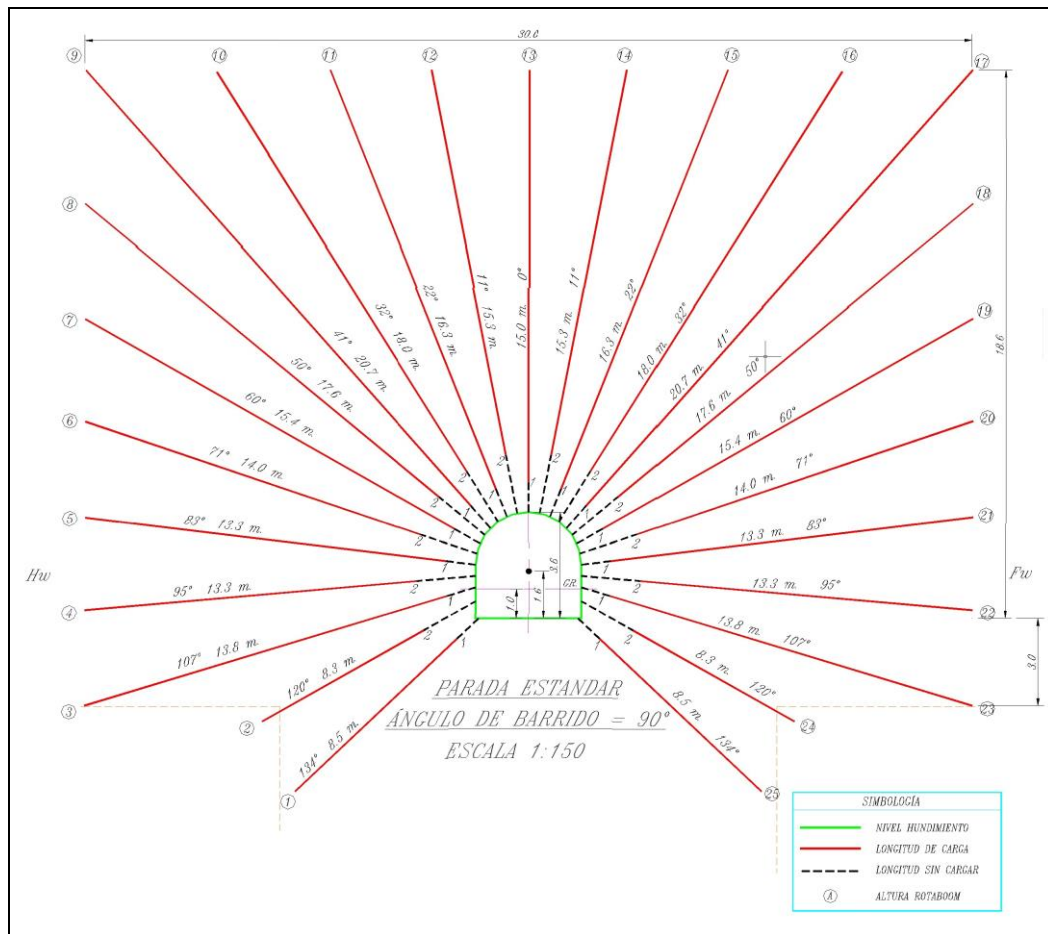


Ilustración 13. Diagrama de perforación radial estándar. (Edición de imagen presentada en Superintendencia Mina Norte (a), 2014).

La secuencia de tronadura de una parada radial se detalla en la Tabla 3, donde las perforaciones descendentes expresan su ángulo en color rojo y las perforaciones ascendentes en color azul. Se puede apreciar que la secuencia de tronadura comienza en la perforación número 1, la que corresponde a la primera descendente del lado “cabeza”, luego se va alternando con una perforación del lado “patilla” hacia arriba con un delta de retardo de 25 [ms], hasta llegar a la perforación central en el techo (perforación número 13).

Tabla 3. Detalle tronadura parada radial.

Tiro N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Ángulo	45°	31°	18°	7°	5°	17°	29°	39°	48°	57°	68°	79°	90°	79°	68°	57°	48°	39°	29°	17°	5°	7°	18°	31°	45°
Largo diseño	8.6	8.4	13.9	13.3	13.3	14	15.4	17.6	20.7	18	16.3	15.3	15	15.3	16.3	18	20.7	17.6	15.4	14	13.3	13.3	13.9	8.4	8.6
Retardo [ms]	1.900	1.950	2.000	2.050	2.100	2.150	2.200	2.250	2.300	2.350	2.400	2.450	2.500	2.475	2.425	2.375	2.325	2.275	2.225	2.175	2.125	2.075	2.025	1.975	1.925
Taco [m]	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

La cara libre para la tronadura radial es generada por el retiro de esponjamiento de la parada tronada previamente, hacia el frente de hundimiento.

El detalle de los parámetros de perforación y tronadura se muestran, respectivamente, en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Parámetros de perforación en perforaciones radiales.

Perforación	Parada
Tipo de roca	CMET
Diámetro de perforación [pulg]	3
Número de perforaciones	25
Burden [m]	2
Distancia en el fondo [m]	3,0 – 3,3
Longitud perforada [m]	364,6
Volumen arrancado [m ³]	1.260,6
Área hundida [m ² hdo]	60
Factor de perforación [mb/m ³]	0,3
Perforación por área hundida [m/m ² hdo]	6,1
Altura de socavación [m]	18,6

Tabla 5. Parámetros de tronadura perforaciones radiales.

Tronadura	Parada
Tipo de explosivo	Anfo
Cantidad de detonadores	25
Cantidad de pentolitas cilíndricas	25
Longitud sin cargar [m]	37
Longitud de carguío [m]	327,6
Cantidad de taco greda [3 cartones/tiro]	75
Densidad de carga lineal [Kg/m]	4,1
Cantidad de explosivo [Kg]	1.343,2
Factor de carga [Kg/m ³]	1,1
Explosivo por área hundida [Kg/m ² hdo]	22,4

La Ilustración 14 presenta una vista en perfil (orientación Hw-Fw) del diseño de perforación de zanjas.

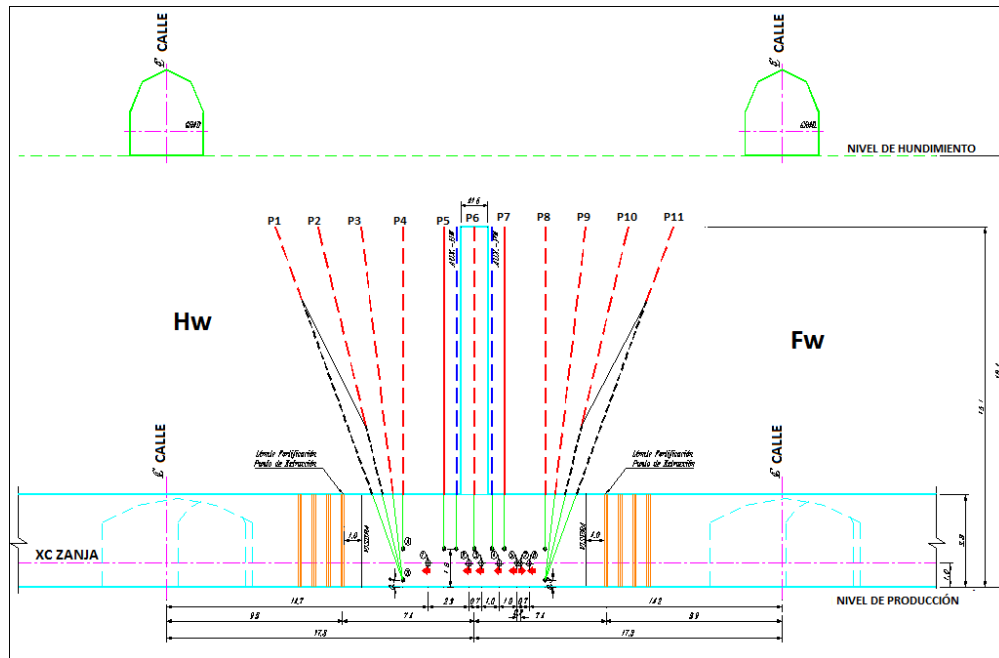


Ilustración 14. Perfil Hw-Fw, diseño zanja convencional mina Reservas Norte (Superintendencia Mina Norte (a), 2014).

Los principales parámetros de la zanja y su chimenea se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de diseño zanjas.

Chimenea		Zanja	
Diámetro [m]	1,5	Altura [m]	15
Altura [m] (desde techo galería)	11,4	Volumen Total [m ³]	1.776

Por recomendación geomecánica la tronadura de las bateas se realiza en dos fases, esto quiere decir que consta de dos etapas de tronaduras realizadas independientes entre si.

La primera fase consiste en tronar el llamado “canalón”, el que cumple la función de un slot, generando la cara libre para la segunda fase. Luego, por protocolo geomecánico se aísla la zona para prevenir la ocurrencia de un evento sísmico y además cumplir con ventilar el área. Posteriormente se debe retirar el material removido por esta tronadura para que el slot cumpla de manera correcta la función de cara libre.

La segunda fase consiste en tronar el material restante de la batea, hacia el patilla y hacia el cabeza, de manera de generar la geometría final de la batea.

Lo anterior se indica en las Ilustraciones 15 y 16, en una vista en perfil y en planta respectivamente.

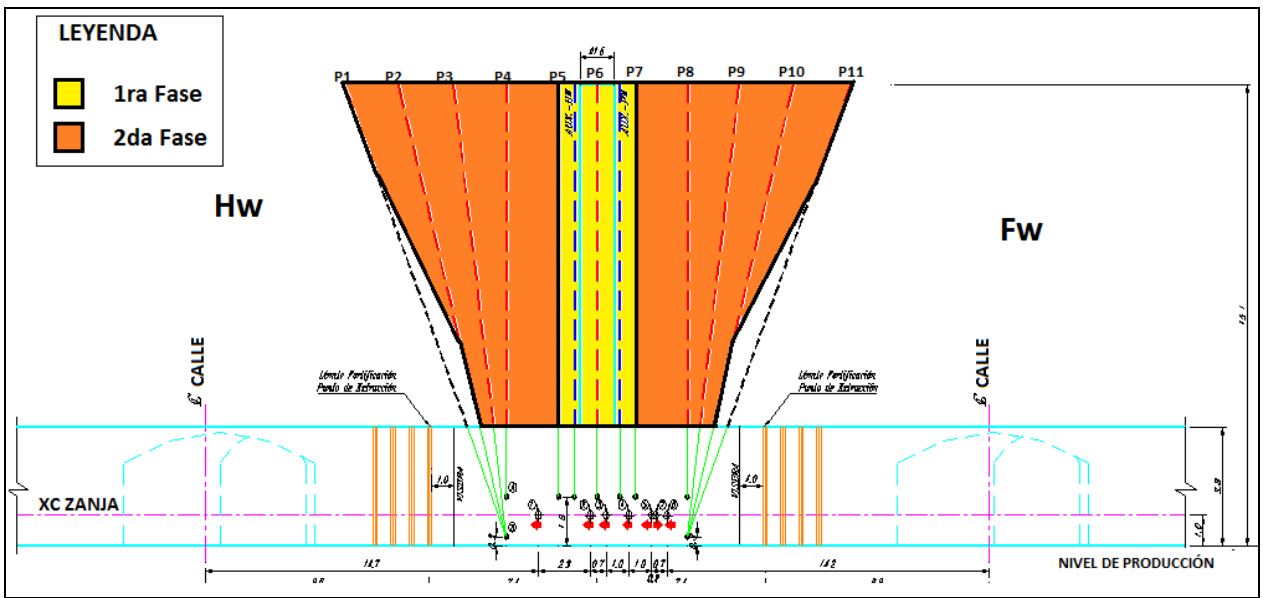


Ilustración 15. Vista en perfil tronadura de fases bateas (Edición de imagen presentada en Superintendencia Mina Norte (a), 2014).

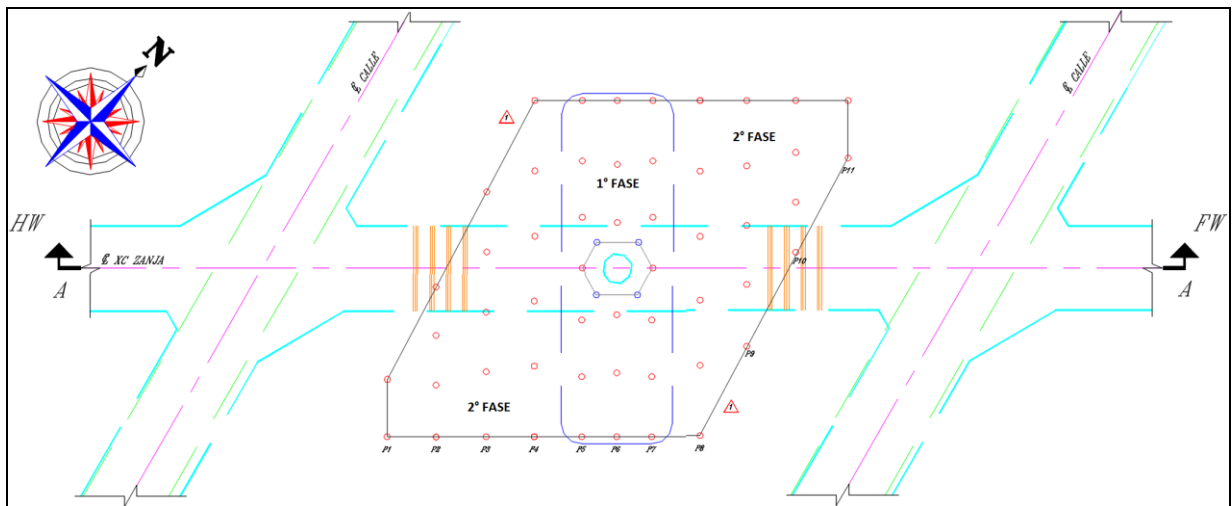


Ilustración 16. Vista en planta tronadura de fases bateas (Edición de imagen presentada en Superintendencia Mina Norte (a), 2014).

4 CASO DE ESTUDIO: DAÑOS SEVEROS EN FRENTE DE HUNDIMIENTO MINA RESERVAS NORTE

4.1. Estado de la mina

Previo a la descripción los daños ocurridos es necesario conocer el estatus inicial de la mina, lo que implica precisar el avance del frente de hundimiento a febrero del 2014, el estado del proceso de perforación y tronadura, la sismicidad del sector y finalmente el estado del proceso de extracción.

4.1.1. Perforación y tronadura

Una forma clara para conocer el estatus de la operación de perforación es mediante el programa de actividades mensuales (PAM). En este caso, como los daños ocurrieron en marzo del año 2014, será necesario revisar el PAM de este mes.

Así, se entregan las Ilustraciones 17 y 18, donde se aprecian respectivamente las perforaciones proyectadas en el nivel de hundimiento (radiales) y en el nivel de producción (bateas). Sumado a esto, se pueden observar las perforaciones realizadas anteriormente, ya sea en el año 2013 (color gris) o en los dos primeros meses del año 2014 (color negro).

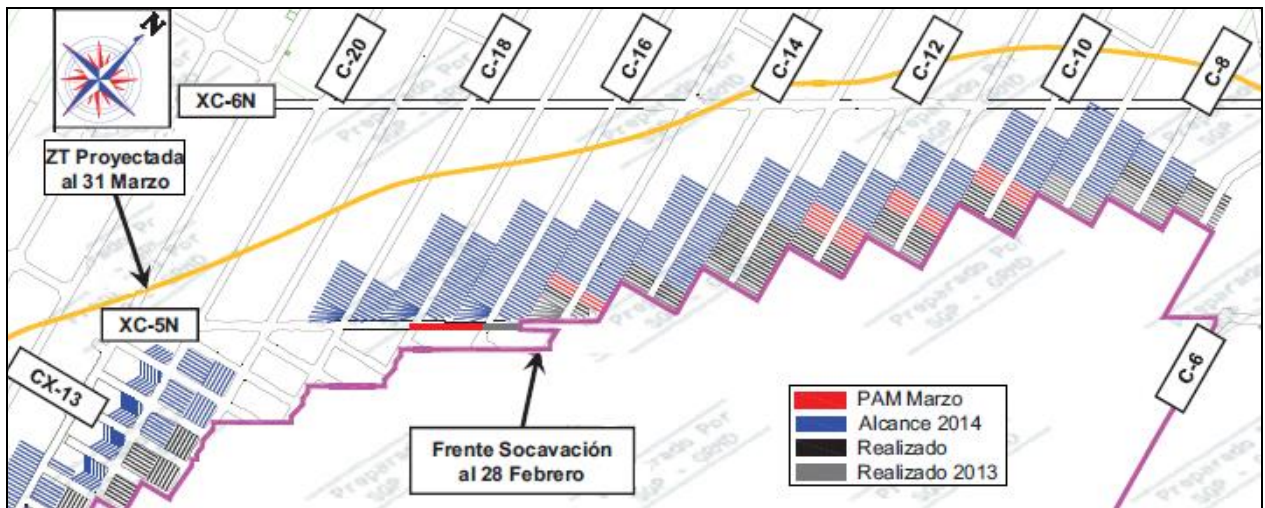


Ilustración 17. Perforaciones radiales Reservas Norte y Dacita, PAM de marzo del 2014.

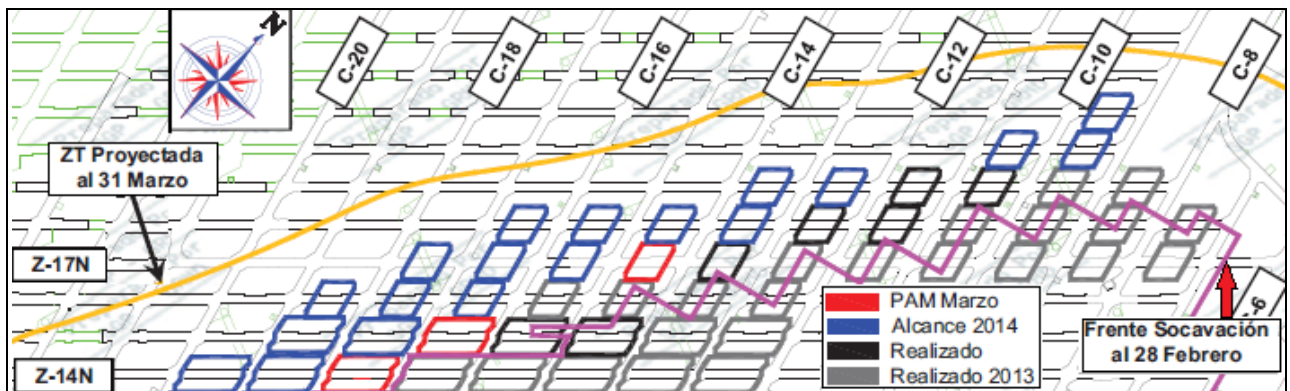


Ilustración 18. Perforación de Bateas Reservas Norte y Dacita, PAM de marzo del 2014.

Para la operación de tronadura en el sector se incluye la Ilustración 19, donde se observa una vista en planta del sector en estudio y se puede visualizar el frente de hundimiento al 11 de marzo del 2014

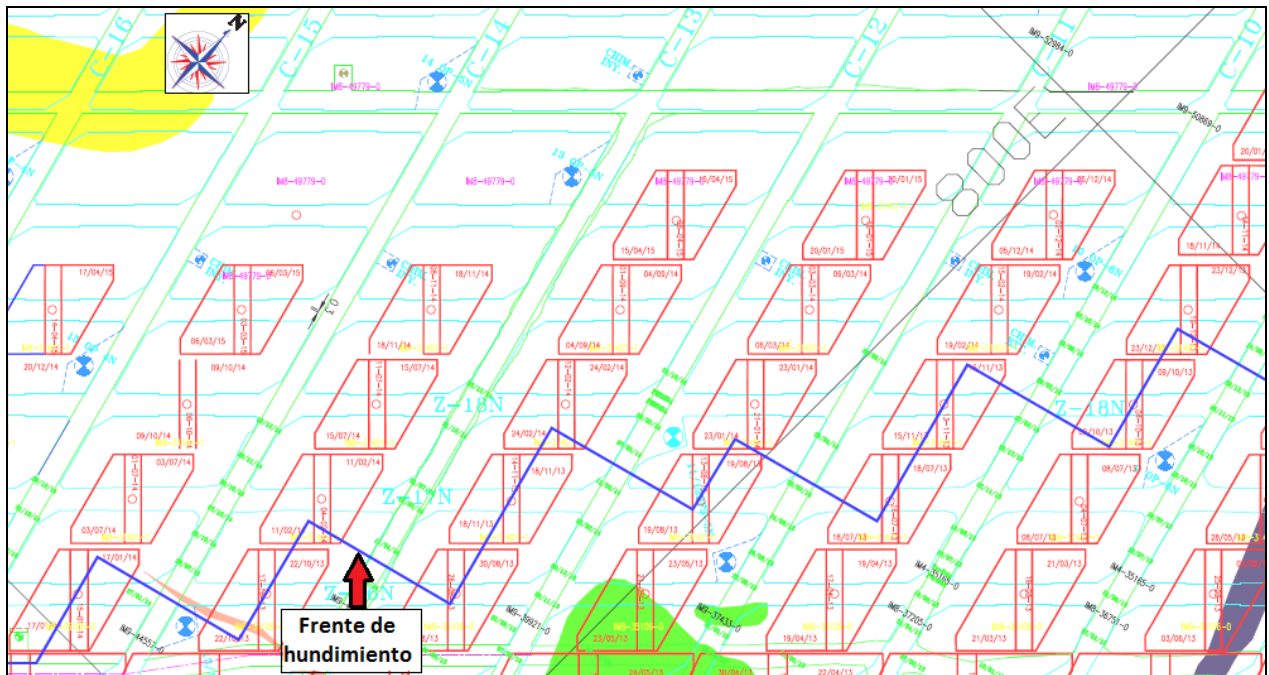


Ilustración 19. Vista en planta frente de hundimiento sector Centro-Fw, mina Reservas Norte.

Para mayor claridad sobre el estado de la tronadura previo a los daños, se revisaron las últimas tronaduras realizadas en el sector, tanto de paradas radiales (socavación) como de apertura de bateas en el nivel de producción (dos fases). Lo anterior se presenta en la Ilustración 20, con la ubicación en planta de las tronaduras realizadas y su orden temporal.

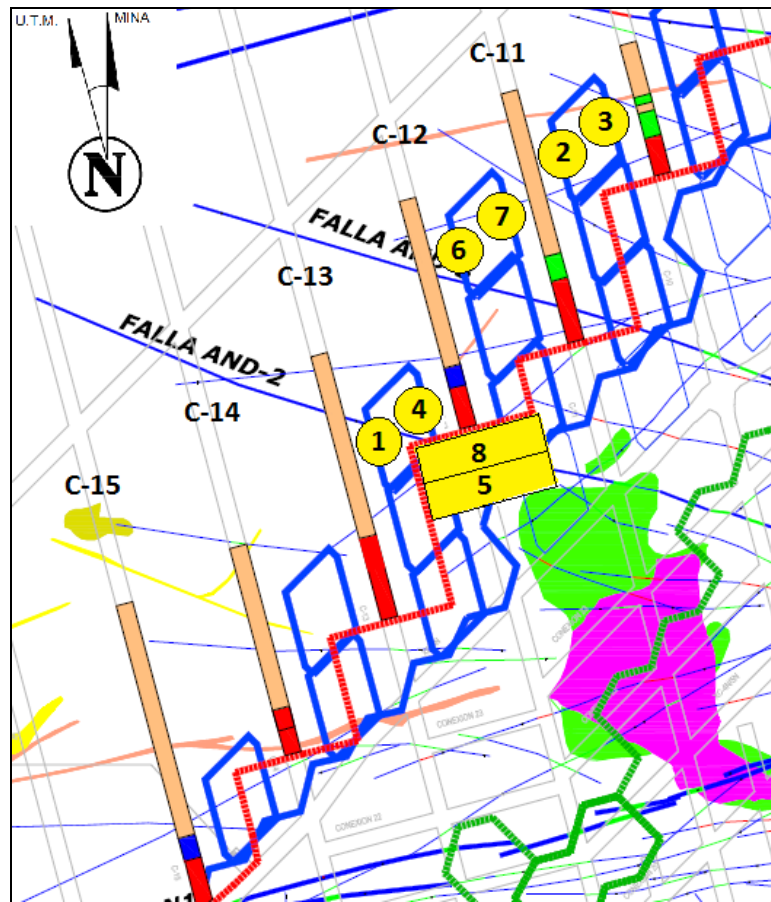


Ilustración 20. Últimas tronaduras realizadas en el sector de daños (Edición de imagen presentada en Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

En la Tabla 7 se aprecia que las tronaduras realizadas en el mes de marzo, antes de la ocurrencia de los daños, corresponden a las dos fases de la Z19N – C11/C12 y a la socavación realizada en la C12; esta última consta de 4 paradas.

Tabla 7. Detalle últimas tronaduras realizadas en el sector.

N°	Tronadura	Tipo	Fecha
1	Z18N - C12/C13	1ra Fase Batea	12/2/2014
2	Z19N - C10/C11	1ra Fase Batea	14/2/2014
3	Z19N - C10/C11	2da Fase Batea	19/2/2014
4	Z18N - C12/C13	2da Fase Batea	21/2/2014
5	C12	Parada Radial - P7 a P10	25/02/2014
6	Z19N - C11/C12	1ra Fase Batea	3/3/2014
7	Z19N - C11/C12	2da Fase Batea	6/3/2014
8	C12	Parada Radial - P11 a P14	11/3/2014

4.1.2. Sismicidad

La Ilustración 21 muestra la sismicidad del sector antes de los eventos en estudio; esta presenta la cantidad de eventos por día desde finales de octubre del año 2013 hasta finales de febrero del año 2014.

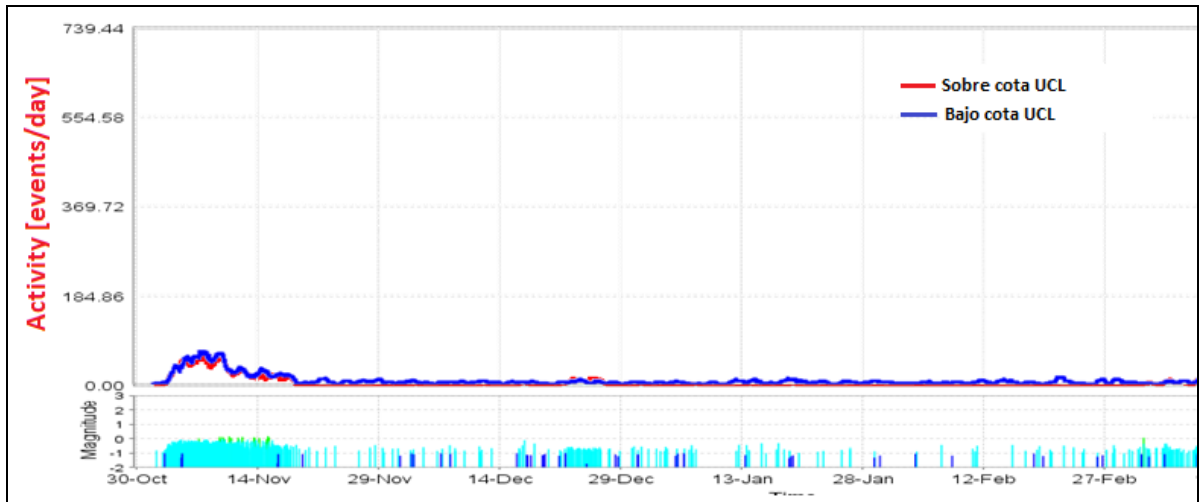


Ilustración 21. Eventos sísmicos por día desde noviembre del 2013 hasta febrero del 2014 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La Ilustración 22 presenta una vista en planta del polígono monitoreado anteriormente.

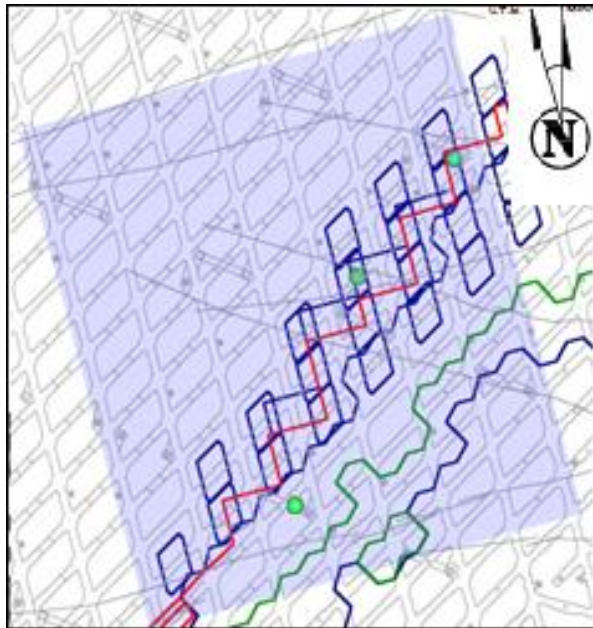


Ilustración 22. Polígono de estudio sísmico (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Una visualización más general de la sismicidad se aprecia en la Ilustración 23, la cual muestra una vista en planta de la actividad sísmica registrada durante todo el mes de febrero del año 2014. Se puede ver que en el sector Centro-Fw se registraron menos eventos que en el sector Corbata por ejemplo. En este último los eventos se ubican en torno al frente de avance minero, por lo que están probablemente asociados a la formación de pared final en el sector Corbata. A modo de

leyenda cada punto representa un evento sísmico y su color representa el rango de magnitud expresado en la leyenda.

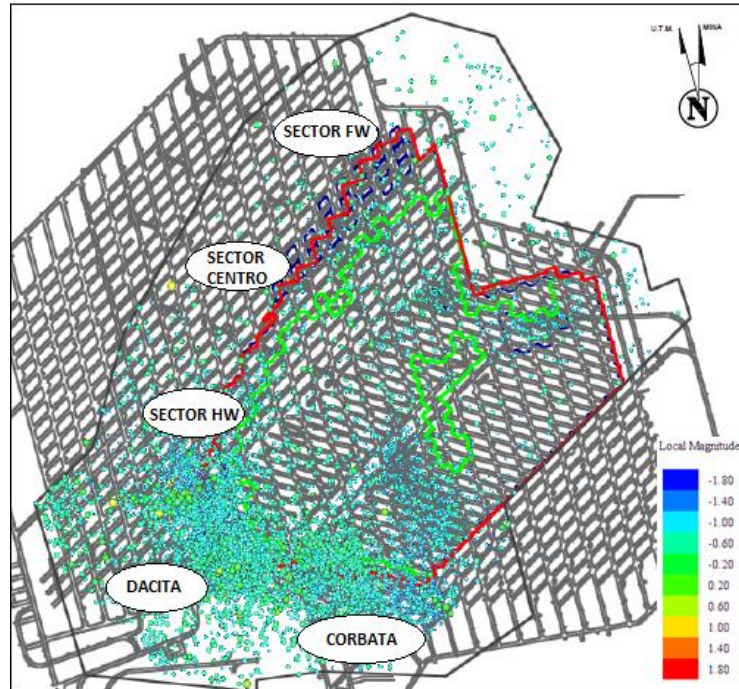


Ilustración 23. Actividad sísmica registrada durante el mes de febrero del 2014, mina Reservas Norte. (Edición de imagen presentada en Bizama, 2014)

La Ilustración 24 muestra una vista en planta y una isométrica de los eventos ocurridos el 8 de marzo del año 2014, justo antes del denominado “clúster sísmico” asociado a la inestabilidad que generó el evento en estudio. Nuevamente, cada punto indica un evento sísmico y se puede apreciar que la frecuencia de eventos en el sector es baja.

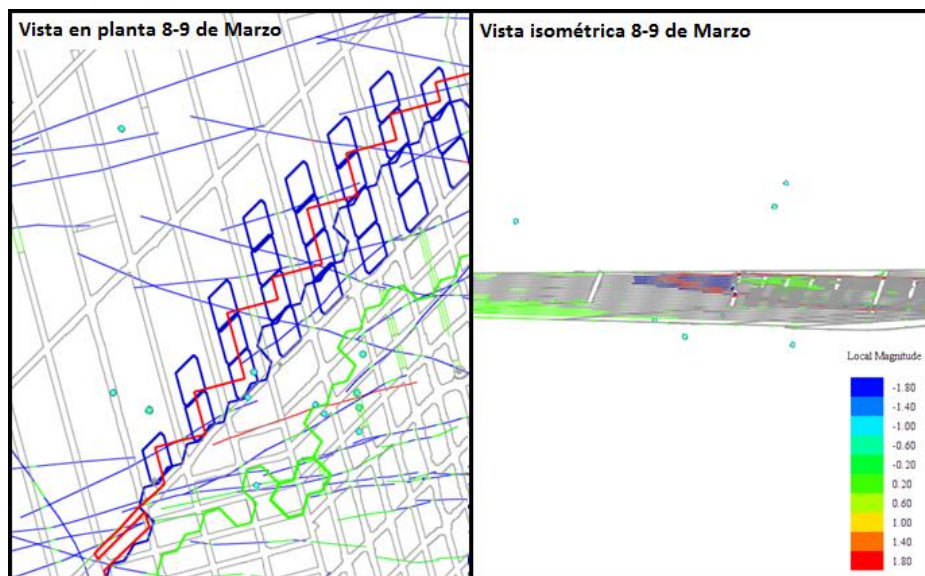


Ilustración 24. Vista en planta e isométrica de eventos sísmicos el día 8 de marzo del 2014 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

4.1.3. Extracción

El control las velocidades de extracción tiene como principales objetivos mantener una extracción moderada en la zona de quiebre⁴, controlar la dilución, evitar eventos relacionados a la presencia de agua/barro y finalmente maximizar la recuperación de reservas. Las velocidades de extracción están definidas según el porcentaje de columna extraída en cada punto de extracción. La liberación del control de la velocidad de extracción ocurre cuando se supere el 30 [%] de la altura de columna extraída (régimen).

La Tabla 8 muestra las velocidades de extracción registradas en la mina Reservas Norte, según el porcentaje de altura de columna extraída. Cabe mencionar que estos parámetros pueden tener variaciones según las condiciones geomecánicas sobre los puntos de extracción.

Tabla 8. Velocidades de extracción según porcentaje de altura de columna extraída.

Tramo [%]	Velocidad [t/m ² *día]
0 - 5	0,28
5 - 10	0,34
10 - 15	0,40
15 - 20	0,47
20 - 25	0,55
24 - 30	0,65
> 30	Liberado

El ángulo de extracción en la zona de quiebre tiene por objetivo mantener el volumen quebrado de forma controlada. En la zona en quiebre el ángulo de extracción recomendado es entre 30° a 45°, el cual se debe cumplir para:

- Evitar la formación de losas.
- Evitar sobre extracción.
- Definir continuidad de incorporación de área.

Conocido lo anterior, a fines de febrero de 2014 se envió el plan de producción mensual (PPM) para marzo del mismo año, donde se detalla la velocidad de extracción recomendada para cada punto. Esto se aprecia en la Ilustración 25.

⁴ Puntos de extracción en los que el porcentaje de altura de columna extraída es menor a 30 [%].

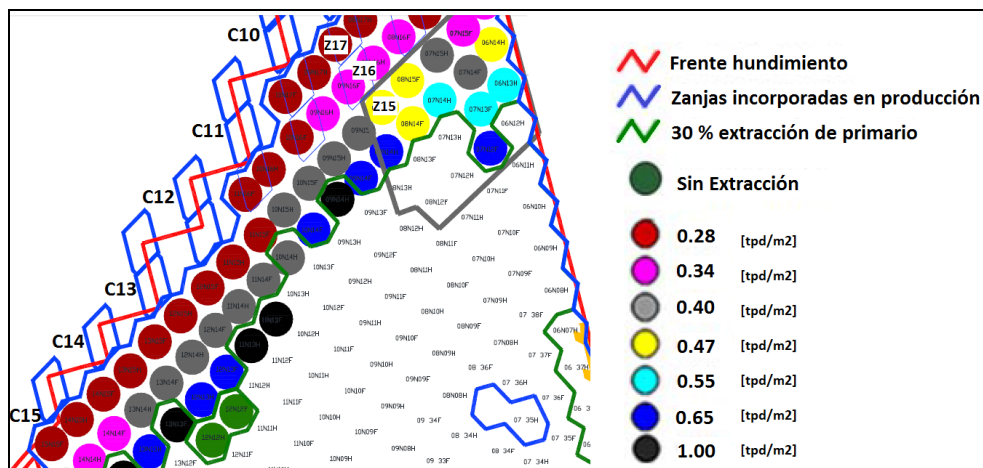


Ilustración 25. Velocidades de extracción recomendadas para el mes de marzo de 2014, sector Centro-Fw, Reservas Norte.

En las Ilustraciones 26 y 27 se muestra el porcentaje de columna extraída en cada uno de los puntos de extracción incorporados y sin incorporar en la zona de daños al 1 de marzo del 2014, con una vista isométrica y en planta respectivamente. Las alturas de extracción se calculan a partir del retiro del esponjamiento, tanto de las bateas como de la socavación. Una vez terminada la totalidad de esta extracción (retiro de esponjamiento) recién se habla de que el punto está incorporado.

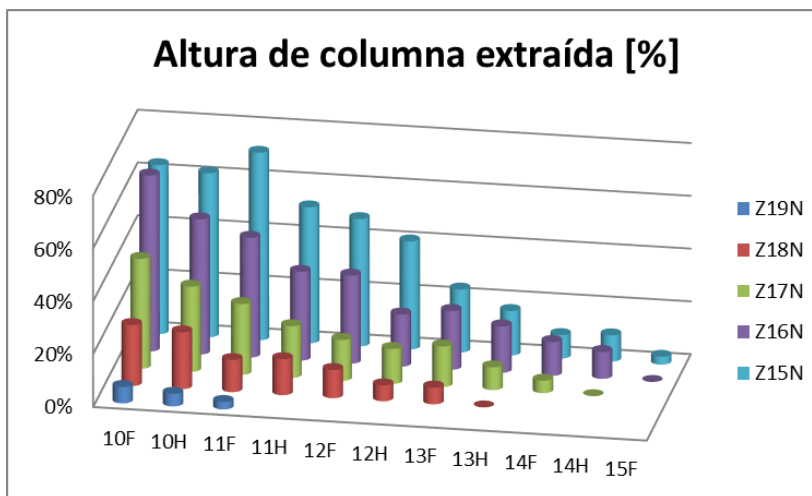


Ilustración 26. Porcentaje de altura de columna extraída, zona de daños.

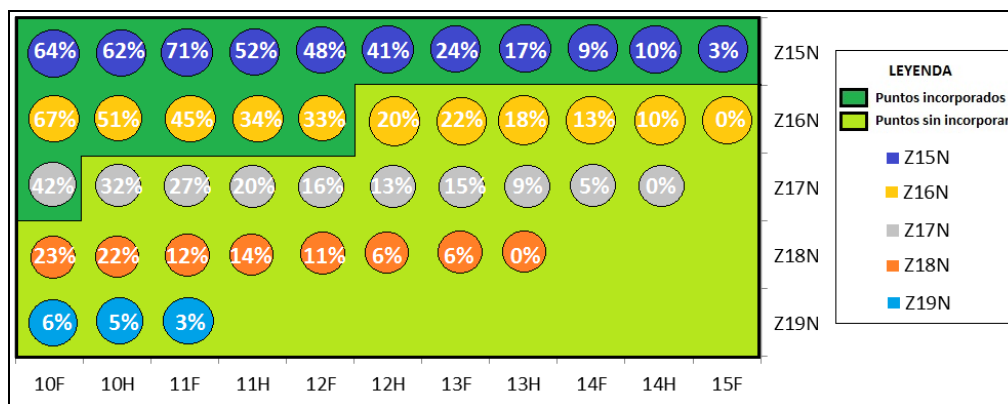


Ilustración 27. Detalle de altura de columna extraída [%] e incorporación de puntos, zona de daños.

4.2. Situación inicial de daños

4.2.1. Sismicidad - inicio de clúster sísmico

En marzo del año 2014 se comenzaron a observar daños severos en las galerías del sector Centro - Fw de la mina Reservas Norte, específicamente entre la C10 y la C15, al sur del XC-6N en el frente de hundimiento.

Este evento genera inestabilidad, por lo que el 14 de marzo del 2014 se evidencia un aumento de la actividad sísmica en este sector, como se aprecia en la Ilustración 28, superando los 550 eventos por día sobre la cota del nivel de hundimiento, mientras que bajo esta cota se alcanzan alrededor de 140 eventos por día.

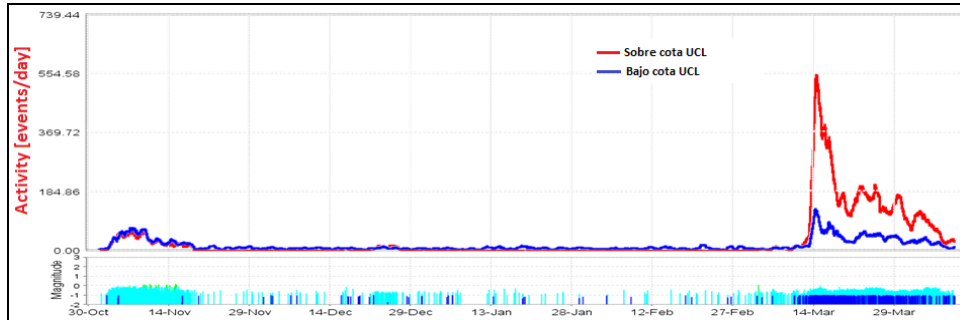


Ilustración 28. Actividad sísmica del sector (inicio clúster sísmico) (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La Ilustración 28 muestra que la anomalía de estos eventos es evidente; sin embargo, para apreciarlo de forma gráfica, en la Ilustración 29 se comparan los eventos ocurridos el 14 de marzo con los del 8 de marzo del año 2014.

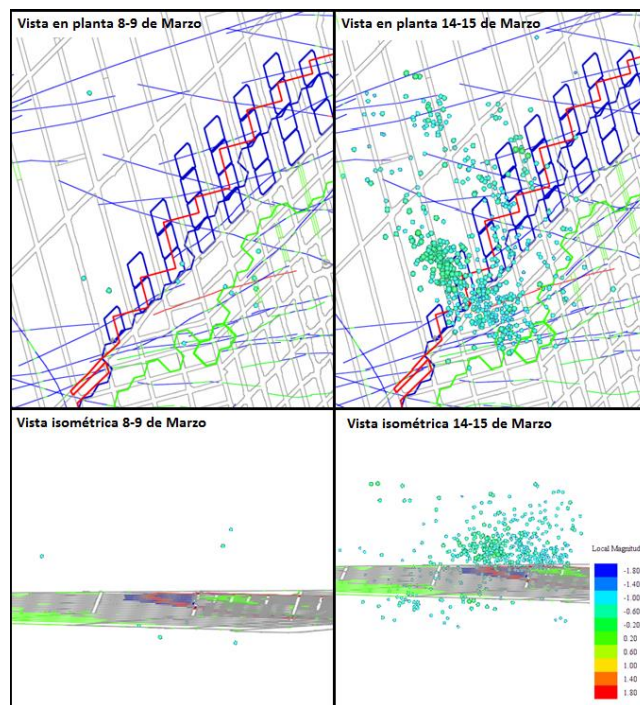


Ilustración 29. Vista en planta e isométrica de eventos sísmicos en el sector Centro - Fw Mina Reservas Norte (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La ubicación del clúster sísmico se puede visualizar en la Ilustración 30, la cual en su parte superior presenta una vista en planta de los eventos ocurridos del 11 al 22 de marzo, mientras que en la parte inferior se ve el detalle en perfil de los cortes A-A' y B-B' especificados en la vista en planta.

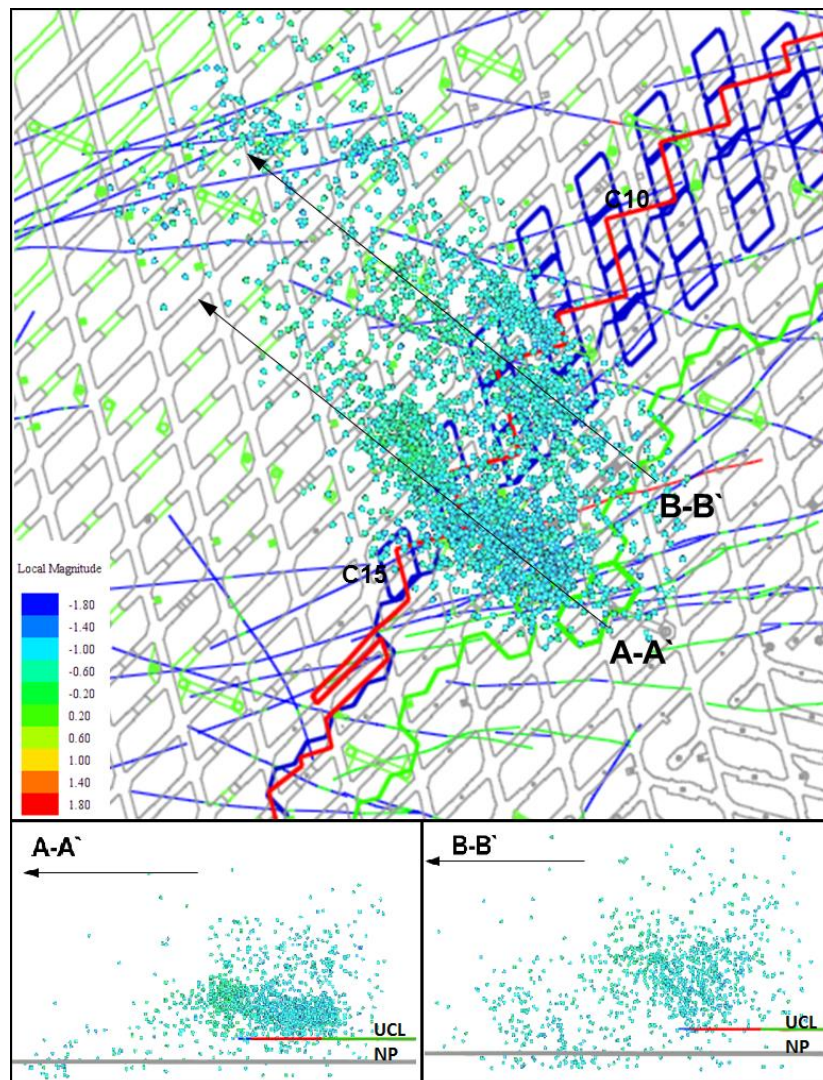


Ilustración 30. Ubicación clúster sísmico (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Se aprecia que sobre la cota del UCL se registra mayor cantidad de eventos sísmicos que bajo esta cota. Además, se puede notar que existe una gran concentración de eventos cercanos a la cota del UCL, sobretodo en el perfil A-A', donde la mayor cantidad de eventos se encuentra entre los 4 y 36 [m] sobre el nivel de hundimiento.

La mayor magnitud registrada es de 0,1 y los eventos sísmicos, según información entregada por el área de geomecánica, en un 92% fueron provocados por un mecanismo de “tracción”, como muestra la Ilustración 31, el cual está asociado principalmente al quiebre del macizo. Este fallamiento requiere de menor energía para su ocurrencia comparado con los mecanismos de corte y compresión.

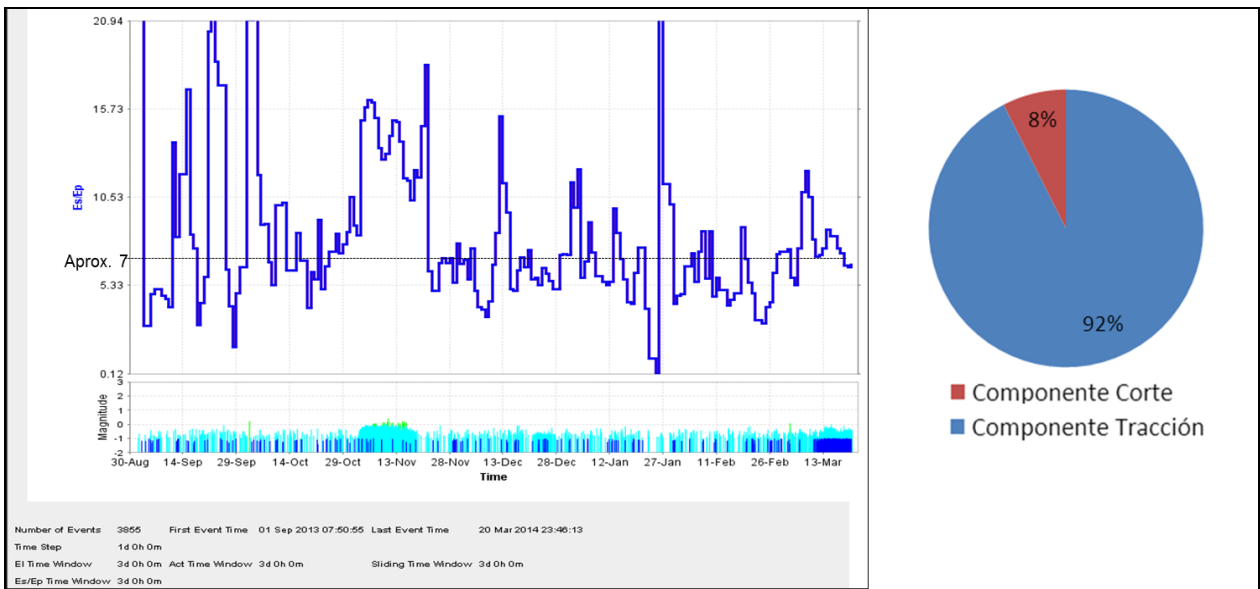


Ilustración 31. Fallamiento Es/Ep (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

4.2.2. Fotografías del sector

Las primeras imágenes registradas de los daños en la zona se tomaron el día 20 de marzo del 2014. Las galerías fotografiadas en el UCL corresponden a la C10 y a la C14, las que se muestran en las Ilustraciones 32 y 33, respectivamente.



Ilustración 32. Daño C10 UCL (Superintendencia Mina Norte (b), 2014)



Ilustración 33. Daño C14 UCL (Superintendencia Mina Norte (b), 2014).

En el nivel de producción el sector afectado corresponde a la galería sobre el punto de vaciado OP-5N; estos daños se muestran en la Ilustración 34.



Ilustración 34. Daño C12OP-5N NP (Superintendencia Mina Norte (b), 2014)

La Ilustración 35 corresponde a una fotografía de los daños en la C11, tomada el día 21 de marzo del 2014.



Ilustración 35. Daño C11 UCL (Superintendencia Mina Norte (b), 2014).

La Ilustración 36 es una fotografía de los daños en la C12.



Ilustración 36. Daño C12 UCL (Superintendencia Mina Norte (b), 2014).

La Ilustración 37 es una fotografía de los daños en la calle 13.



Ilustración 37. Daño C13 UCL (Superintendencia Mina Norte (b), 2014)

4.2.3. Levantamiento de daños según criterios geomecánicos

Luego de la inspección del nivel de hundimiento, se determinó que el estado geomecánico inicial de los daños corresponde al que muestra la ilustración 38, donde se aprecian las calles del UCL que presentan daños y la intensidad de estos. Para comprender la intensidad de los daños, la categorización de estos se entrega a continuación:

- **Daño leve:** Corresponden a daños que no interfieren en el proceso productivo, se identifican los siguientes indicios:
 - Agrietamiento de forma puntual.
 - Lajamiento de shotcrete de forma puntual.
 - Fortificación solicitada de forma puntual.
- **Daño moderado:** Corresponden a daños que pueden progresar en el corto plazo e interrumpir o retrasar con esta progresión al proceso productivo, se identifican los siguientes indicios:
 - Agrietamiento de forma general.
 - Lajamiento de shotcrete de forma general.
 - Presencia de abombamiento en contorno de las galerías.
 - Macizo rocoso expuesto de forma puntual.
- **Daño fuerte:** Corresponden a daños que generan pérdida en la continuidad del proceso productivo, se identifican los siguientes indicios:
 - Fortificación fuera de servicio.
 - Fortificación solicitada en forma general.
 - Compromiso de estabilidad del macizo rocoso.

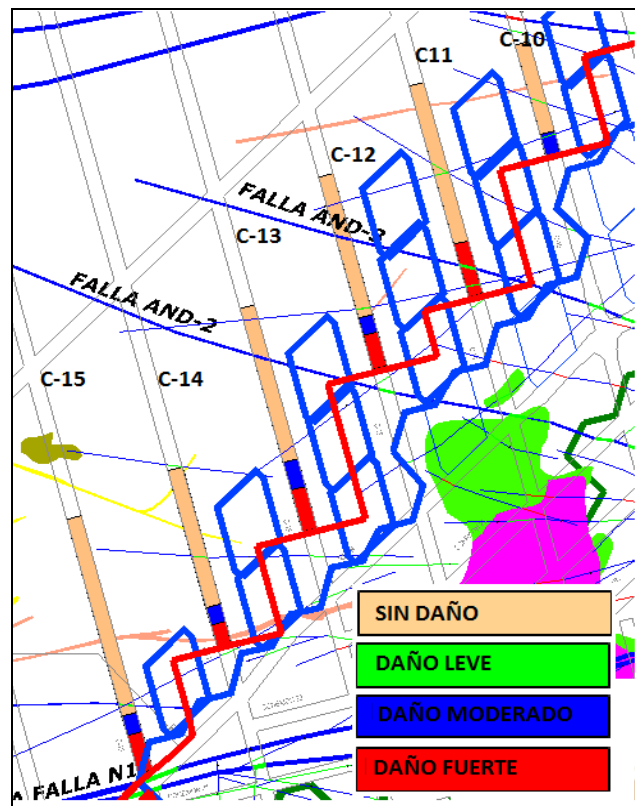


Ilustración 38. Levantamiento de daños geomecánicos UCL (Parraguez et al., 2014).

4.2.4. Cuantificación de daños

La Ilustración 39 presenta una vista en planta de la zona afectada, donde se puede apreciar el área comprometida por los daños que corresponde aproximadamente a **2.690 [m²]** en total.

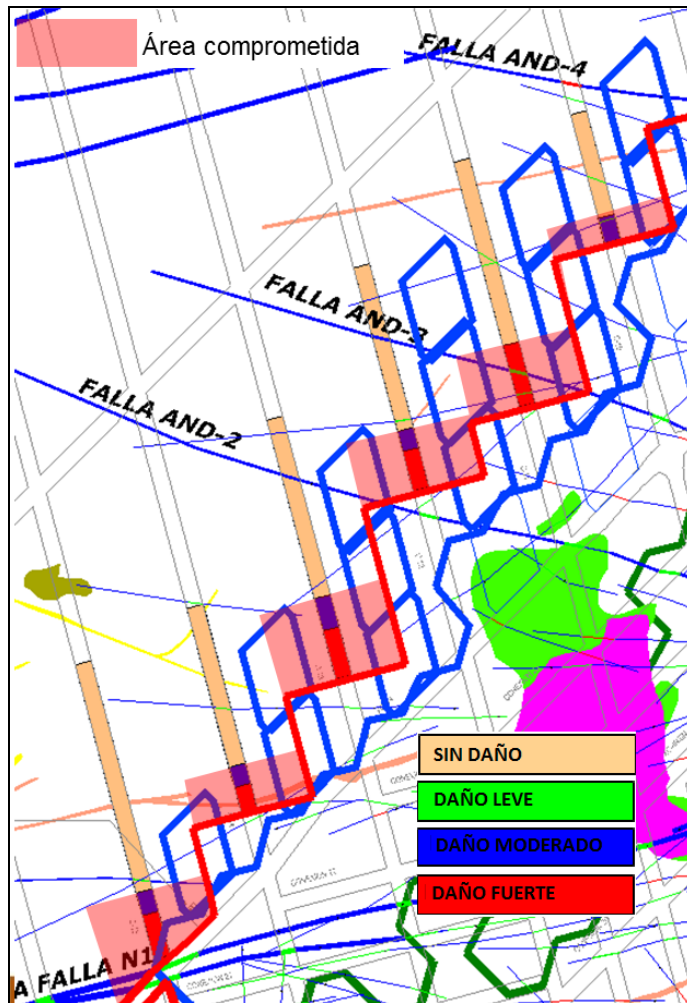


Ilustración 39. Cuantificación de daños y área comprometida (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD), 2014).

La extensión de los daños se ubica entre la C10 y C15 alcanzando entre 5 y 20 [m] por delante del frente de avance. El daño fuerte (indicado en color rojo) alcanza entre 6 y 15 [m] por delante del frente de avance.

4.2.5. Cuantificación de Reservas afectadas

Considerando una altura de columna media en el sector de 200 [m] y, una densidad de roca igual a 2,7 [ton/m³], las reservas afectadas son de 1.452.600 [ton].

Con el tonelaje anterior y considerando los cálculos y supuestos que se entregan en el Anexo B, se tiene que, a modo de motivación, las reservas afectadas tienen un beneficio económico a la fecha (marzo de 2014) de **52.656.023 [US\$]**.

4.2.6. Acciones inmediatas

- Aislar zona de daños

Una vez evaluados los daños se tomó una acción inmediata, lógicamente respondiendo a la seguridad de las personas, debido a los riesgos inminentes por el aumento de la actividad sísmica del sector y por los daños geomecánicos provocados. De esta manera se procedió a aislar la zona de daños desde el XC-6N hacia el Sur, como se aprecia en la Ilustración 40.

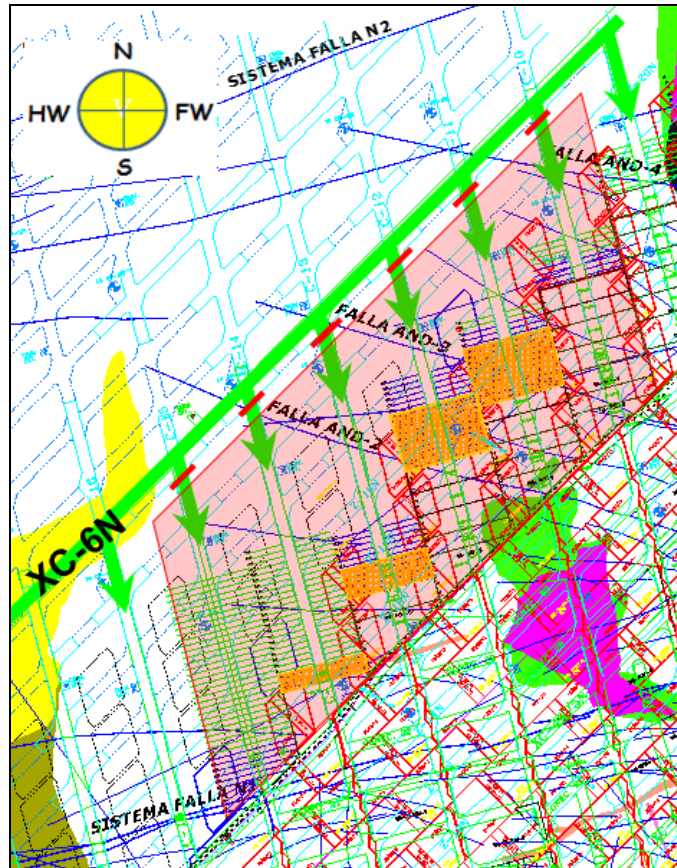


Ilustración 40. Aislación sector afectado (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

- Generar grupo de trabajo y definir objetivos

Luego, se debe designó un líder con un grupo de trabajo que tenga las competencias necesarias para lograr los objetivos que requiere la situación. Estos objetivos se detallan a continuación:

- Asegurar la continuidad operacional del sector, evitando la evolución del daño en el “crown pillar” (nivel de producción) y limitando la extensión de daño en el nivel de hundimiento.
- Elaborar un diseño que permita regularizar las condiciones del sector, de manera de retomar a la brevedad la variante de hundimiento definida, asegurando el corte basal.

4.2.7. Evolución de los daños

En las Ilustraciones 41 y 42 se muestran fotografías de las calles 14 y 10 respectivamente, para visualizar la evolución y condición de las calles en el UCL. Para esto fue necesario fotografiar en tres fechas distintas que se detallan en la parte inferior de cada imagen.



Ilustración 41. Evolución de los daños geomecánicos en C14 UCL (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).



Ilustración 42. Evolución de los daños geomecánicos en C10 UCL (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).

La evolución de las calles 11, 12 y 13 se presenta en las Ilustraciones 43, 44 y 45 respectivamente.



Ilustración 43. Evolución de los daños geomecánicos en C11 UCL (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).



Ilustración 44. Evolución de los daños geomecánicos en C12 UCL (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).



Ilustración 45. Evolución de los daños geomecánicos en C13 UCL (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).

Paralelo a la toma de fotografías se realizó un levantamiento de daños según criterios geomecánicos para evidenciar la evolución de los daños. La Ilustración 46 presenta este levantamiento con sus respectivas fechas.

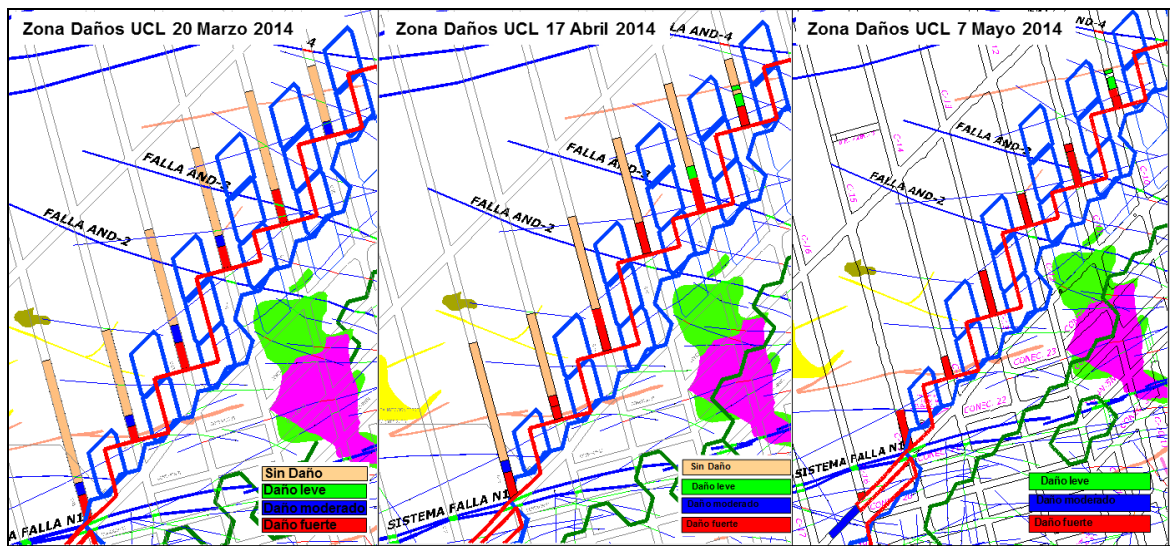


Ilustración 46. Evolución de daños, levantamiento según criterios geomecánicos (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Del 20 de marzo al 17 de abril se aprecia un incremento en intensidad de daños en C10, C12, C13 y C14. Además se visualiza manifestación de daños leves en C10 y C11.

Por otro lado, del 17 de abril al 7 de Mayo, se aprecia un incremento en la intensidad de los daños en C11 y C16. Además se observa manifestación de daños en C16.

También se hizo un registro fotográfico de la zona afectada en el nivel de producción para apreciar la evolución de estos daños. En este caso se realizaron fotografías en cuatro fechas distintas, esto se visualiza en la Ilustración 47.

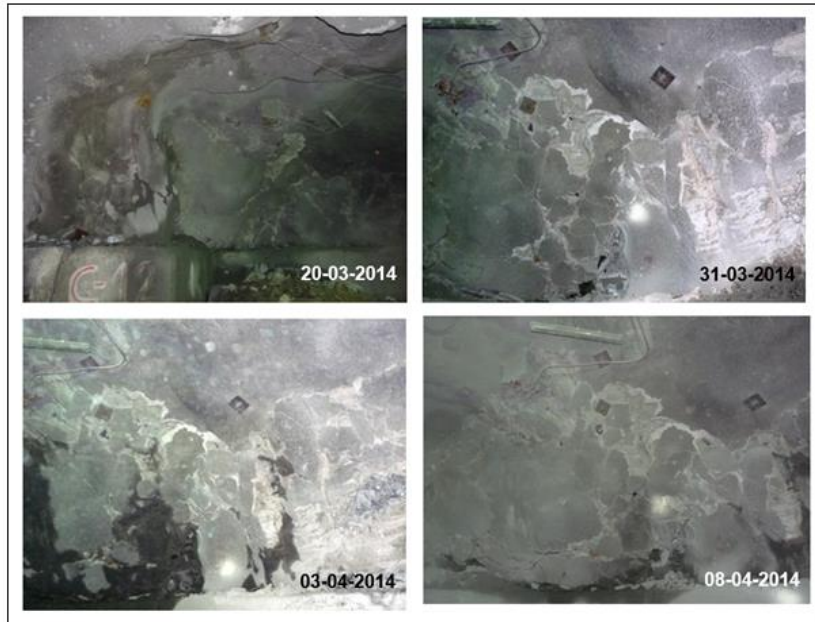


Ilustración 47. Evolución daños geomecánicos C12 OP-5N NP (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).

4.2.8. Evolución actividad sísmica - fin de clúster sísmico

La Ilustración 48 presenta la evolución de la actividad sísmica en el sector, donde se aprecia que la cantidad de eventos sísmicos por día va disminuyendo paulatinamente después del 14 de marzo, llegando en el mes de abril a valores que se asemejan al estado sísmico habitual del sector.

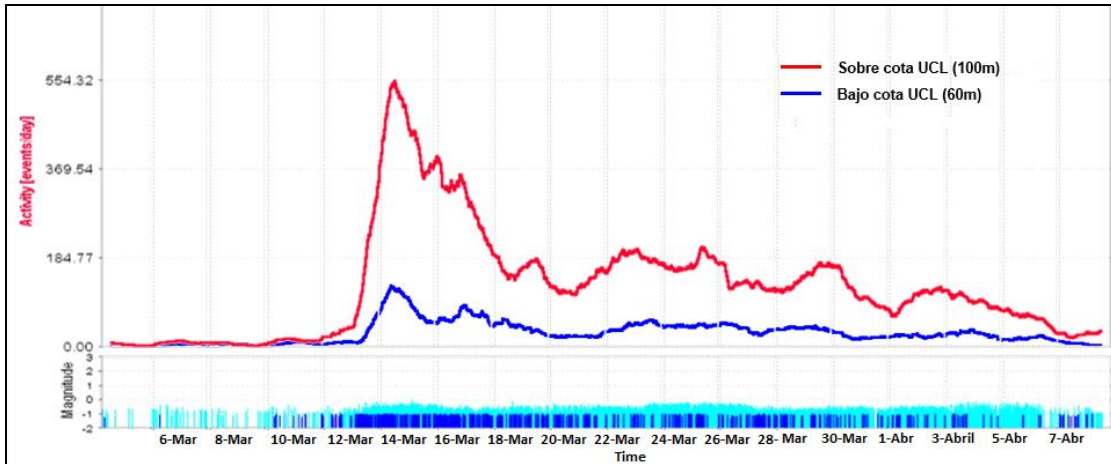


Ilustración 48. Evolución actividad sísmica del sector Centro-Fw (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La Ilustración 49 presenta una vista en planta de la cantidad de eventos sísmicos en 3 fechas detalladas en la parte superior de cada imagen, para apreciar la evolución del clúster sísmico. Se pudo concluir que el clúster sísmico tuvo una duración cercana a 3 semanas, llegando a su estabilización aproximadamente el 7 de abril.

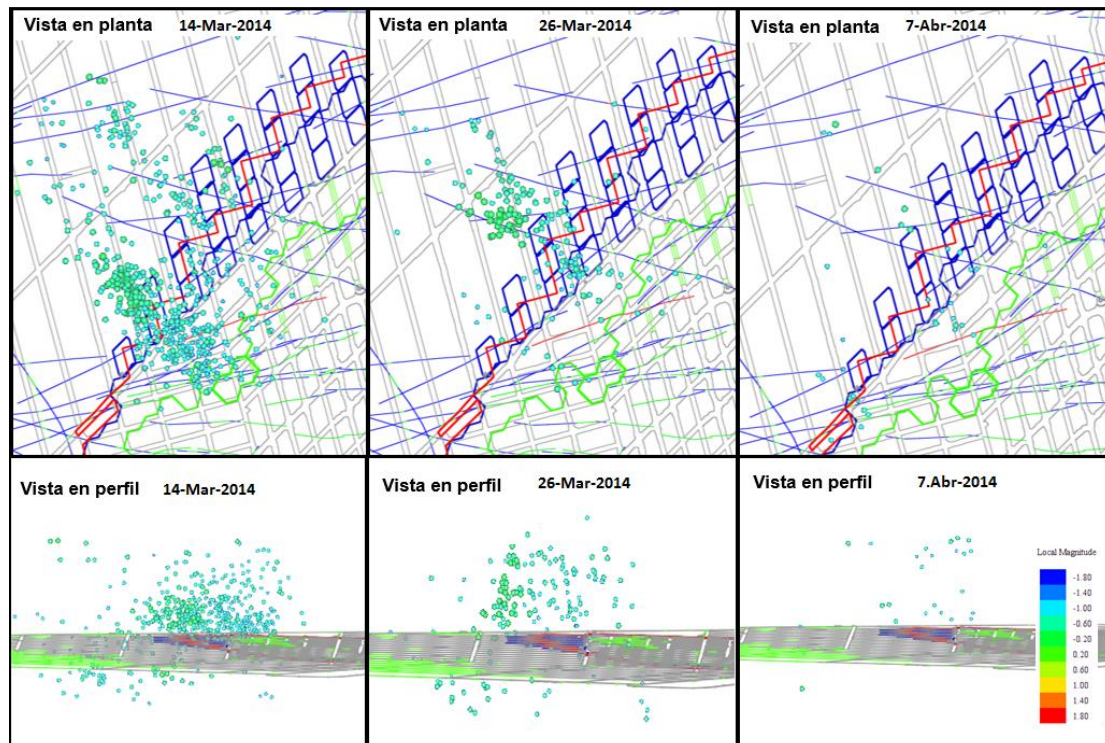


Ilustración 49. Evolución eventos sísmicos, vista en planta y vista en perfil (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

4.3. Estudio y control de la situación

4.3.1. Definición de criterios de éxito

Los criterios de éxito del trabajo se definen principalmente desde dos puntos de vista, operacional y geomecánico.

Los criterios de éxito operacionales son el estado de las bateas con tiraje desde un punto de vista geométrico, y también la granulometría en los puntos de extracción.

Según geomecánica los criterios de éxito responden a que no exista aumento en los daños de las galerías, ni tampoco se reactive el clúster sísmico en la zona.

4.3.2. Levantamiento de información

- Auscultación de perforaciones UCL

La auscultación de perforaciones permite identificar la existencia de daños en el macizo rocoso. Esta se realizó con una cámara “bore hole” en la cual se aprecia el avance real de cada perforación, así como también daños o desplazamientos en las perforaciones. Para observar los daños por sobre las galerías del UCL se realizaron tres perforaciones de levante orientadas hacia la zona de daños con una inclinación de 65°. Sumado a lo anterior, para apreciar daños en los pilares se hicieron perforaciones horizontales desde la gradiente de las galerías hacia el cabeza y el patilla, realizándose cuatro paradas por caja distanciadas por 2 [m] entre sí.

Las perforaciones mencionadas se realizaron desde la C10 a la C14 y en la Ilustración 50 se presenta una vista en planta del levantamiento de tales auscultaciones. Dada la inclinación de las perforaciones de levante se muestra su proyección en un plano horizontal.

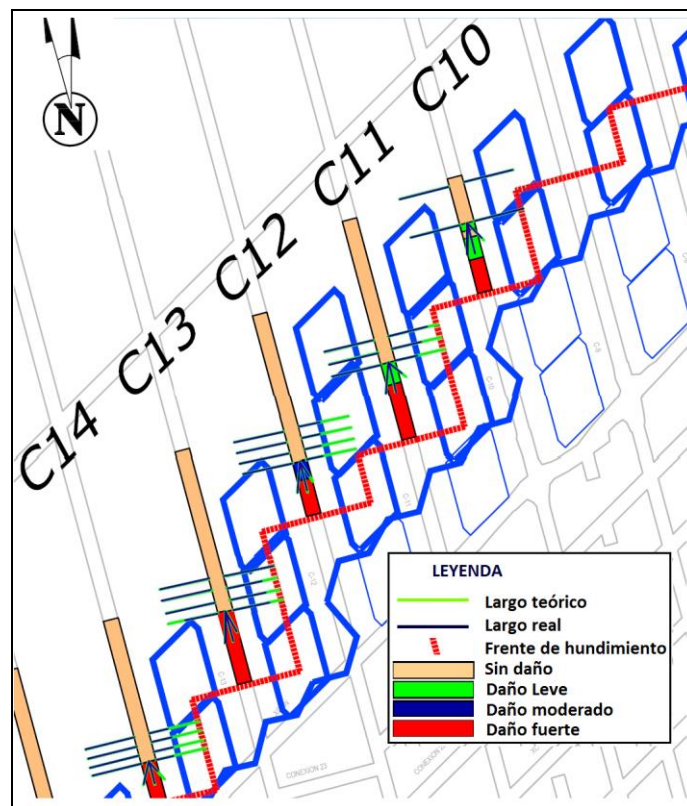


Ilustración 50. Auscultación de perforaciones UCL.

En la Ilustración anterior se aprecia que las calles 12 y 14 son las que evidencian más perforaciones dañadas y estos daños se orientan hacia el Fw de cada calle. Por lo general no se visualizan daños hacia el lado Hw. La C10 corresponde a la calle que menos perforaciones rotas presenta.

El largo teórico de las perforaciones hacia cabeza y el patilla corresponde a 15 [m].

Con excepción de las paradas realizadas hacia el patilla en la C12, todas las demás calles dirigen estas paradas hacia una zona ya socavada. Es importante notar que el hundimiento se encuentra hacia el sur y patilla de cada calle. De lo anterior se puede inferir, que los daños provienen de las zonas hundidas.

A modo de ejemplo se revisó en detalle algunas de las auscultaciones realizadas. En primer lugar, se visualiza la perforación de levante orientada hacia el Fw, la cual posee un avance teórico de 15 [m]. Sin embargo la cámara bore hole evidenció un avance real de sólo 11 [m], esto se puede ver en la Ilustración 51.

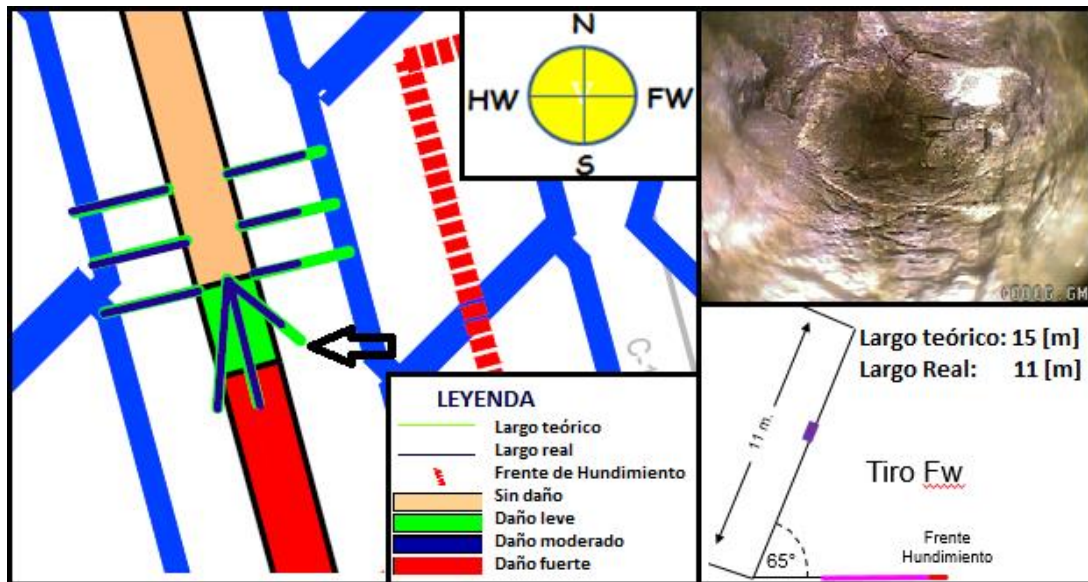


Ilustración 51. Auscultación perforación de levante Fw, C11.

En segundo lugar se aprecia la perforación de levante realizada hacia el centro de la C12. El detalle de esta auscultación se entrega en la Ilustración 52.

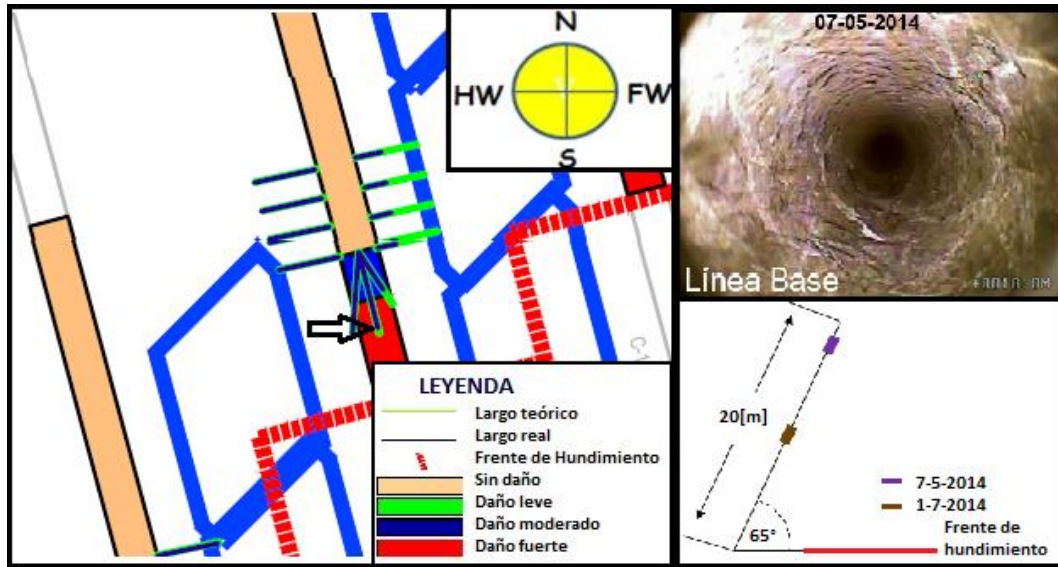


Ilustración 52. Auscultación perforación de levante centro, C12.

En la auscultación de la C12 se realizó un seguimiento, con una primera lectura el 7 de mayo del 2014 y otra el día 1 de julio del mismo año. El largo real de la perforación disminuyó de 20[m] a poco más de 10 [m]. La Ilustración 53 muestra una fotografía de la segunda lectura, donde se aprecia el rompimiento de la perforación.



Ilustración 53. Seguimiento auscultación perforación de levante centro, C12 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La auscultación de la perforación de levante hacia el centro de la C13, se visualiza en la Ilustración 54.

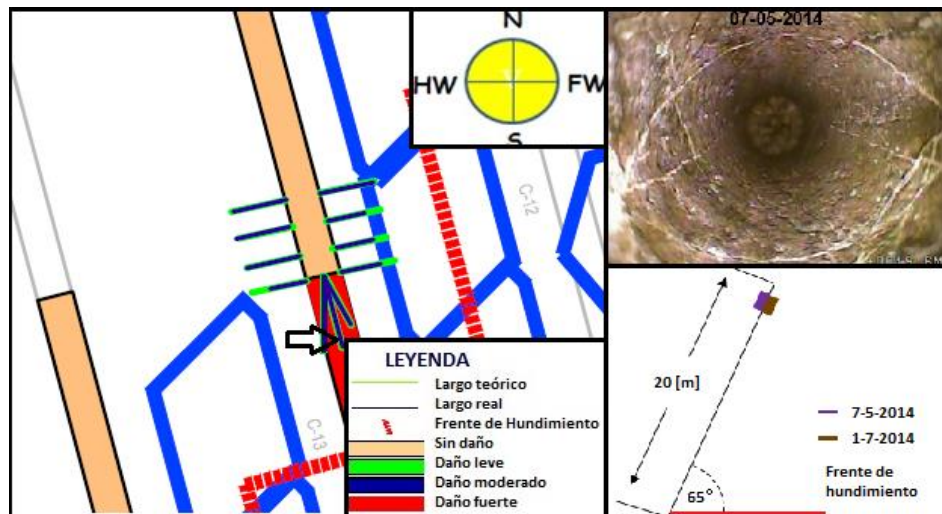


Ilustración 54. Auscultación perforación de levante centro, C13 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Al igual que para la C12 se realizó un seguimiento el día 1 de julio, donde la auscultación indicó que no hubo variación en la longitud real de la perforación. La fotografía de la cámara bore hole, para esta perforación en la fecha del seguimiento, se visualiza en la Ilustración 55.



Ilustración 55. Seguimiento auscultación perforación de levante centro, C13 (1-7-2014).

- Topografía

Para mayor claridad del estado de las calles del UCL y su deformación, se realizó un levantamiento topográfico de cada una de estas. La Ilustración 56 entrega el levantamiento topográfico de las calles 11 a la 15 (de izquierda a derecha), mostrando en la parte superior una vista en planta del sector con daños, mientras que en la parte inferior se muestra una vista transversal de la respectiva parada. Cada vista en planta posee un largo longitudinal sobre la calle de 36 [m].

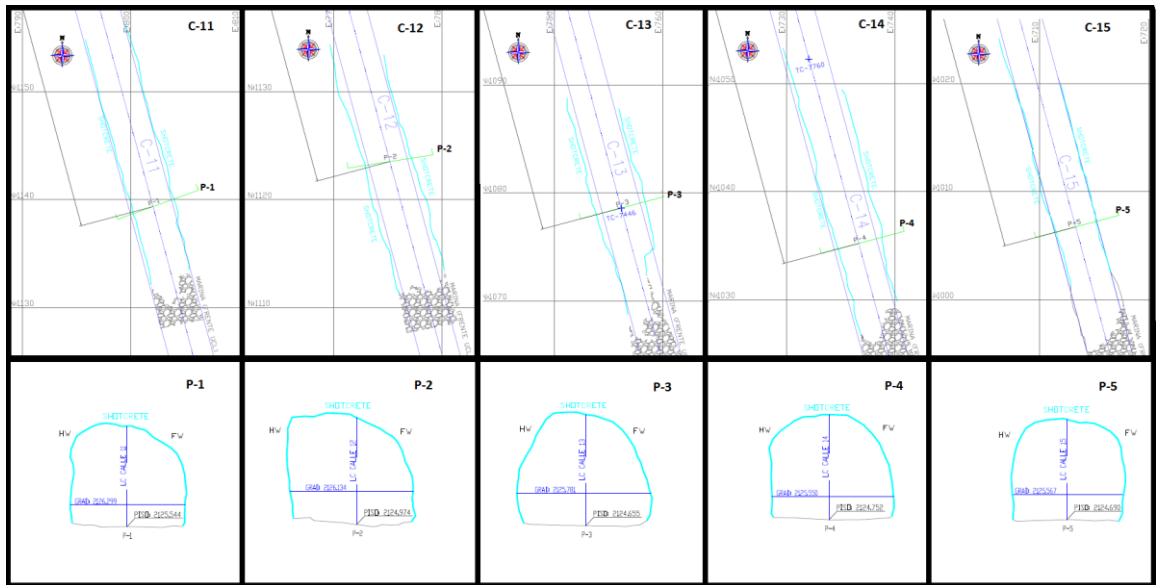


Ilustración 56. Levantamiento topográfico calles 11 a 15, UCL. (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Como se mencionó anteriormente, en el nivel de producción no se registraron daños importantes; sin embargo, para tener mayor claridad se realizó el levantamiento de las calles 13 y 14, las cuales se presentan en las Ilustraciones 57 y 58 respectivamente.

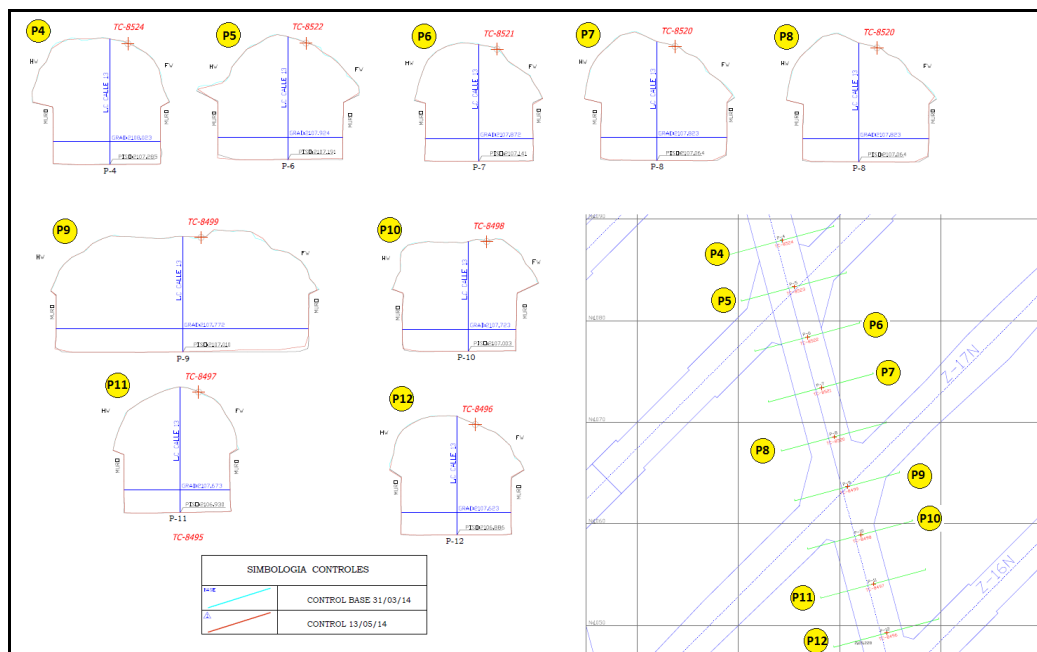


Ilustración 57. Levantamiento topográfico C13 NP (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

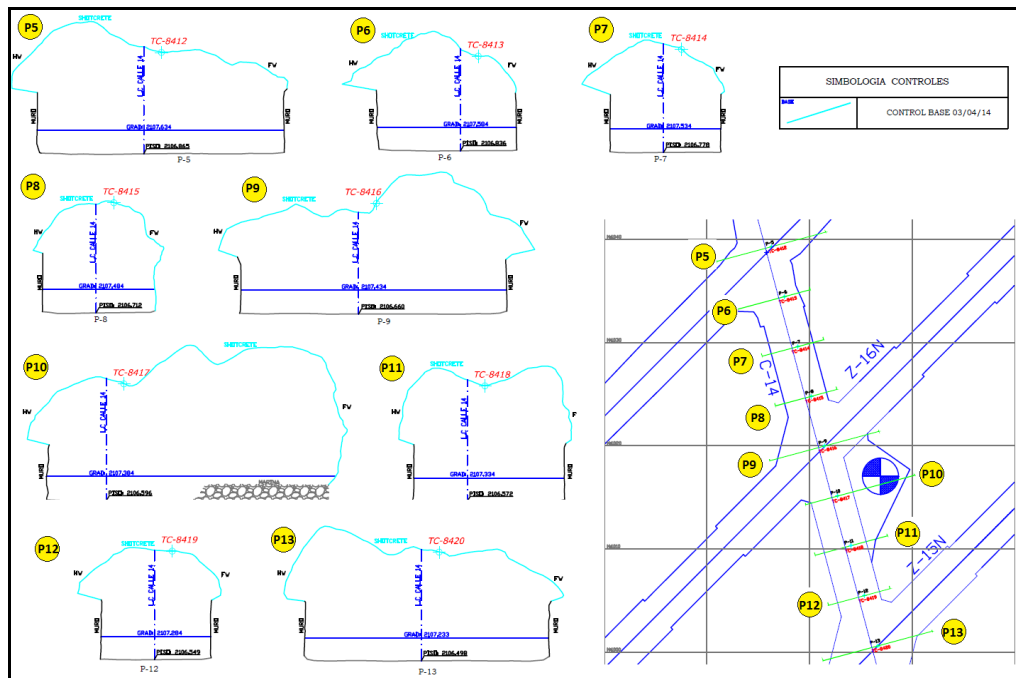


Ilustración 58. Levantamiento topográfico C14 NP (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

En la C13 se presenta la línea base y un registro realizado 40 días después, donde no se observa variación en la deformación del contorno de la calle. Por su parte, en la C14, no fue necesario realizar seguimiento, ya que a simple vista no se apreciaban mayores deformaciones.

Otro sector afectado y de mayor vulnerabilidad, como se mencionó anteriormente, corresponde a la C12, entre la Z17N y la Z18N en el nivel de producción, lugar donde se ubica el punto de vaciado OP-5N. Para clarificar la ubicación de este punto de vaciado se incluye la Ilustración 59.

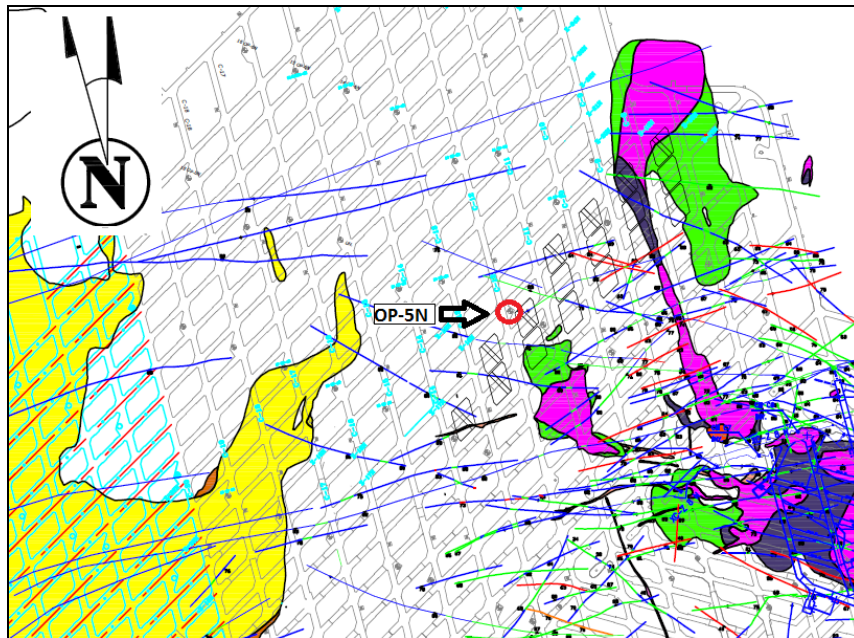


Ilustración 59. Vista en planta sector de daños, ubicación OP-5N.

La Ilustración 60 muestra el levantamiento topográfico de dicho sector con 3 perfiles transversales. Se realizó un control base y un seguimiento 3 meses después.

Se puede notar la línea color magenta que indica el control base del día 27 de marzo de 2014 y la roja que hace referencia al control del 30 de junio del mismo año. Se puede observar que en la parada 10 (punto 2) se evidencia un leve deterioro hacia el lado patilla, sin embargo esto no generaría mayores complicaciones.

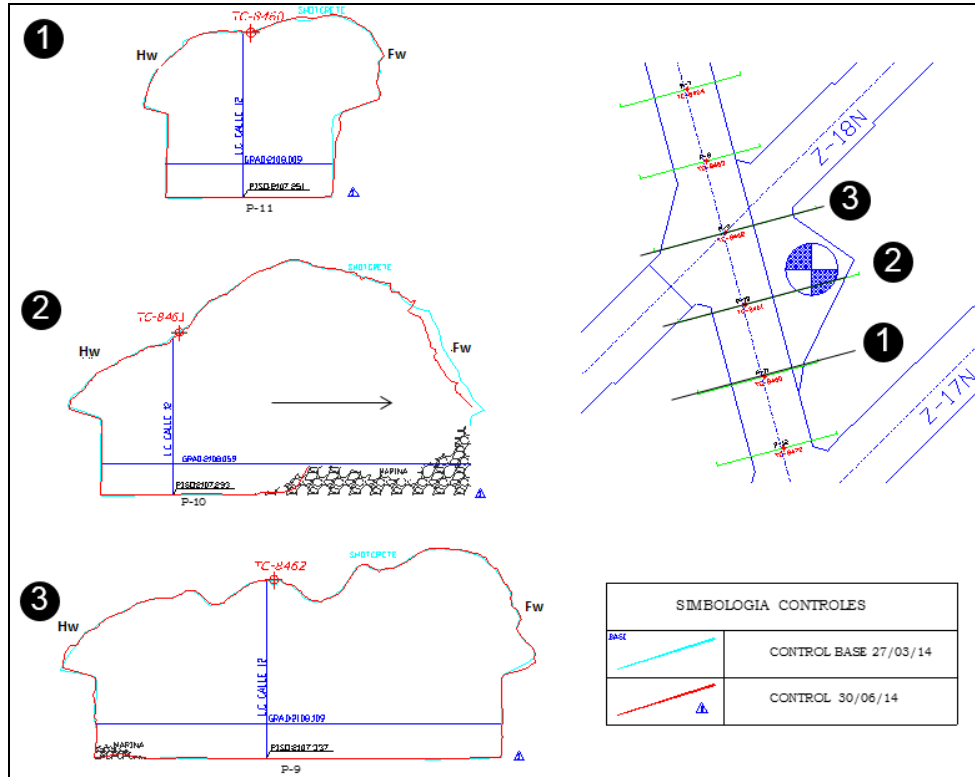


Ilustración 60. Levantamiento topográfico nivel de producción OP-5N, C12 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

- Mapeo geológico de “agua y estructural”

Las rocas con mineralización primaria de la mina El Teniente se caracterizan por ser competentes, masivas, con baja porosidad y permeabilidad prácticamente nula, en comparación a las rocas de la zona secundaria. Así, la presencia de agua en el macizo rocoso primario se asocia a una degradación o pérdida de la calidad geotécnica original.

La evolución de la condición de aguas en la zona de daños se presenta en la Ilustración 61, la cual incluye mapeos realizados desde febrero del 2013 hasta marzo del 2014. Principalmente se aprecia la presencia de agua en torno a zonas hundidas, relacionada con un deterioro y permeabilidad generada a través del proceso minero, además de las perforaciones radiales allí dispuestas. En lo referente a la zona de daños en marzo del 2014, se aprecia un aumento del flujo de agua de la C8 a la C11.

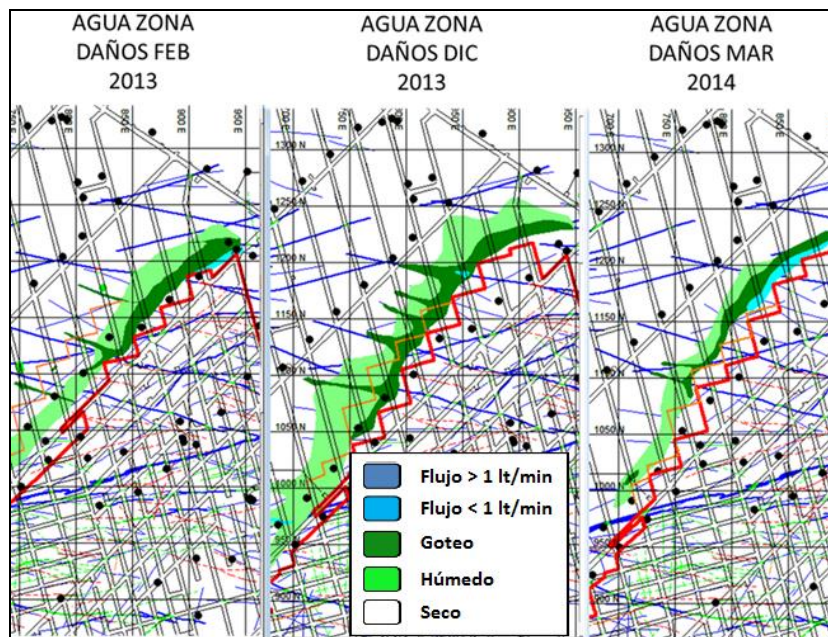


Ilustración 61. Evolución condición de agua en zona de daños (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, 2014)

Así, dado los sucesos ocurridos en marzo del 2014, se realizó un nuevo mapeo en abril que se presenta en la Ilustración 62, con el detalle de los flujos de agua existentes, además de las estructuras que puedan influir sobre estos flujos.

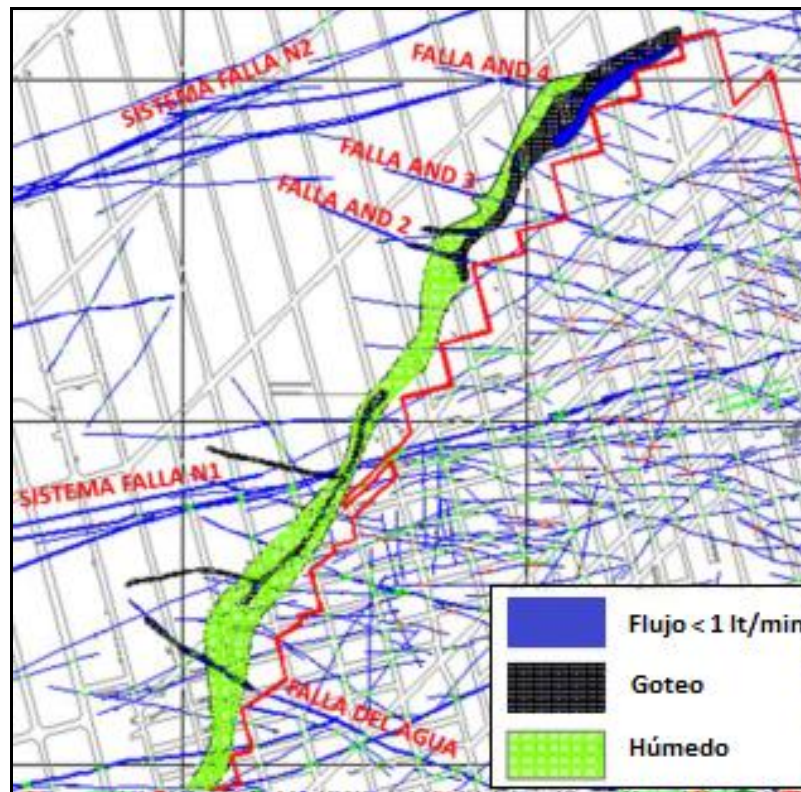


Ilustración 62. Condición de aguas zona de daños. (Gerencia de recursos mineros y desarrollo (GRMD), 2014)

Se concluye que la presencia de humedad proviene de estructuras como la Falla N1, Falla And-2 y Falla del Agua.

Además de lo anterior, las perforaciones radiales, dispuestas según la secuencia de la explotación, sirven como ductos de conducción, pero el lavado y precipitados permiten deducir que el agua no es solamente debida a estas perforaciones, sino que también a un deterioro en el macizo producto del proceso minero, específicamente del fracturamiento hidráulico.

5 SOLUCIÓN

5.1 Planificación de la extracción

La planificación de la extracción en este caso en particular tiene como objetivo incrementar la altura de columna extraída en los puntos de extracción con la finalidad de generar interacción entre puntos contiguos, para así evitar que se formen pilares remanentes que puedan transmitir cargas puntuales sobre las calles. Esta extracción hace posible el quiebre de la roca sobre la batea y el posterior hundimiento de la zona a perforar desde el nivel de producción (diseño de la solución P&T).

Como punto de partida se entrega la Ilustración 63, donde se aprecia el estado de las bateas en la vista en planta superior, mientras que en la parte inferior se aprecian vistas en perfil de las zanjas afectadas.

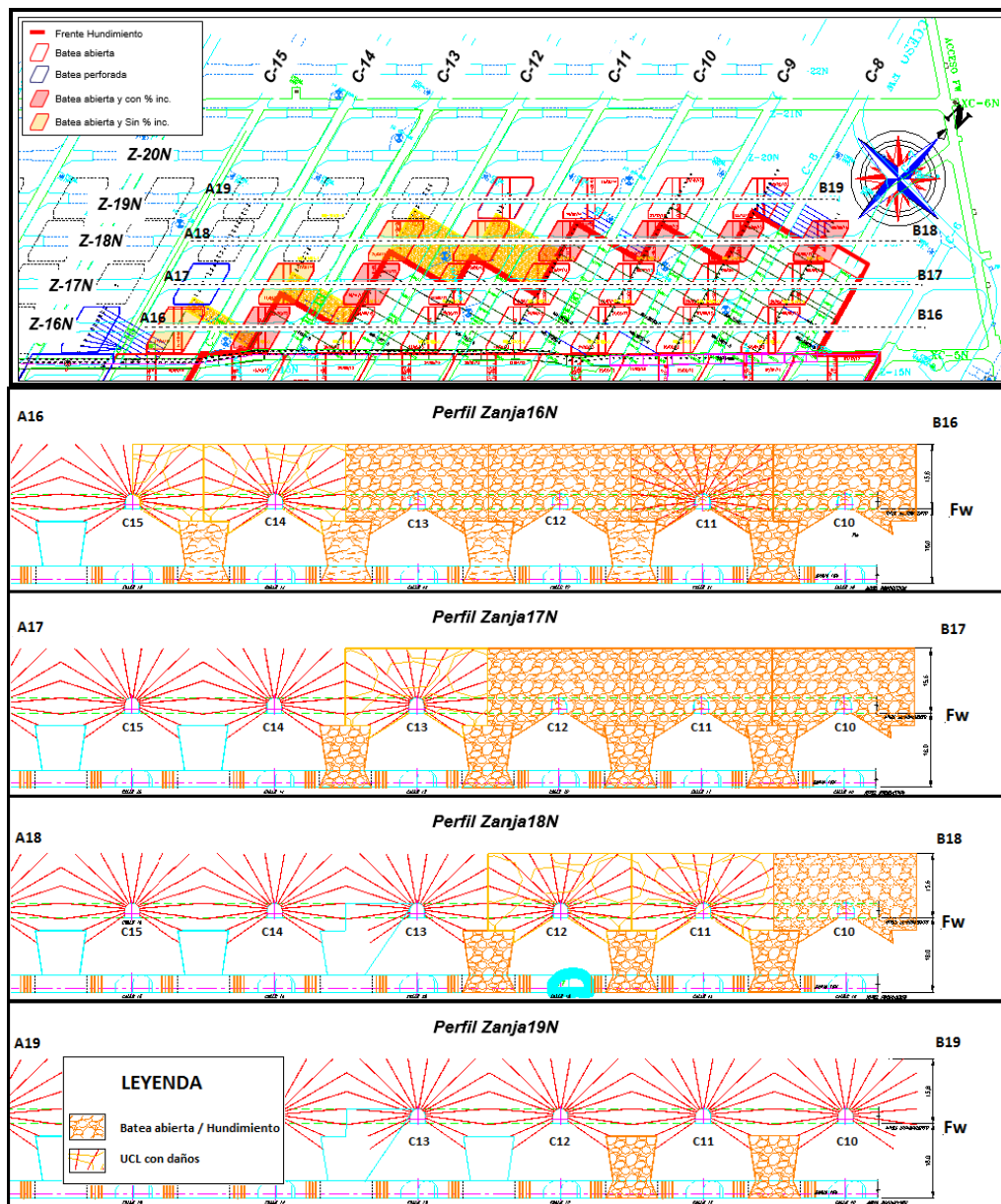


Ilustración 63. Vista en planta y perfil de zanja 16N a zanja 19N (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

En esta ilustración se puede apreciar que en las calles afectadas las bateas correspondientes se presentan abiertas hacia ambos costados (cabeza “Hw” y patilla “Fw”), lo que posibilita la extracción de material quebrado para lograr los objetivos planteados. Lo anterior se hace posible por la secuencia de la variante de explotación (hundimiento convencional), donde las bateas se encuentran abiertas antes de socavar.

La excepción a lo mencionado corresponde a los daños de la calle 15 del UCL en la Z16N que sólo cuenta con la batea del lado patilla abierta. La Ilustración 64 muestra un zoom de lo mencionado.

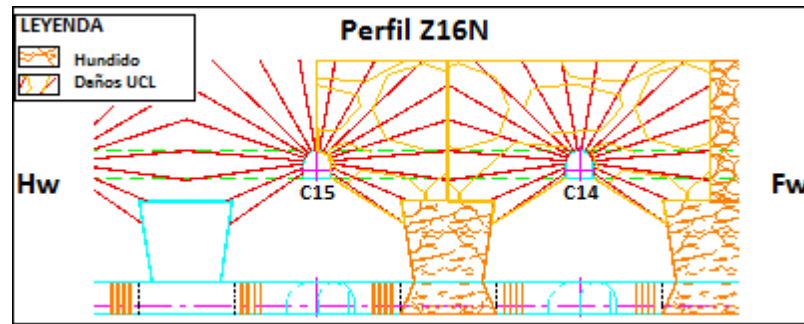


Ilustración 64. Daños C15 UCL, perfil Z16N (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Para una mejor comprensión de la secuencia de extracción se incluye la Ilustración 65, la cual muestra gráficamente un esquema progresivo de esta. Se utiliza como ejemplo una vista en perfil de la Z18N. En el último cuadro de la secuencia se aprecia el estado final esperado y el enlace con el diseño de solución de perforación y tronadura que se detallará en el siguiente punto.

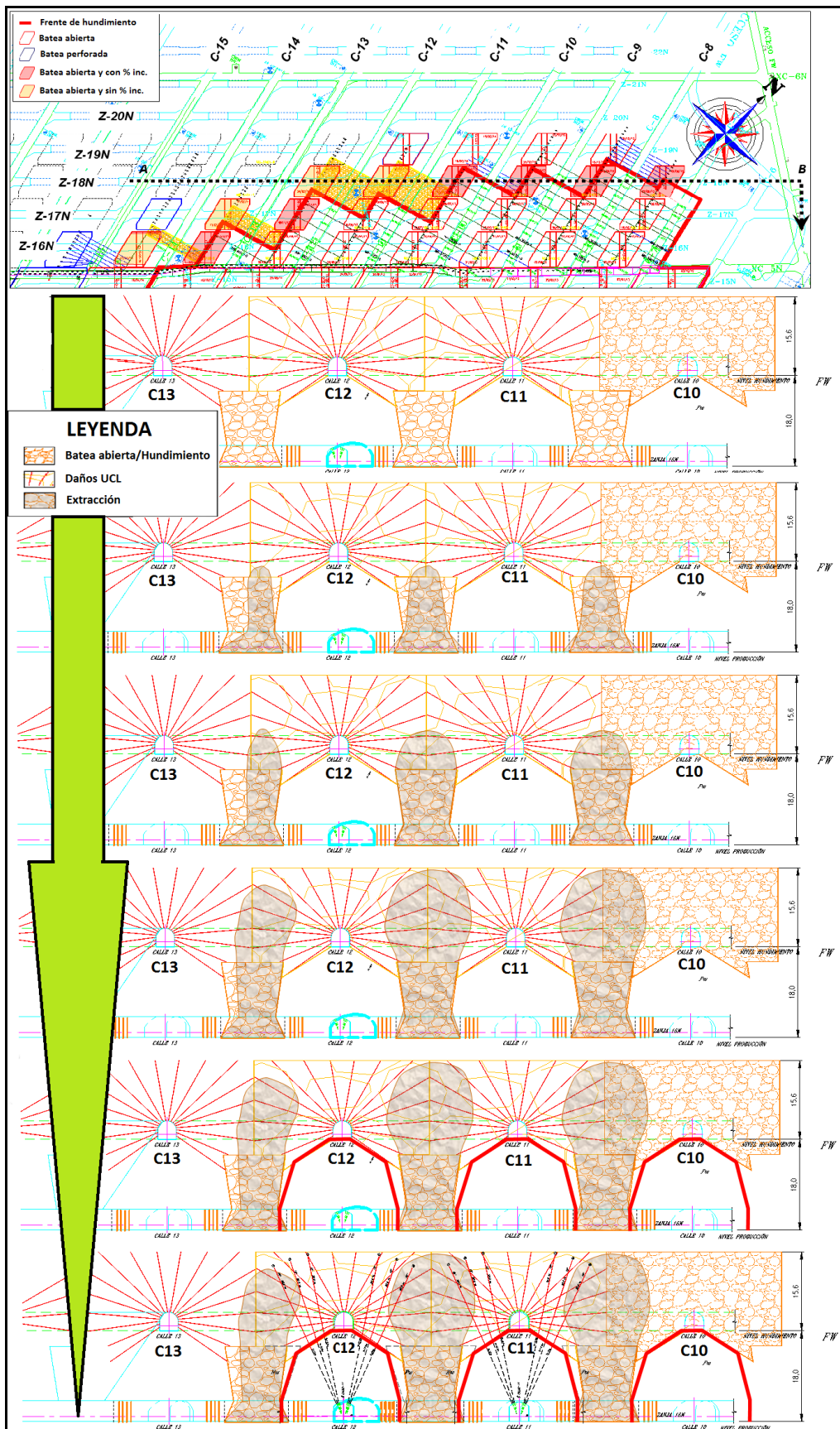


Ilustración 65. Esquema secuencia de extracción, vista en perfil Z18N (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Como dato base para realizar la planificación de la extracción se debe conocer la altura de columna para cada uno de los puntos de extracción pertenecientes a la zona de daños. Para ello se presenta la Ilustración 66, con fecha 19 de marzo del 2014, donde se pueden percibir además los puntos incorporados a la fecha.

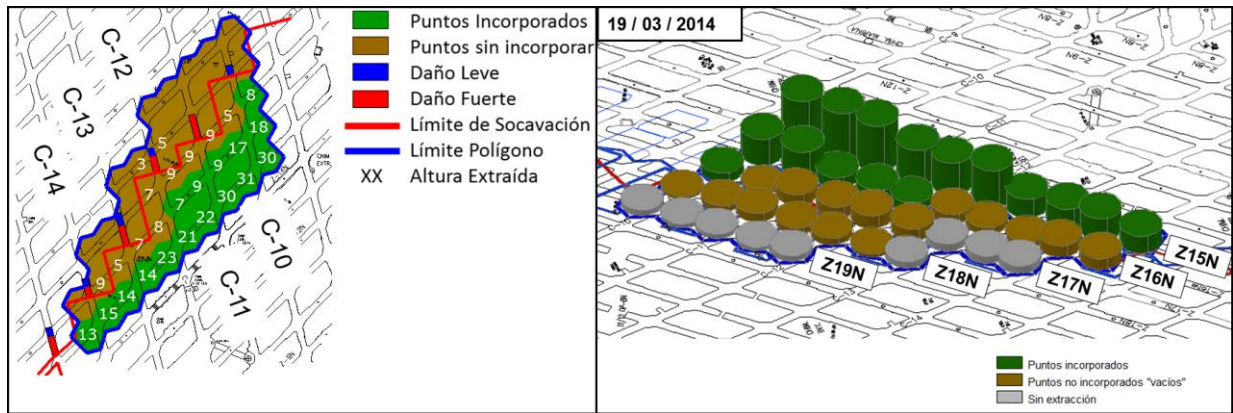


Ilustración 66. Vista en planta (izquierda) y vista isométrica (derecha) del estado de los puntos de extracción inicial (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La altura de columna extraída que se visualiza para los puntos de extracción no incorporados es la correspondiente al esponjamiento extraído, ya sea de la tronadura de la batea o de las paradas radiales. Además se nota que la Z19N no ha tenido extracción.

La altura extraída por punto es determinante para la planificación de la extracción, dado que se debe controlar la cavidad generada por el hundimiento. Las cavidades subterráneas no soportadas presentan un riesgo elevado de desplomes repentinos, que pueden originar graves efectos a posteriori en el proceso de explotación y, en este caso, conllevaría a la progresión de los daños.

La extracción se debe iniciar apenas la actividad sísmica lo permita, ya que una vez que se avanza con ella, se puede enlazar con la solución de diseño de perforación y tronadura. En el caso analizado la extracción se inició el 19 de marzo comenzando en los puntos no incorporados, con una velocidad de extracción de $0,28 \text{ [tpd/m}^2\text{]}$.

La Ilustración 67 muestra el polígono donde se procedió con la extracción, y en color café se aprecian los puntos sin incorporar.

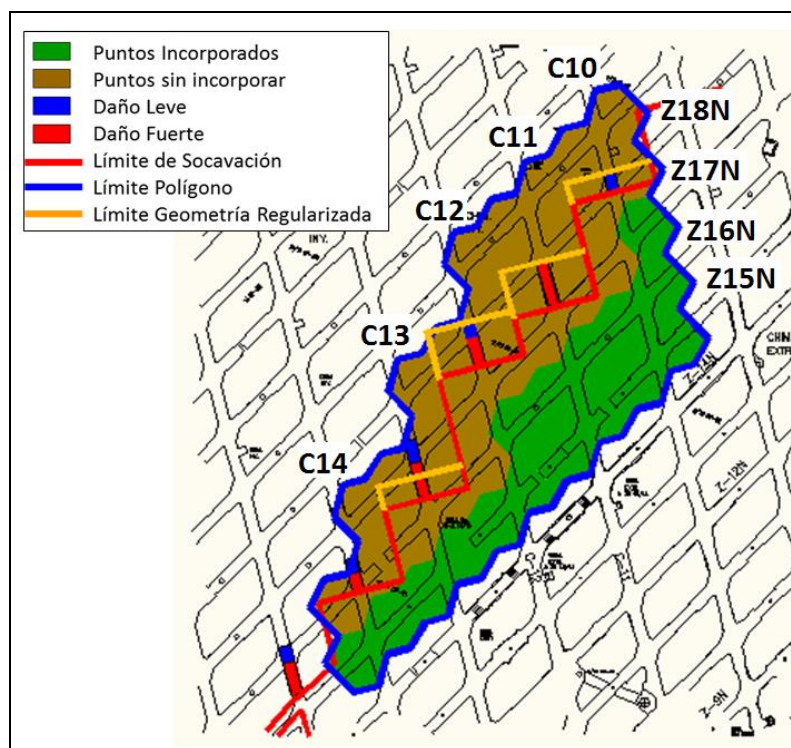


Ilustración 67. Planificación de extracción 19 de marzo (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Para lograr los objetivos de esta extracción es esencial la realización de un control permanente de los resultados, para lo cual se debe proceder como sigue:

- Realizar controles semanales del estado de los puntos de extracción.
- Identificar en estos controles que el quiebre de la roca se genera de manera efectiva. Esto se verifica identificando testigos del hundimiento, los cuales principalmente corresponden a rocas con volumen alrededor de 1 [m³], con geometrías angulares y sobretodo rocas que presenten perforaciones correspondientes a los tiros radiales del UCL (testigos).
- Verificar en estos controles que no se evidencien puntos vacíos (zanjas que se encuentran sin mineral) producto de una interrupción del quiebre y/o hundimiento, ni puntos colgados.
- Si lo anterior se cumple se puede aumentar la velocidad de extracción en los puntos que lo requieran, de manera de evitar desviaciones en los perfiles de extracción y también nuevas manifestaciones de daños en el nivel de producción. Esto va de la mano con evitar diferencias de alturas en puntos contiguos.

5.2 Diagramas de perforación

El objetivo de la perforación y tronadura es lograr reiniciar/recuperar el frente de hundimiento y a la vez regularizar la geometría del Crown pillar, en particular el sector comprendido entre la calle del UCL y los bordes de la batea. Para esto es necesario perforar hacia el UCL desde el nivel de producción, de modo de hundir la zona dañada que no ha sido posible socavar desde el UCL. Luego se debe perforar desde el mismo nivel de hundimiento, por detrás de la zona de daños, para recuperar altura de socavación y de esta manera retomar el proceso de explotación normal. Además se deben realizar perforaciones descendentes cuyo objetivo es interceptar posibles remanentes de losa.

5.2.1 Perforación desde el nivel de producción

La primera actividad corresponde a la perforación a realizar desde el nivel de producción. Esta tiene dos objetivos: regularizar la geometría del crown pillar e inducir la socavación desde este nivel. La Ilustración 68 muestra el diagrama de perforación estándar en una vista en perfil y en la Ilustración 69 en una vista en planta.

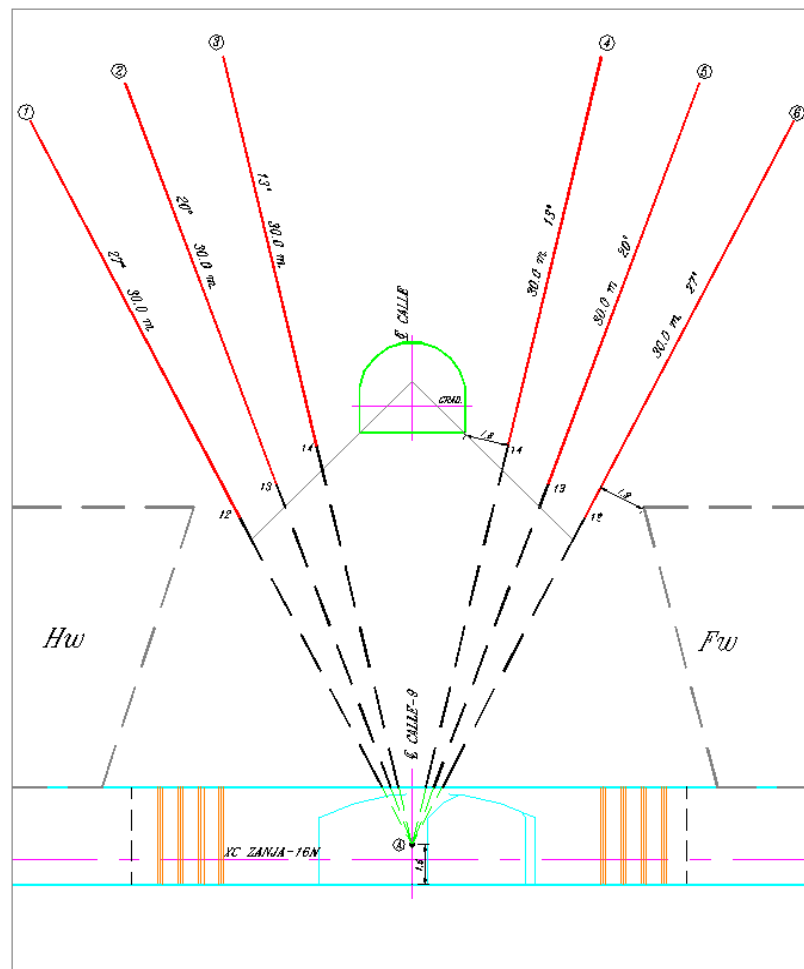


Ilustración 68. Esquema de diagrama de perforaciones desde el nivel de producción (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

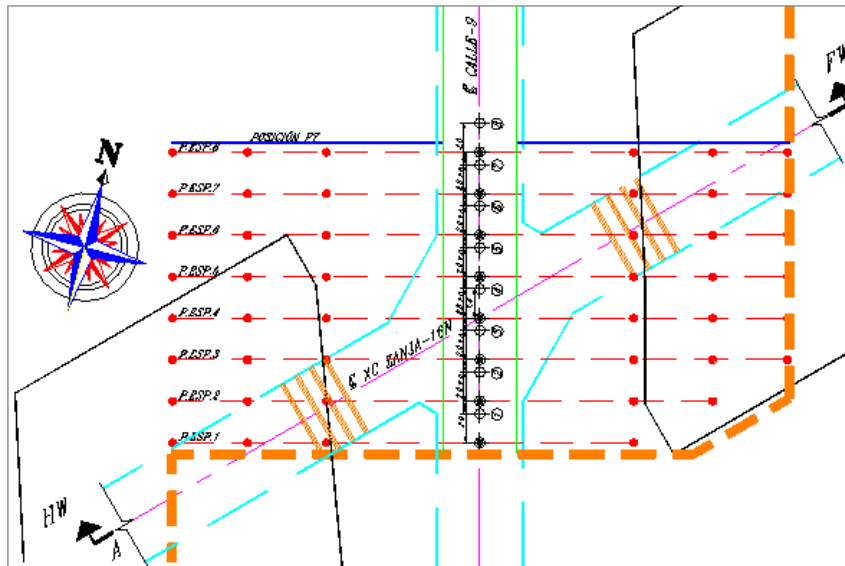


Ilustración 69. Esquema de diagrama de perforaciones desde el nivel de producción (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

El diagrama anterior corresponde a un diámetro de perforación de 3 [pulg] y considera 6 perforaciones por parada. Tres son hacia el patilla con inclinaciones de 13° , 20° y 27° con respecto a la vertical, y las otras tres son hacia el cabeza con las mismas inclinaciones. Como se aprecia en la Ilustración 68, todas las perforaciones poseen un largo de 30 [m], pero solo se truenca la extensión de la perforación que permita generar la geometría superior del crown pillar (color rojo en la Ilustración 68). El detalle de longitudes de estas perforaciones se presenta en la tabla 9.

Tabla 9. Detalle perforaciones desde nivel de producción.

Inclinación perforación	Longitud total [m]	Taco [m]	Longitud a tronar [m]
13°	30	14	16
20°	30	13	17
27°	30	12	18

Como se mencionó anteriormente, uno de los objetivos es conseguir la geometría final de la batea, con una inclinación de 45° en la parte superior, ángulo de diseño para el panel caving convencional en la mina El Teniente. Esta inclinación es la necesaria para el escurrimiento del material, y que originalmente se genera con las perforaciones descendentes del diagrama de disparo radial del UCL (Ilustración 70).

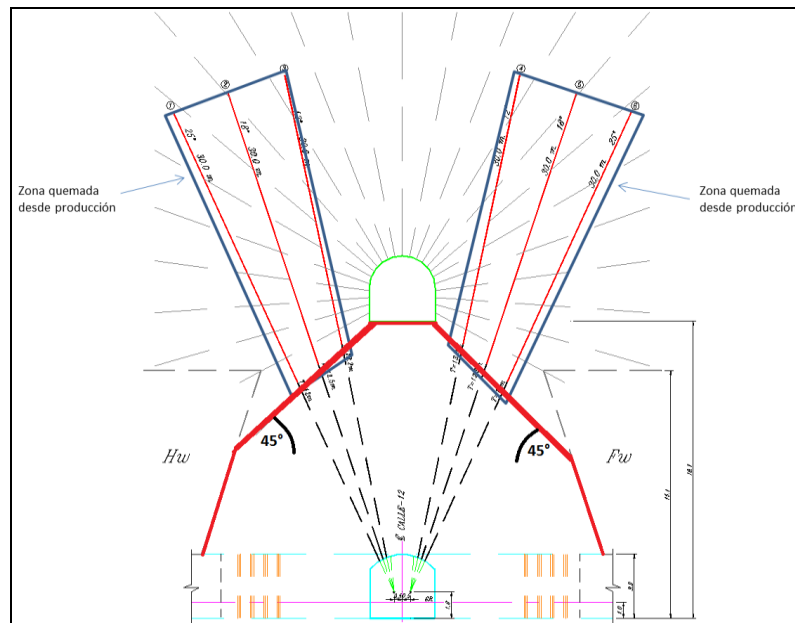


Ilustración 70. Diagrama crown pillar y batea generada por perforaciones desde el nivel de producción (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

5.2.2 Perforación desde nivel de hundimiento

Una vez finalizada la tronadura desde el nivel de producción, se prosigue con las tronaduras desde el nivel de hundimiento para lograr recuperar el frente de hundimiento. Un perfil N-S estándar de las perforaciones a realizar en este nivel se visualiza en la Ilustración 71.

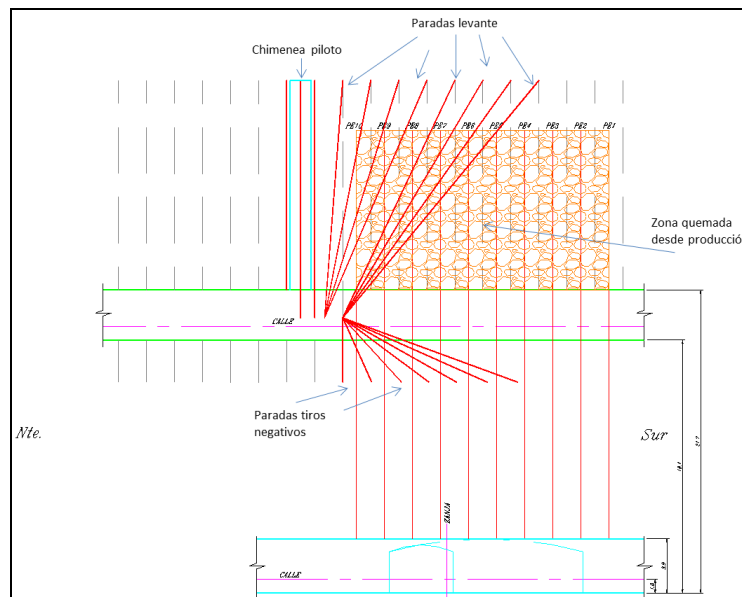


Ilustración 71. Esquema en perfil N-S de diagrama de perforaciones UCL. (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Dentro de las perforaciones realizadas desde el nivel de hundimiento se pueden identificar y detallar las siguientes:

a) **Perforación de levante (semi-cuñas ascendentes):** Su objetivo es recuperar la altura de socavación en la zona hundida desde el nivel de producción. La Ilustración 72 entrega una vista

en perfil Hw-Fw. Como se aprecia en la Ilustración 71, existen paradas con distintos ángulos y largos de perforación.

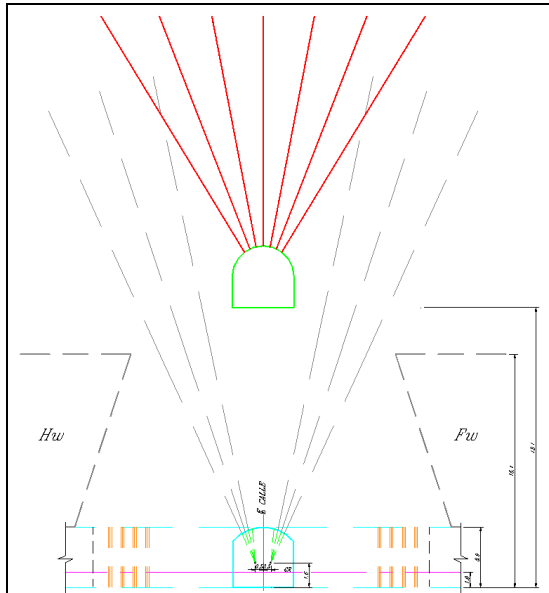


Ilustración 72. Perfil Hw-Fw paradas de levante desde UCL. (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

b) Perforación descendente (semi-cuñas descendentes): Su objetivo es regularizar la geometría de la batea, en particular en el sector comprendido entre la galería del UCL y los bordes de la zanja donde pueda existir losa remanente. En la Ilustración 73 se visualizan estas semi-cuñas descendentes en una vista en perfil Hw-Fw, donde al igual que en el caso de las semi-cuñas ascendentes, se tienen paradas con distintos ángulos y distinto largo de perforación.

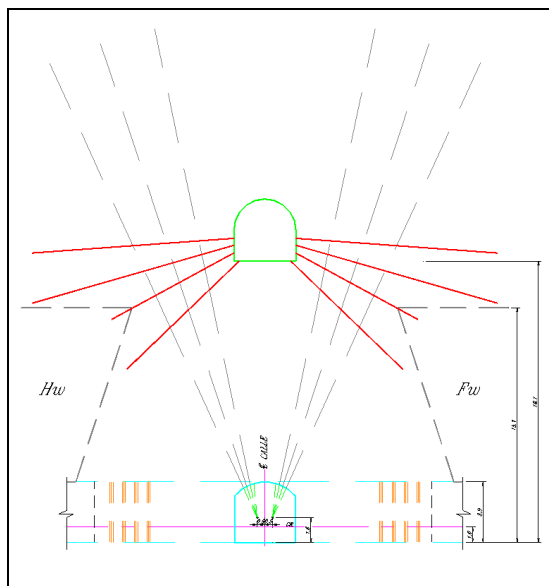


Ilustración 73. Perfil Hw-Fw paradas negativas desde UCL (Superintendencia Mina Norte (c) 2014)..

c) Slot (chimenea y radiales): Estas tronaduras tienen como objetivo recuperar la altura de socavación en zonas por detrás de las paradas de levante, para así retomar el frente de hundimiento y continuar con la variante de explotación original. La Ilustración 74 presenta un perfil Hw-Fw del slot a generar por la chimenea y las perforaciones radiales correspondientes.

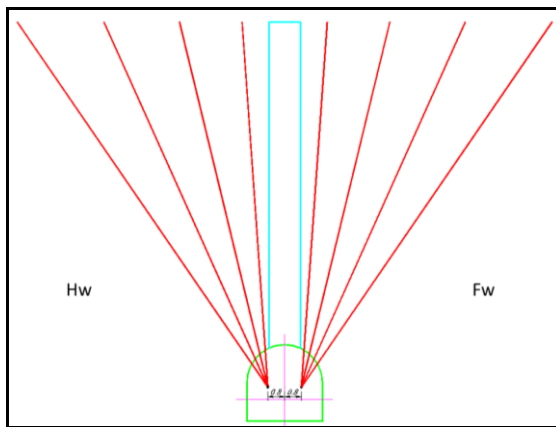


Ilustración 74. Slot desde UCL en zona sin daños (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Esta chimenea tiene un largo de 15 [m], un diámetro de 1,5 [m] y se construye con perforación (3") y tronadura convencional, a diferencia de las chimeneas realizadas comúnmente en la excavación de las bateas que se realizan con el método y máquina "blindhole". La Ilustración 75 muestra el diseño de perforación de esta chimenea.

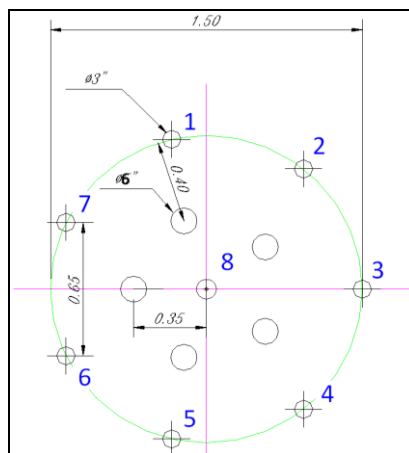


Ilustración 75. Diseño perforación chimenea de levante desde UCL. (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La Tabla 10 entrega los parámetros de perforación de este diseño.

Tabla 10. Parámetros de diseño perforación chimenea de levante.

Parámetros de perforación	Cargado
Diámetro de Perforación - Tiro con Carga [pulg]	3
Diámetro de Perforación - Tiro Alivio [pulg]	6
Cantidad de perforaciones con Carga [N°]	8
Cantidad de perforaciones Alivio [N°]	5
Burden [m]	0,4
Longitud por perforación [m]	15
Longitud perforada - Tiro 3" [m]	120
Longitud perforada - Tiro 6" [m]	75
Longitud total perforada [m]	195
Volumen a extraer [m ³]	26,5

La Ilustración 76 entrega una vista en planta del canalón generado por la chimenea y las perforaciones radiales.

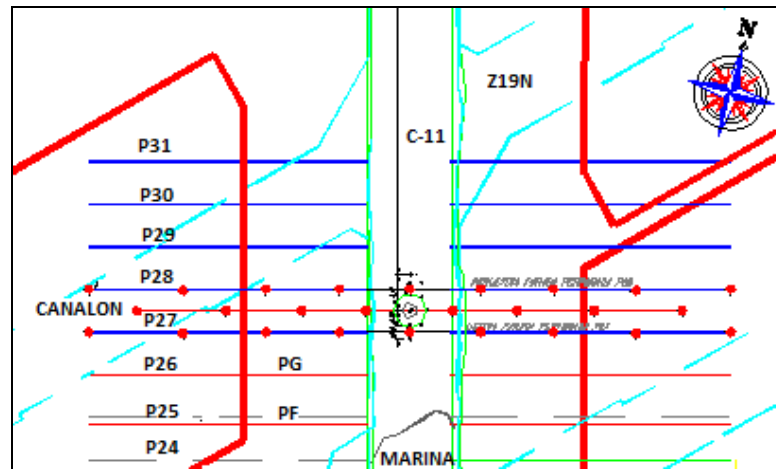


Ilustración 76. Diseño slot, vista en planta (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

5.3. Implementación de la solución y resultados

5.3.1. Secuencia de actividades

1. Estudio de la situación inicial: identificación de la línea base de daños y de puntos de extracción.
2. Extracción de mineral.
3. Perforación desde el nivel de producción.
4. Auscultación de las perforaciones.
5. Tronaduras desde el nivel de producción.
6. Inicio de perforación y tronadura de semi-cuñas, tanto ascendentes como descendentes.
7. Excavación chimenea con perforación y tronadura en zona sin daños.
8. Tronadura de perforaciones radiales alrededor de chimenea, para generar slot.
9. De manera simultánea, a partir del punto 3, se realizan seguimientos semanales de los puntos de extracción.

5.3.2. Seguimiento de la extracción

Luego de iniciada la extracción el 19 de marzo, el 26 de marzo se realizó la primera inspección, donde no se evidenciaron puntos colgados ni vacíos. A partir de esta información se planificó extraer en los puntos con baja o nula extracción (C12N17H y C12N18H), con 4 baldadas por turno (0,28 [tpd/m²] color café) y luego se aumentó a 8 baldadas por turno (0,56 [tpd/m²] color verde) en los puntos ya incorporados, para evitar desviaciones en perfiles de extracción y nuevas manifestaciones de daños en el nivel de producción (Ilustración 77).

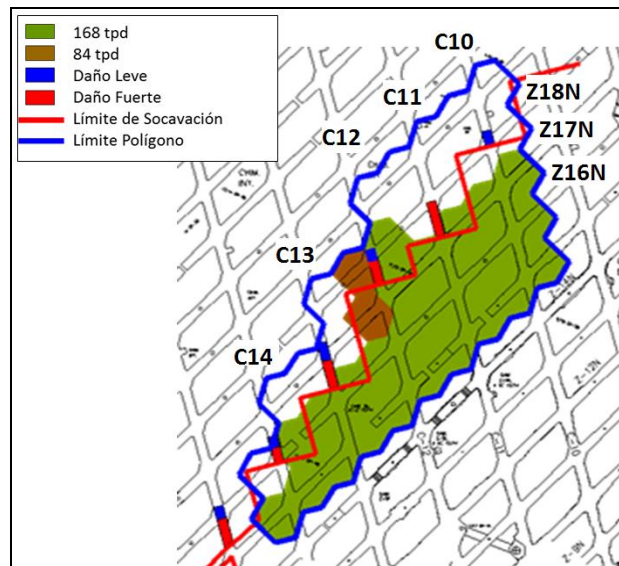


Ilustración 77. Planificación de extracción 26 de marzo (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Posteriormente se realizó un seguimiento el día 8 de abril del 2014, donde no se evidenciaron puntos vacíos ni colgados.

Con el propósito de regularizar la geometría de la cavidad y de evitar la concentración de esfuerzos, se extrajo de los puntos que presentaban diferencias en el perfil de extracción. En los gráficos siguientes se muestran las calles que tienen un ángulo promedio inferior a lo

recomendado⁵ (30°-45°), por lo que se debía regularizar este ángulo. La Ilustración 78 presenta el perfil de extracción de la C11 hacia el lado patilla.

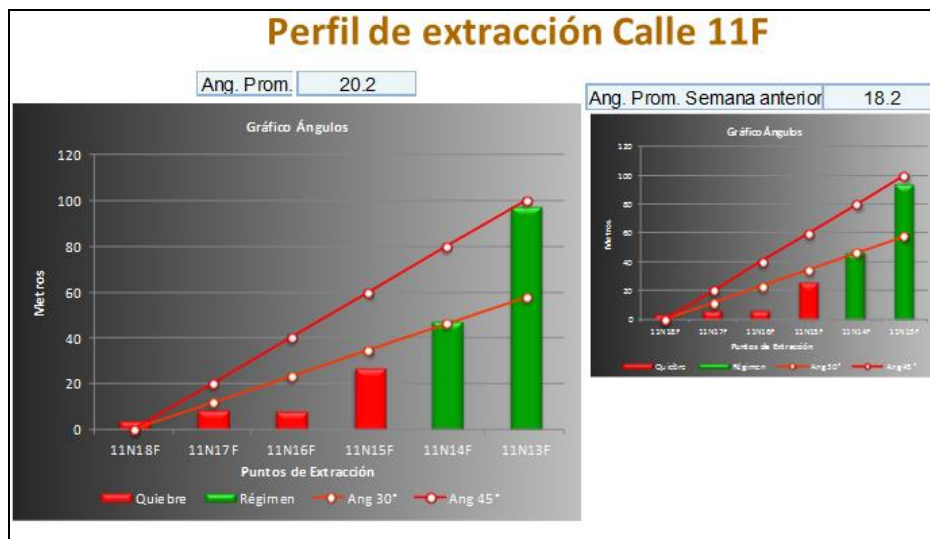


Ilustración 78. Perfil de extracción C11F (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La Ilustración 79 por su parte presenta el perfil de la C11 hacia el lado cabeza.

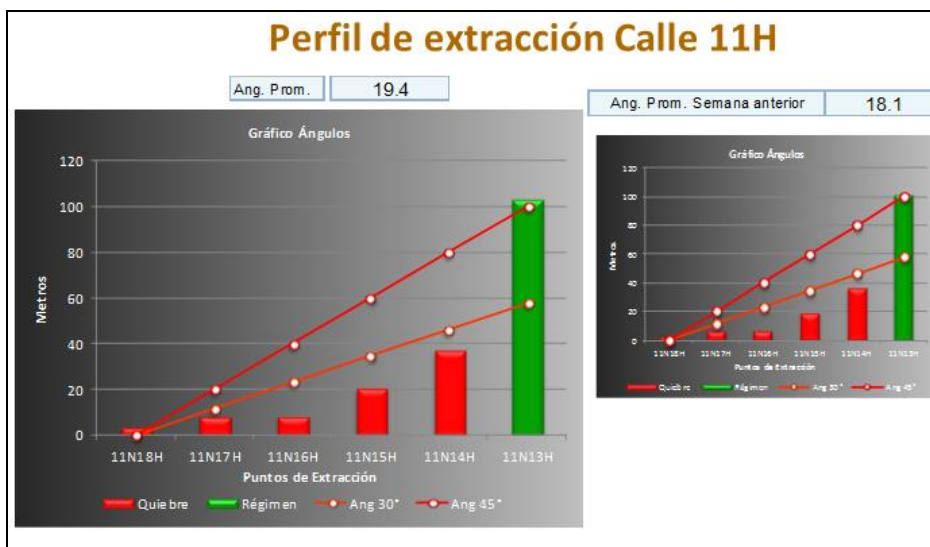


Ilustración 79. Perfil de extracción C11H (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

En la Ilustración 80 se entrega el perfil de extracción de la C12 hacia el lado patilla.

⁵ El ángulo de extracción en zona de quiebre tiene por objetivo mantener el volumen en quebrado de forma controlada. En la zona en quiebre el ángulo de extracción recomendado es entre 30° a 45°, el cual se debe cumplir para: evitar la generación de losas, evitar la sobre extracción y definir la continuidad de incorporación de área.

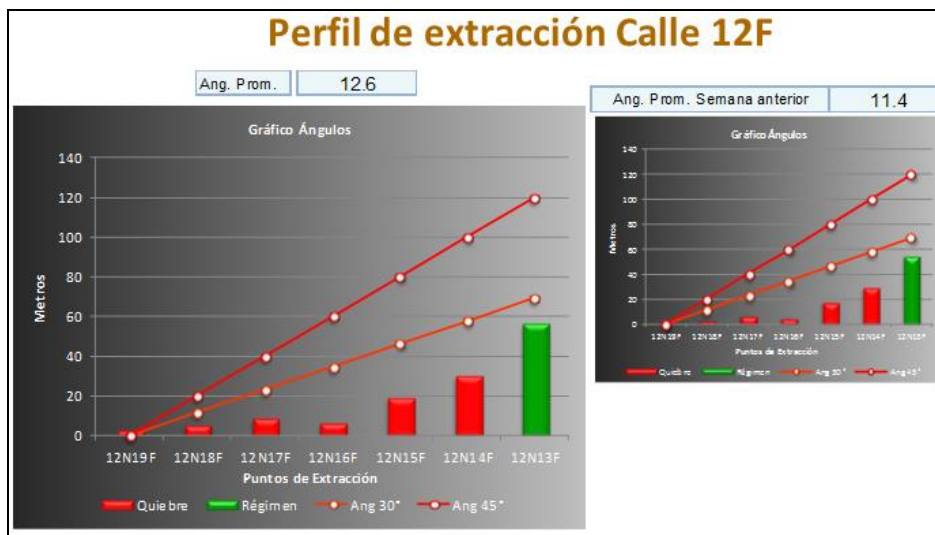


Ilustración 80. Perfil de extracción C12F (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La Ilustración 82 muestra el perfil de extracción de la C12 hacia el cabeza.



Ilustración 81. Perfil de extracción C12H (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Con esta información se propuso aumentar la extracción de los puntos 10N17H, 11N16F, 11N16H y 12N16F a 10 baldadas por turno (210 [tpd]) y disminuir la de los puntos 11N17F, 11N17H y 12N17F a 6 baldadas por turno (126 [tpd]). Para el resto de los puntos se mantuvo la extracción antes definida (8 baldadas turno, 168 [tpd]).

La Ilustración 82 presenta el retraso en la propagación de las alturas correspondientes a los puntos 11N16F, 11N16H y 12N16F respecto de la altura de los puntos hacia el norte.

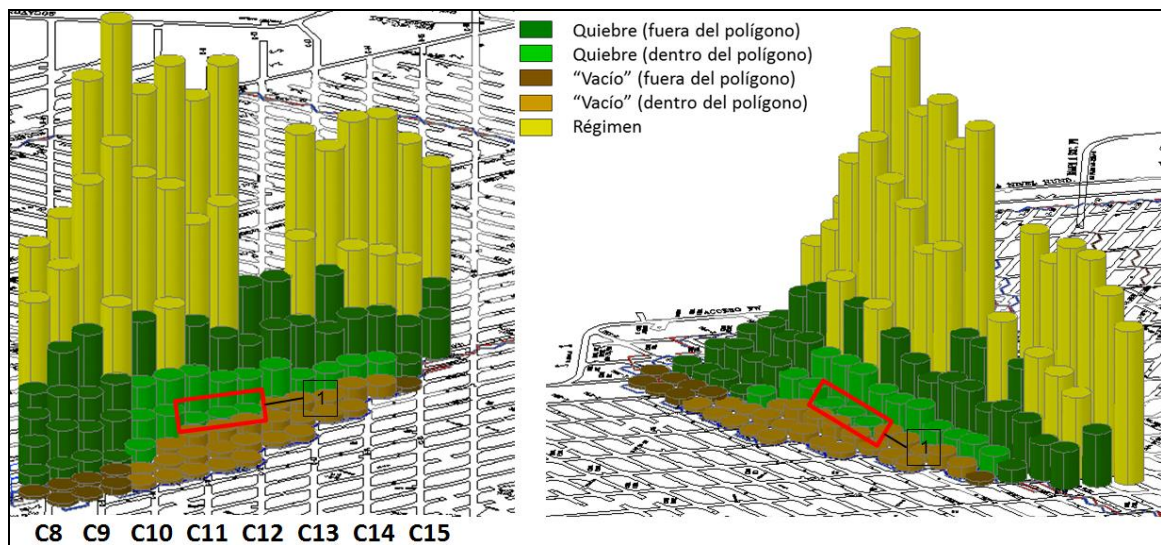


Ilustración 82. Retraso en la propagación de las extraídas (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Esta nueva planificación de la extracción, se muestra en la Ilustración 83 haciendo énfasis en los puntos mencionados.

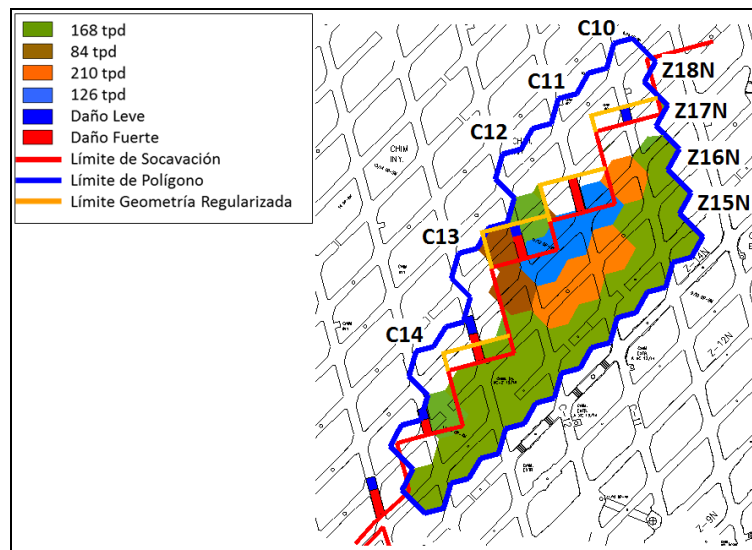


Ilustración 83. Planificación de extracción 8 de abril (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

En relación con los criterios para evaluar el éxito de esta planificación, a continuación se entrega un registro fotográfico de los puntos de extracción en cada calle (Ilustraciones 84 a 88), donde se aprecia que la granulometría en los puntos de extracción es adecuada, mediana a alta (65% > 50 [cm³]). Se requiere en varios casos de reducción secundaria, pero es un resultado propio del caving en roca de mineralización primaria, más aún si la socavación no se realizó de manera óptima.

Además se inspeccionó el estado de los puntos y si permiten o no proseguir con la extracción. Por otro lado, el estado de las bateas, desde un punto de vista geométrico, se infiere que es apropiado, ya que el escurrimiento de material y su quiebre ocurren de manera exitosa, apareciendo como se mencionó anteriormente testigos del hundimiento.

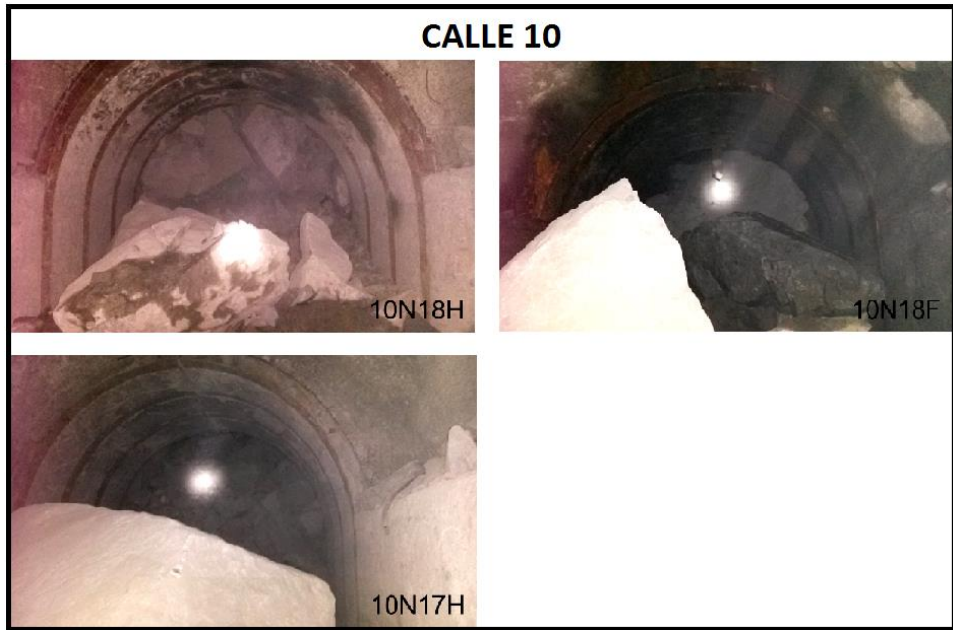


Ilustración 84. Estatus puntos de extracción C10 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

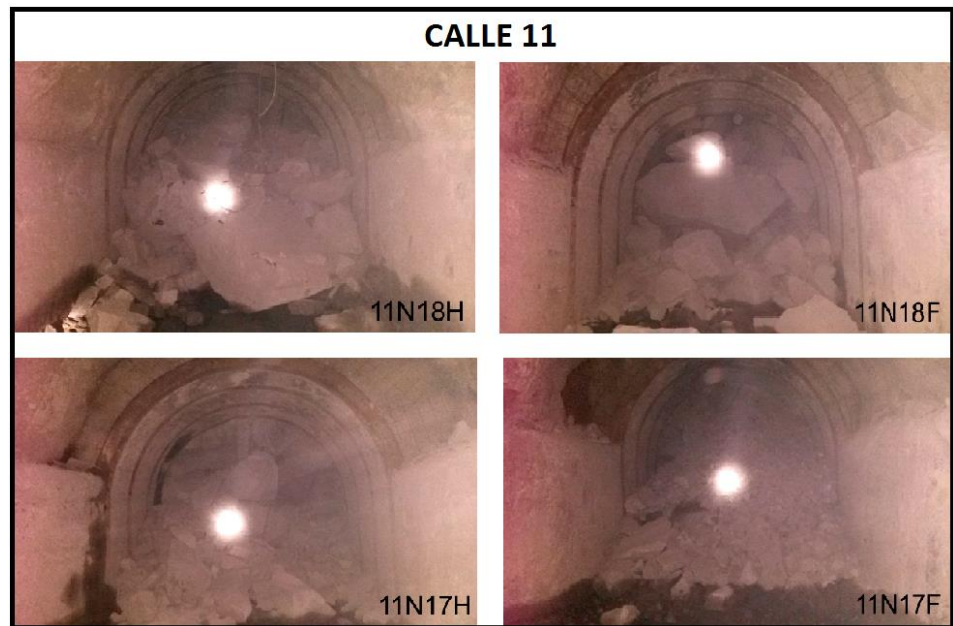


Ilustración 85. Estatus puntos de extracción C11 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).



Ilustración 86. Estatus puntos de extracción C12 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).



Ilustración 87. Estatus puntos de extracción C13 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

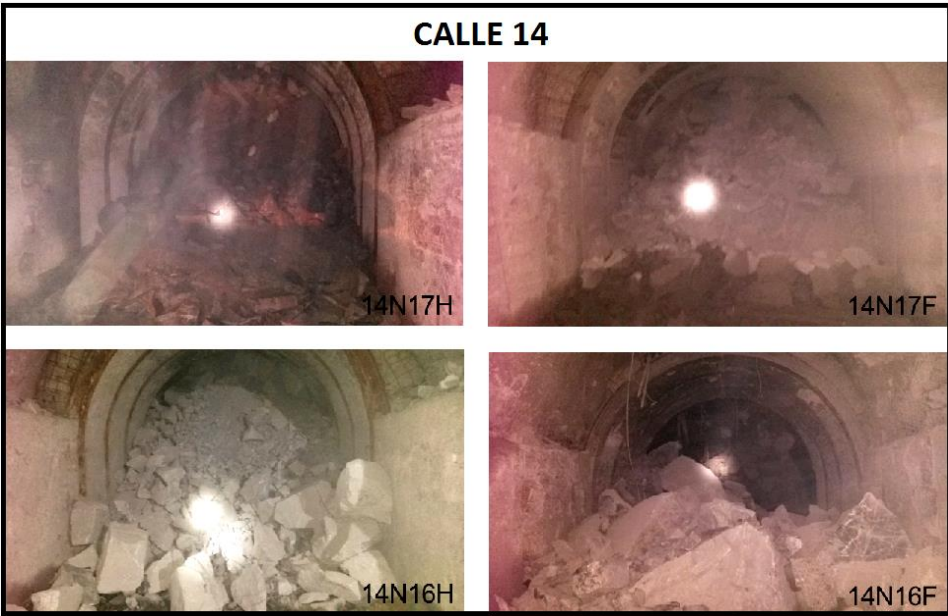


Ilustración 88. Estatus puntos de extracción C14 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Posteriormente, se continuó realizando seguimientos semanales e incluso diarios, no registrándose puntos vacíos ni colgados y manteniéndose la granulometría anteriormente mencionada, por lo que la extracción se mantiene. Esto hasta el día 5 de mayo cuando se decidió poner énfasis en la Z18N, además de continuar controlando diferencias de altura entre puntos colindantes. La planificación en esa fecha se presenta en la Ilustración 89.

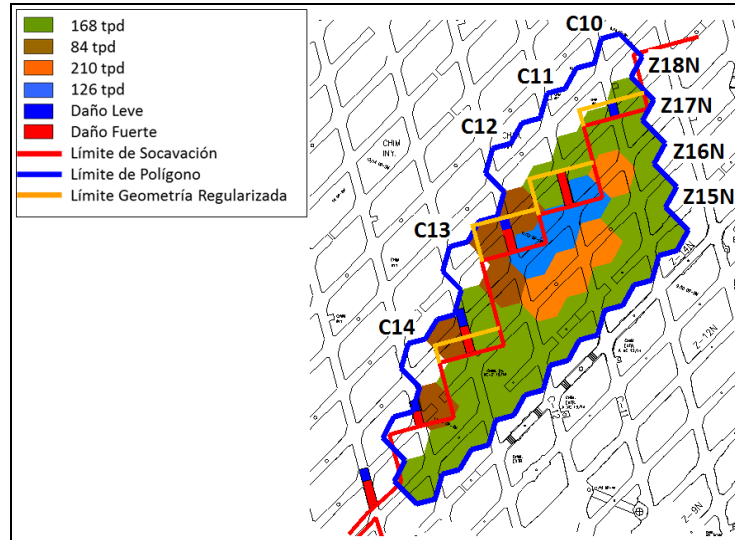


Ilustración 89. Planificación de extracción 5 de mayo (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Durante los seguimientos realizados posteriormente se mantuvo la extracción, ya que los criterios de éxito se siguen cumpliendo. Sin embargo, la principal dificultad corresponde al cumplimiento de la extracción. La Ilustración 90 presenta el porcentaje de cumplimiento de producción acumulada al 10 de julio del año 2014.

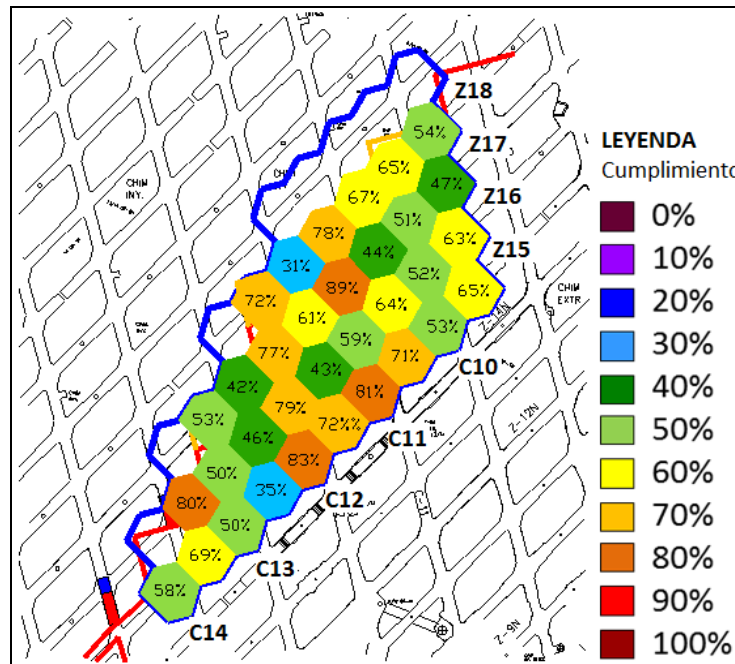


Ilustración 90. Producción acumulada al 10 de julio del 2014 (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Se registra un cumplimiento promedio de 60%, siendo los principales factores que inciden en este problema los siguientes:

- a) Colgadas en los sistemas de traspaso.
- b) Reducción secundaria.
- c) Interrupción de la extracción debido a perforación realizada desde el nivel de producción.

La Ilustración 91 presenta el incremento en las alturas extraídas (respecto al punto de partida) al 10 de julio en el sector en estudio, donde se aprecia que los perfiles de extracción y la diferencia de alturas entre puntos colindantes se lograron equiparar en su mayoría.

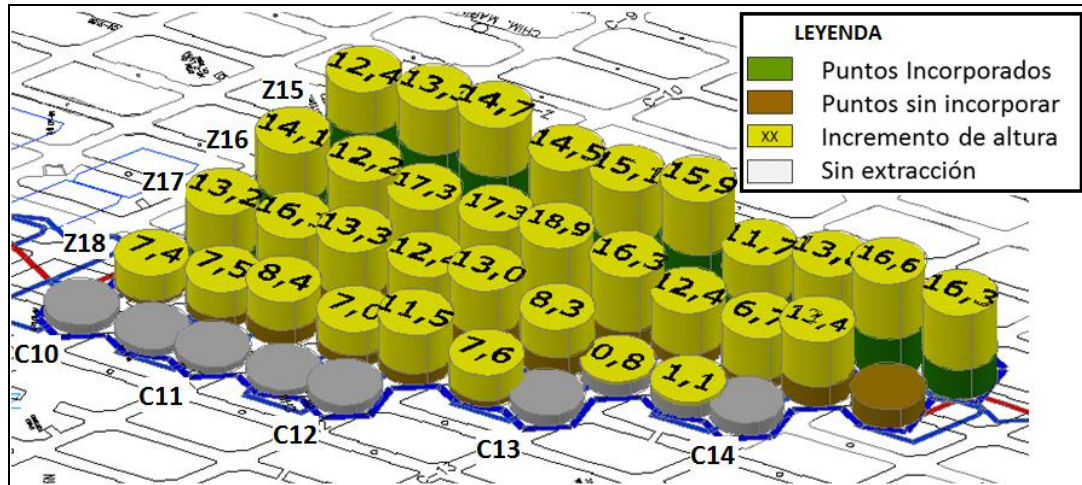


Ilustración 91. Alturas extraídas al 5 de mayo. Valores medidos en metros (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La altura de columna acumulada en cada punto se entrega en la Ilustración 92.

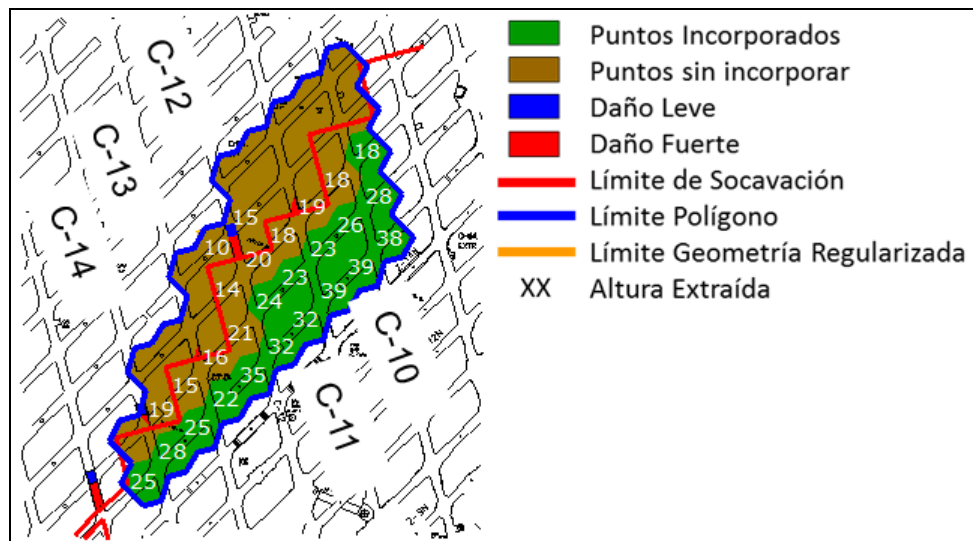


Ilustración 92. Altura acumulada en puntos de extracción (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

La Tabla 11 nos presenta el incremento promedio en las alturas de extracción de las zanjas.

Tabla 11. Incremento alturas de extracción [m].

	Altura inicial [m]	Altura acumulada [m]	Incremento [m]
Z15N	17	32	15
Z16N	7	20	13
Z17N	5	13	8
Z18N	3	10	7

Desde el inicio de la extracción, los puntos del polígono han incrementado su altura un promedio de 11 [m], no registrándose incrementos mayores a 18,9 [m].

5.3.3. Perforación y Tronadura

a) Perforaciones desde nivel de producción

La longitud de las perforaciones registradas por los operadores es importante para evaluar la posibilidad de ejecutar la solución de diseño mencionada anteriormente, así como también identificar la geometría del crown pillar y el alcance de los daños sobre este.

Las perforaciones desde el nivel de producción comenzaron en la C12 por temor a que los daños se propagaran hasta el OP-5N. El detalle de las perforaciones realizadas desde el nivel de producción en la C12 se presenta en la Ilustración 93.

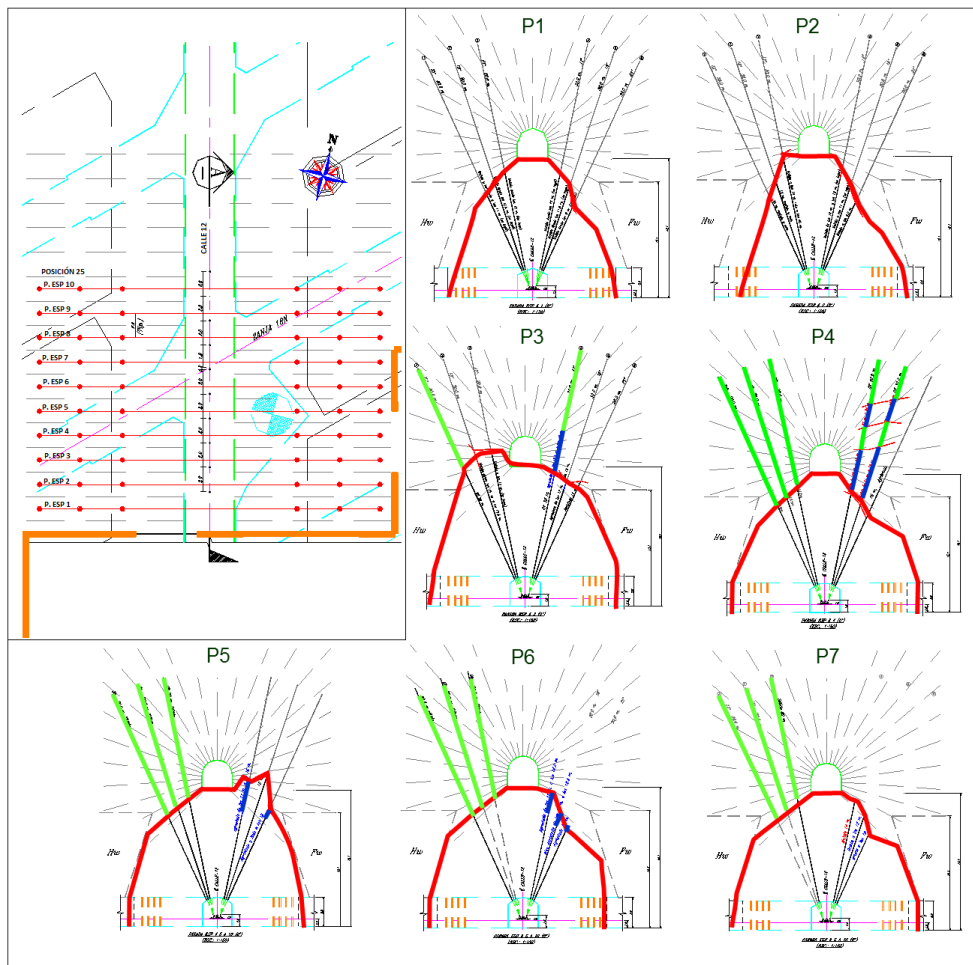


Ilustración 93. Auscultación perforaciones C12 NP (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Desde el collar de las perforaciones hasta los límites del crown pillar (línea roja) no se evidencian complicaciones, es decir no se aprecia pérdida de agua u otras dificultades. Más allá del límite del crown pillar, dependiendo de la parada, se observan sectores agrietados, molidos o sanos. Desde la parada 3 a la 7 se evidencia que el pilar hacia el lado Hw está sano o sólido, y se logra perforar el diseño, es decir 30 [m].

El 2 de abril se marcó la topografía para proseguir las perforaciones en la C13. Luego el 3 de abril, se continuó con las perforaciones desde el nivel de producción hacia la C13, las que se muestran en la Ilustración 94. Además, el 7 de abril se preparan los servicios en la C11 para continuar con las perforaciones desde el nivel de producción.

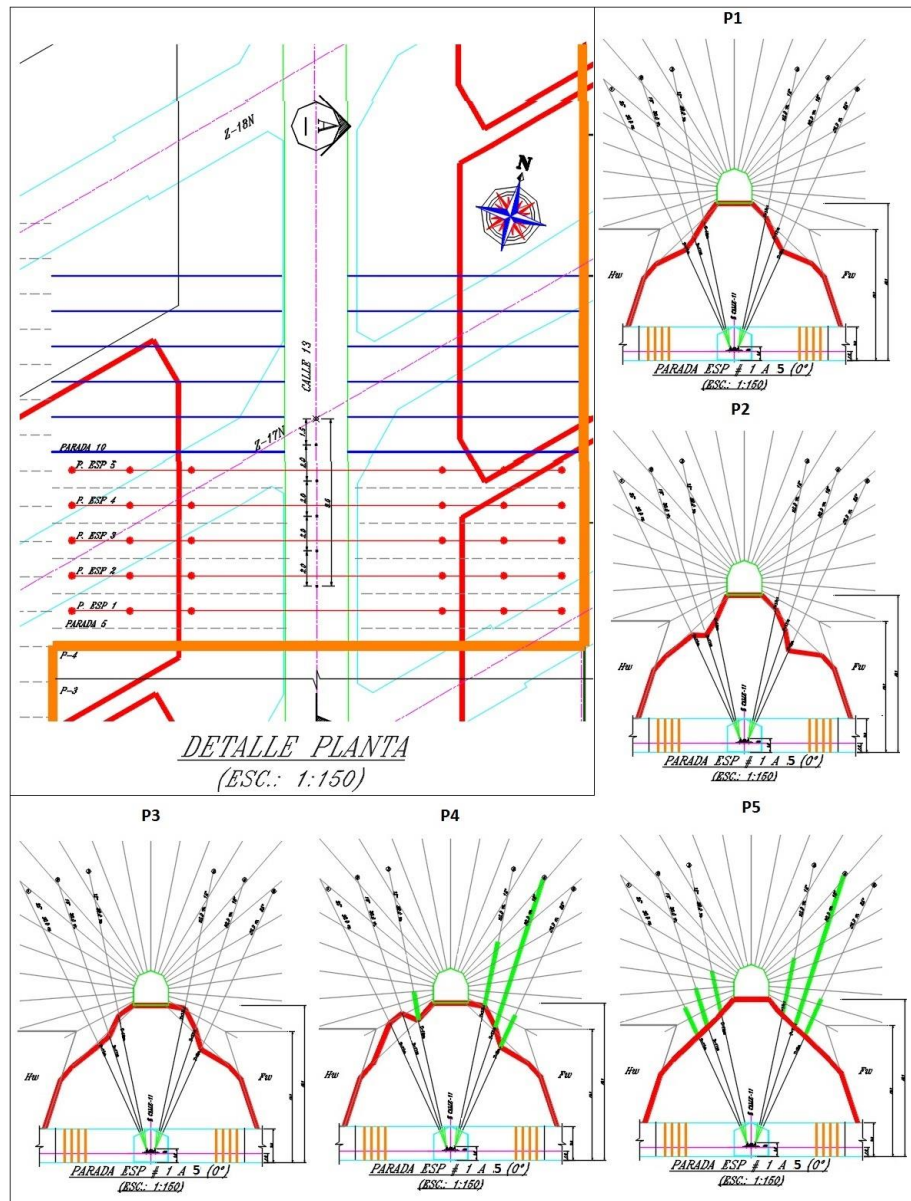


Ilustración 94. Auscultación perforaciones C13 NP (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

En las primeras tres paradas no se logró perforar lo diseñado. Al igual que en las calles anteriores, desde el collar de la perforación hasta el límite del Crown pillar, no se presentan complicaciones. Las paradas 4 y 5 presentan daños variables hacia el lado patilla, lográndose la longitud propuesta en el diseño solo en una de las perforaciones, para ambos casos.

El 8 de abril se iniciaron las perforaciones de la C11, el detalle se presenta en la Ilustración 95.

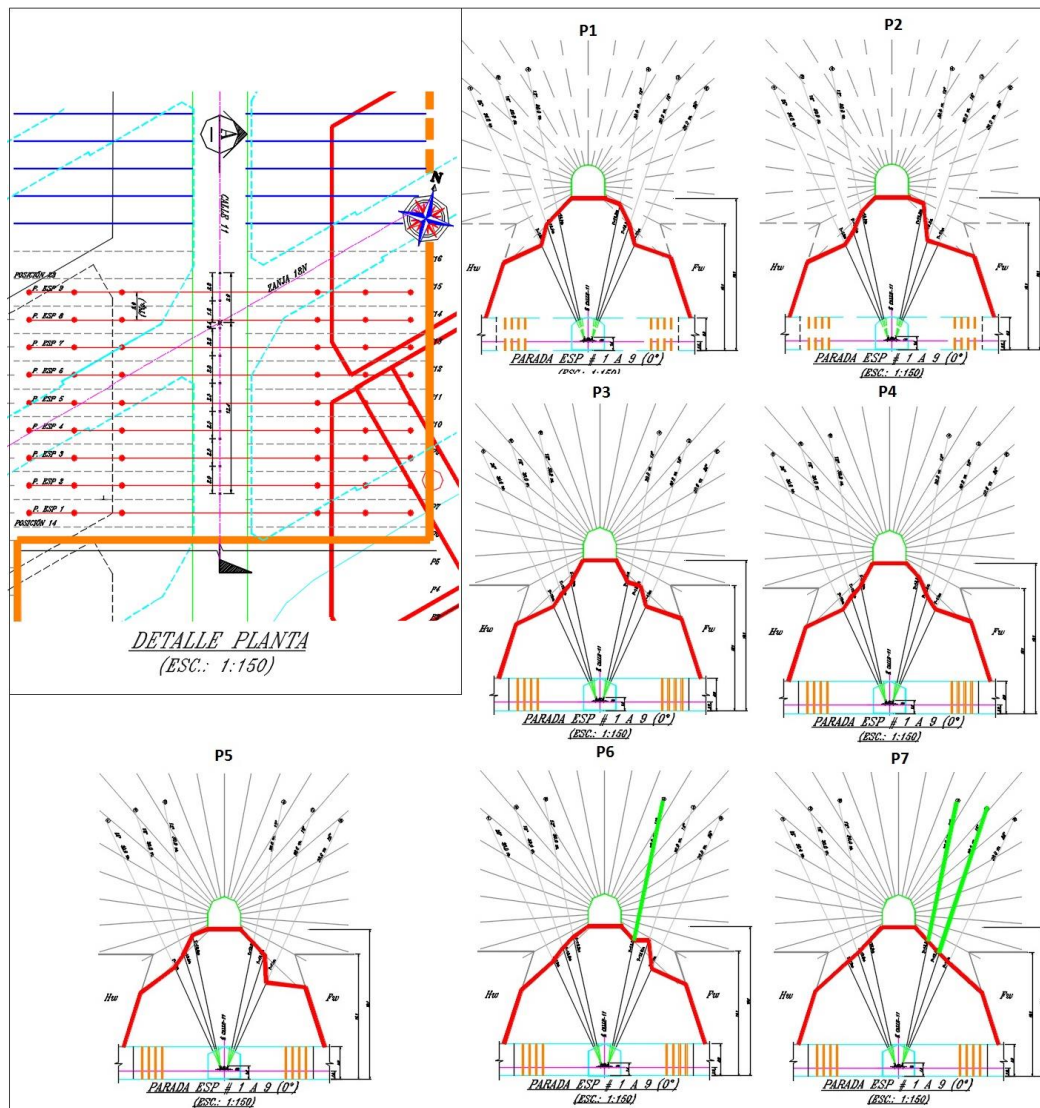


Ilustración 95. Auscultación perforaciones C11 NP (Superintendencia Mina Norte (c) 2014).

Se puede notar que de la parada 1 a 5, no se obtienen perforaciones que alcancen el diseño (30 [m]) ya que los daños no lo permiten. Por su parte, desde el collar de la perforación hasta el límite del crown pillar (color rojo) no hay problemas. En la parada 6 se logró alcanzar la longitud de diseño en una perforación hacia el lado patilla (línea color verde) mientras que en la parada 7 se hizo en dos perforaciones hacia el mismo lado.

b) Tronaduras desde el nivel de producción

El carguío de las perforaciones realizadas desde el nivel de producción no siempre alcanzó el largo perforado. Esto, debido a complicaciones que dificultan el carguío, ya sean grietas o desplazamientos en el macizo rocoso que no se aprecian durante la perforación y solo se manifiestan al momento de cargar el explosivo.

Con respecto a las acciones tomadas para estas tronaduras, primero se decidió cargar las perforaciones de longitud superior a 14 [m], para proteger la geometría del crown pillar y evitar daños en el nivel de producción. Con el mismo objetivo se decidió iniciar la detonación en la parte inferior de la carga.

Por otra parte, la cara libre de esta tronadura corresponde a la galería del nivel de hundimiento, de modo que la zona de la perforación ubicada más allá del techo de la galería corresponde a una zona altamente confinada, donde posiblemente se produzca el “efecto cráter” ocasionando daños en el collar de cada perforación y consecuentemente en el nivel de producción. Por lo anterior, la longitud cargada se encuentra entre 8 y 10 [m], lo que se puede apreciar en el esquema presentado en la Ilustración 96.

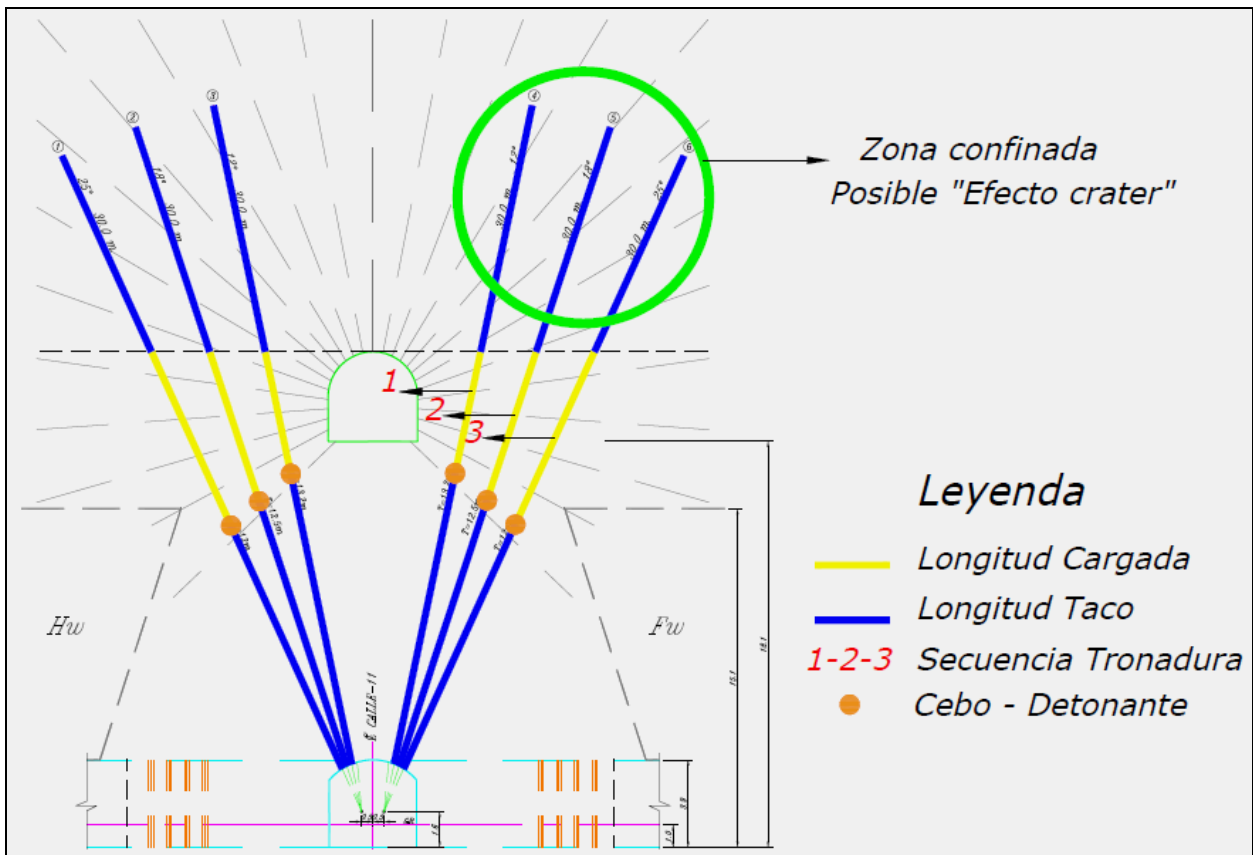


Ilustración 96. Tronadura de perforaciones desde nivel de producción.

A continuación se incluyen las longitudes de los tiros medidos por el operador del jumbo y el supervisor a cargo de la tronadura. Además de parámetros de la tronadura como distancia cargada y retardo entre tiros.

Tronadura de la C12: como se vió en la Ilustración 93, las perforaciones de las paradas 1 y 2 no superan el crown pillar. Por esto, el 7 de mayo del 2014 se realizó la tronadura solo de las paradas 3 y 4. El detalle de esta tronadura se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12. Detalle Tronadura paradas 3 y 4, C12 NP.

C12 / P3 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	30	30	8	50
T2	15	17	2	25
T3	17	15	1	0
T4	12,5	13	x	x
T5	13	10	x	x
T6	14	9	x	x
C12 / P4 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	30	30	8	50
T2	30	30	8	25
T3	30	30	8	0
T4	30	11	x	x
T5	30	10	x	x
T6	15	7	x	x

El retardo entre tiros es de 25 [ms], el mismo que se usa para las tronaduras tradicionales de socavación alta. Por otro lado, el retardo entre paradas corresponde a 100 [ms]. Sólo se cargaron las 3 perforaciones correspondientes al lado Hw (T1, T2 y T3) ya que las perforaciones hacia el Fw se encontraban agrietadas.

El 9 de mayo del 2014 se prosigue con las paradas 5, 6 y 7 de la C12, cuyo detalle se puede visualizar en la Tabla 13.

Tabla 13. Detalle Tronadura paradas 5, 6 y 7, C12 NP.

C12 / P5 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	30	30	8	50
T2	30	30	8	25
T3	30	30	8	0
T4	11	10	x	x
T5	18	10	x	x
T6	13	8	x	x
C12 / P6 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	30	30	8	150
T2	30	30	8	125
T3	30	30	8	100
T4	11	12	x	x
T5	12,5	10	x	x
T6	10	8	x	x
C12 / P7 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	30	30	8	50
T2	30	30	8	25
T3	30	30	8	0
T4	14	11	x	x
T5	12	11	x	x
T6	10	9	x	x

Según la información expuesta, en este caso se logró cargar 8 [m] de explosivo, lo que puede justificarse porque a mayor distancia del frente de hundimiento los daños disminuyen en intensidad. Sobre todo hacia el cabeza de la C12 que, como se apreció en la auscultación de perforaciones, el pilar se encuentra sólido, sin mayor propagación de los daños, recordando que el hundimiento se encuentra hacia el sur y el patilla de las calles.

Tronadura de la C11: como se vió en la Ilustración 95 las perforaciones de las paradas 1 a 5 no superan el crown pillar y la perforación T4 de la parada 6 alcanza sólo 12,5 [m] debido a grietas o

desplazamientos en la perforación. Por eso, el 23 de abril se inició el carguío solo de las paradas 7, 8 y 9. El detalle de esta tronadura se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Detalle Tronadura paradas 7, 8 y 9, C11 NP.

C11 / P7 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	10	10	x	x
T2	15	15	1	25
T3	15	14,5	1	0
T4	30	15,5	1	50
T5	30	12,5	x	x
T6	11,5	10,5	x	x
C11 / P8 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	s/i	11	x	x
T2	s/i	14,5	1	175
T3	s/i	16	1	150
T4	s/i	30	10	200
T5	s/i	30	10	225
T6	s/i	15	1	250
C11 / P9 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	s/i	10	x	x
T2	s/i	16	2	375
T3	s/i	18	3	350
T4	s/i	30	10	400
T5	s/i	30	10	425
T6	s/i	30	10	450

De las paradas 8 y 9 no se tiene información de las medidas obtenidas por los operadores de perforación. Respecto a la parada 7, al igual que lo mencionado sobre la parada 6, las perforaciones T4 y T5 no alcanzan los largos entregados por los perforadores; sin embargo, la primera de estas se pudo cargar al menos con 1 [m] de columna de explosivo.

Tronadura en la C13: como se vió en la Ilustración 94 las perforaciones de las paradas 1 a 3 no superan el crown pillar. A pesar de esto, los operadores de tronadura lograron identificar dos perforaciones en la parada 3 con largo igual a 14 [m]. El 11 de abril se realizó la tronadura de las paradas 3, 4 y 5, cuyo detalle se entrega en la Tabla 15.

Tabla 15. Detalle Tronadura paradas 3, 4 y 5, C13 NP.

C13 / P3 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	10	11	x	x
T2	11,5	13	x	x
T3	13,5	14	1	25
T4	13,5	14	1	0
T5	12,3	12	x	x
T6	10,5	10	x	x
C13 / P4 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	13,5	13	x	x
T2	14	14	1	175
T3	16	15	1	150
T4	22,5	2	x	x
T5	30	14	1	125
T6	14,5	12	x	x
C13 / P5 NP	Medido [m]		Tronadura	
Tiro (Perforación)	Perforación	Tronadura	Distancia Cargada [m]	Retardo [ms]
T1	15	13	x	x
T2	16,6	14	1	300
T3	18	13	x	x
T4	19,5	20	5	275
T5	30	20	5	325
T6	16	6	x	x

Se aprecia más irregularidad en la calidad de las perforaciones, no identificándose un lado en mejores condiciones; además, las paradas 3 y 4 solo se cargan con un largo de columna explosivos de 1 [m]. Para el caso de la parada 5 se aprecian dos perforaciones hacia el Fw con largos de 5 [m].

c) Fotografías pre y post socavación

La tronadura de la C10, dado que es la que tiene menor intensidad de daños, se realizó recuperando las perforaciones radiales desde el nivel de hundimiento. En particular es de carácter crítico recuperar las perforaciones descendentes, ya que permiten generar la geometría de la batea, evitar la formación de lozas y además propagar el hundimiento. Para estos casos es importante actuar rápido y con personal altamente calificado. En la Ilustración 97 se presentan diagramas de las 5 paradas donde se pudieron recuperar las perforaciones, mientras que en la Ilustración 98 se ven fotografías antes y después de esta tronadura.

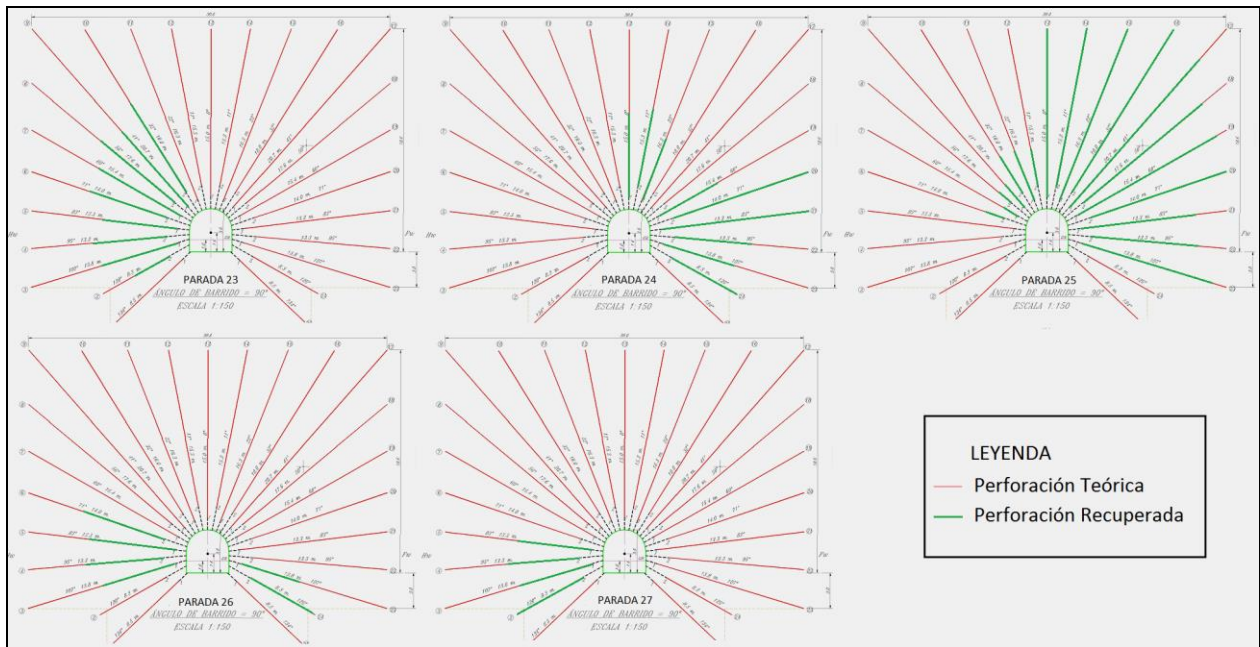


Ilustración 97. Recuperación perforaciones radiales C10.



Ilustración 98. Fotografías pre y post tronadura C10 UCL (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).

Antes y después de las tronaduras realizadas desde el nivel de producción se tomaron fotografías de las calles del UCL, las cuales se presentan para el caso de las calles 11 y 12 (Ilustraciones 99 y 100 respectivamente).

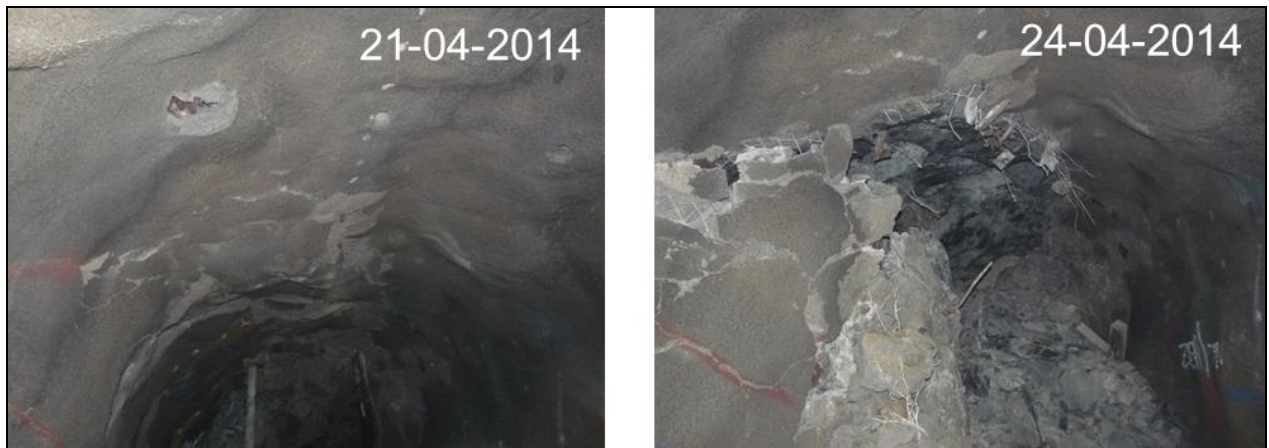


Ilustración 99. Fotografías pre y post tronadura C11 UCL (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).



Ilustración 100. Fotografías pre y post tronadura C12 UCL (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).

d) Chimenea piloto

Se realizó una prueba para la excavación de la chimenea piloto con perforación y tronadura en la C7 del UCL, para luego implementarlas en cada una de las calles donde se requiere recuperar la altura del frente.

Como se observó en el capítulo de diagramas de perforación, el diseño de la chimenea contempla 13 tiros: 1 central, 5 de alivio alrededor de la perforación del centro y 7 perforaciones de desquinche. Sus valores de burden y espaciamiento están calculados en 0,51 [m] y 0,72 [m], para perforaciones con carga explosiva de diámetro 3 [pulg] y perforaciones de alivio de 6 [pulg] respectivamente.

Las 13 perforaciones se realizaron con un jumbo radial Sandvik DL-321, aceros T-45, barra tubo tac TDS 76 en la punta y bits Drop center retráctil guía. Las longitudes perforadas fueron de 15 [m] por tiro. Con el mismo equipo se realizó el escareado de las 5 perforaciones de alivio, con bits escariador piloto tipo cara plana de 6 [pulg] de diámetro.

Una vez realizadas las perforaciones, Topografía mina realizó la medición de su desviación, con un equipo electrónico modelo Reflex EZ-AQ.

El carguío de las perforaciones se realizó con 1 cebo al fondo APD-150 UH y 2 cartuchos de dinamita 2 [pulg] x 8 [pulg], explosivo de columna Anfo, un 2° cebo APD-150 UH y 2 cartuchos de dinamita 2 [pulg] x 8 [pulg] a una distancia de 7 [m] del collar. El resto de la columna se cargó con Anfo y la longitud de los tacos fue de 0,5 [m], con 3 cartuchos de greda en cada perforación. Esto se aprecia en la Ilustración 101.

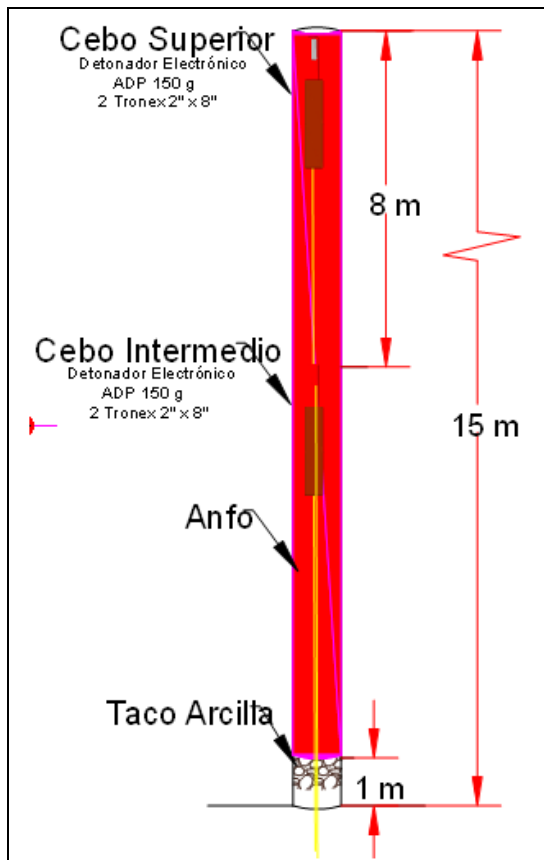


Ilustración 101. Detalle de carguío en perforaciones para Chimenea piloto.

Respecto a la secuencia de tiempos, todas las perforaciones se iniciaron con deltas de tiempo de 1 [ms] entre el 2° cebo y el cebo del fondo (superior), asegurando el desplazamiento de material fragmentado desde abajo hacia arriba y sumando energía hacia el fondo de cada perforación. Esto se aprecia en la Tabla 16.

Para asegurar la evacuación del material fragmentado por el tiro central, se propuso un retardo de 1,500 [ms] para iniciar los tiros de contorno. La secuencia entre tiros de contorno considero retardos de 100 [ms] entre los cuatro primeros y luego de 25 [ms] para las tres perforaciones restantes (Ilustración 102).

Tabla 16. Retardo entre cebos y secuencia de tronadura.

N° Perforación	Retardo Fondo [ms]	Retardo Intermedio [ms]
8	1	0
7	1501	1500
2	1601	1600
1	1701	1700
6	1801	1800
3	1826	1825
5	1851	1850
4	1876	1875

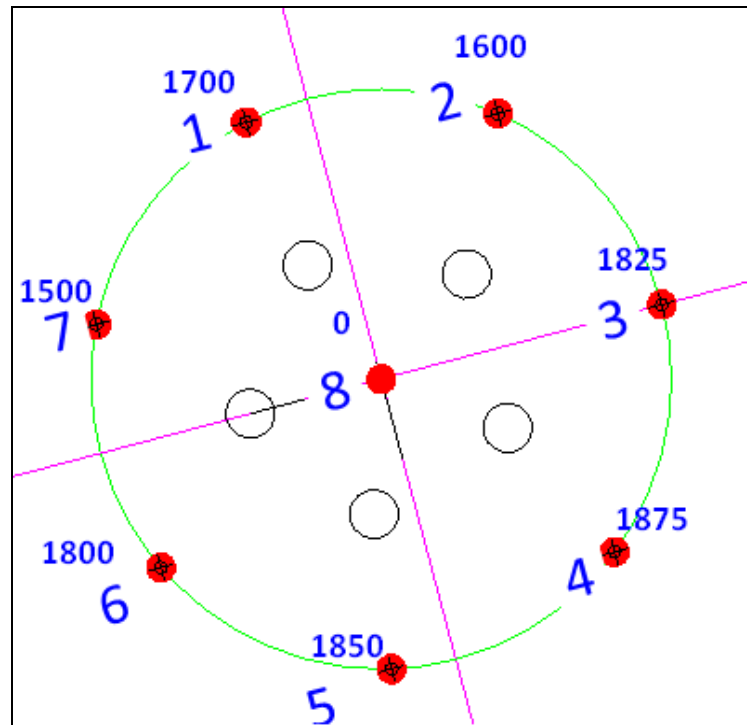


Ilustración 102. Secuencia de Tronadura chimenea piloto.

La precisión de estas perforaciones es primordial para lograr que la tronadura sea exitosa. En la Ilustración 103 se puede apreciar que la calidad de la perforación es buena, los aceros utilizados son los adecuados y no hubo desviaciones en las empataduras fuera de lo normal (< 2 veces el diámetro). Las desviaciones de estas perforaciones medidas en el fondo, son del orden de 0,25 –

0,30 [m] (Ver Ilustración 104) para longitudes de 15 [m]; es decir, hasta un 2 [%] de desviación máxima. Respecto de las longitudes, todas fueron a lo menos de 15 [m].

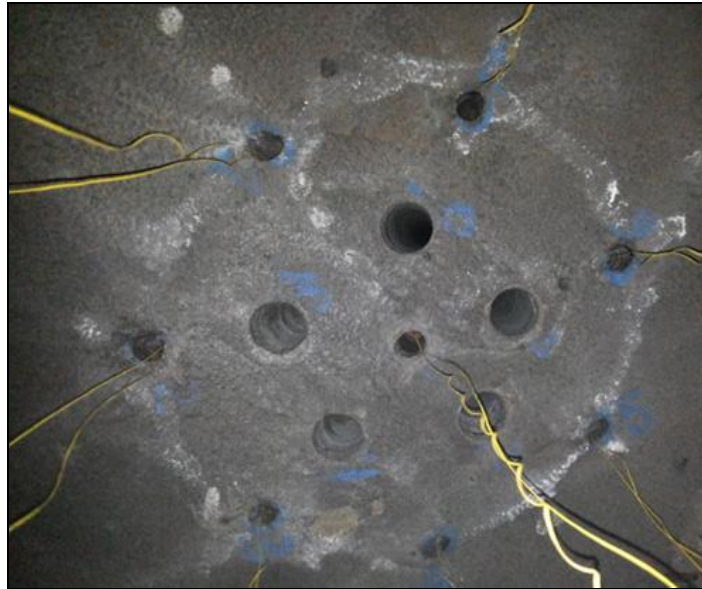


Ilustración 103. Resultados perforación chimenea piloto, prueba C7 UCL.

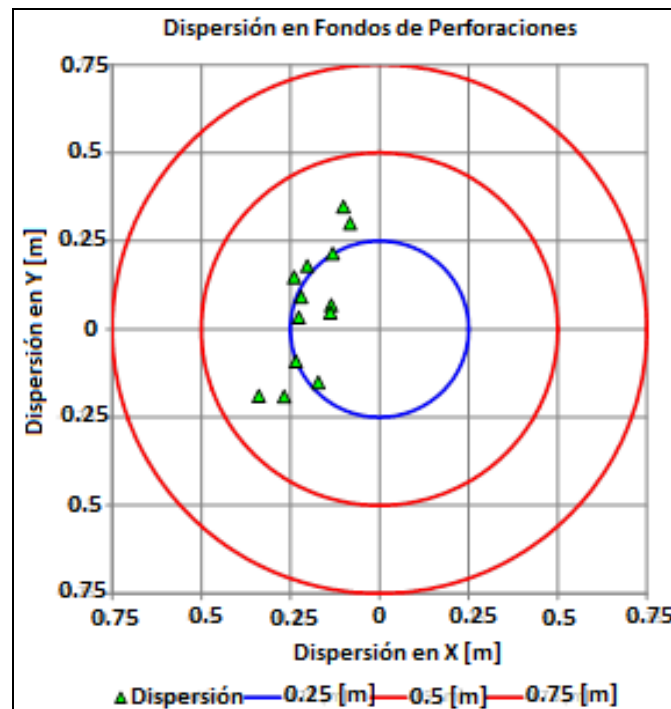


Ilustración 104. Dispersión en fondos de perforaciones.

En la Ilustración 105 se aprecia que el resultado de la tronadura fue exitoso y se alcanzó la altura y forma requerida. El diámetro fue superior cerca del techo de la labor, alcanzando 2,80 [m] de Hw a Fw y 4,45 [m] de Norte a Sur. Esta sobre excavación fue producto de la poca longitud de taco de las perforaciones de contorno y de la doble cara libre, generando un efecto cráter sobre el techo de la calle. No se observaron daños en el soporte del entorno de la calle producto de la tronadura.



Altura de la chimenea: 15.5 [m]

Ilustración 105. Fotografía resultado tronadura chimenea piloto, prueba C7 UCL.

e) Recuperación de altura de socavación y frente de hundimiento

Para recuperar altura de socavación con la chimenea y sus paradas radiales, es necesario tronar las paradas de levante también llamadas semi-cuñas. El diseño implementado en cada una de las calles afectadas se presenta en la Ilustración 106.

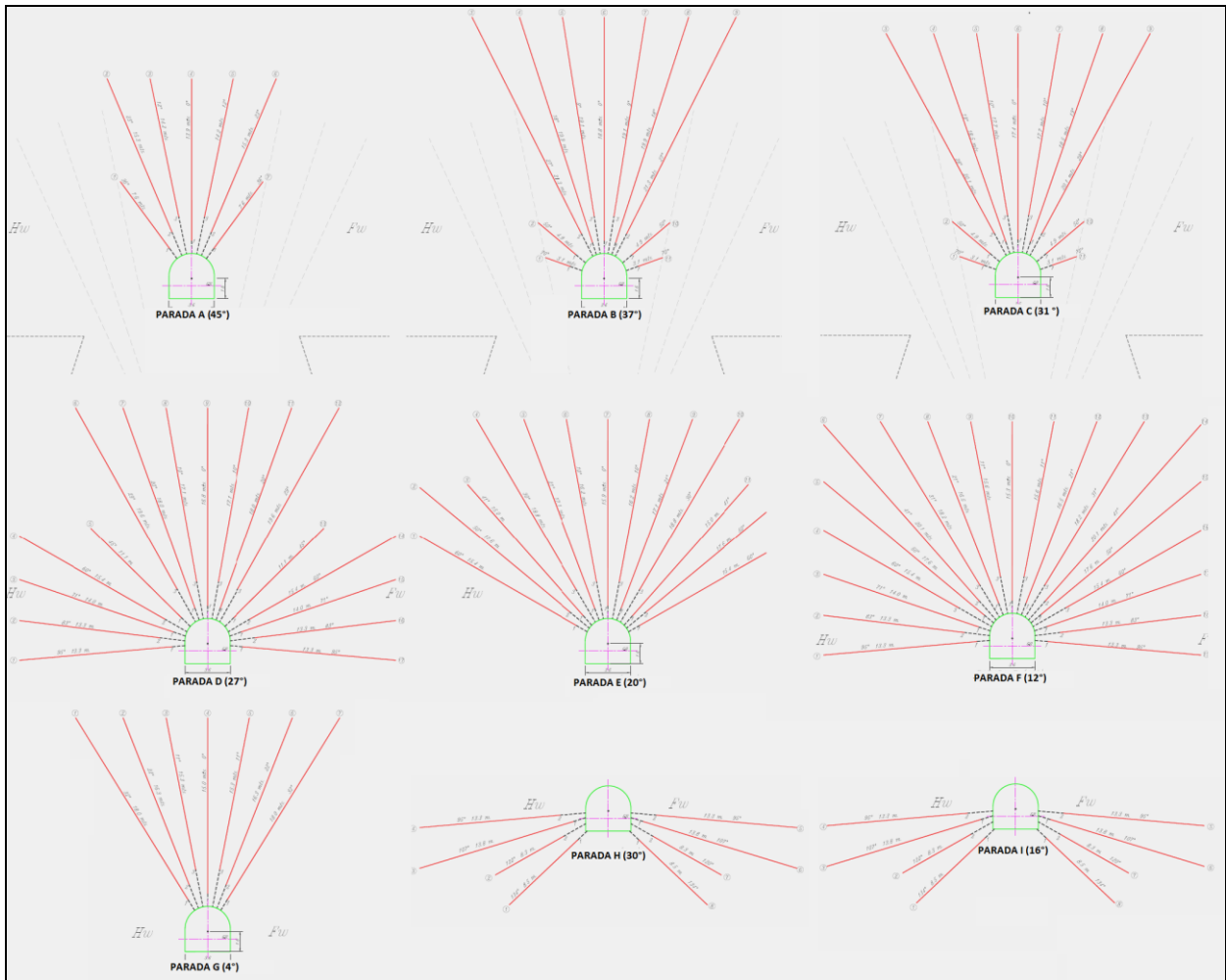


Ilustración 106. Detalle diseño paradas de levante.

El diseño contempla 7 paradas de levante o semi-cuñas ascendentes y 2 paradas descendentes que buscan eliminar losas remanentes.

Respecto a la secuencia de tronadura de cada una de estas paradas, se mantiene la adoptada para la de una parada radial. Comienza en el tiro de más abajo del lado cabeza, luego se va alternando con un tiro del lado patilla, con un retardo de 25 [ms] entre tiros. El retardo entre paradas es de 100 [ms] y su secuencia se indica en la Ilustración 107.

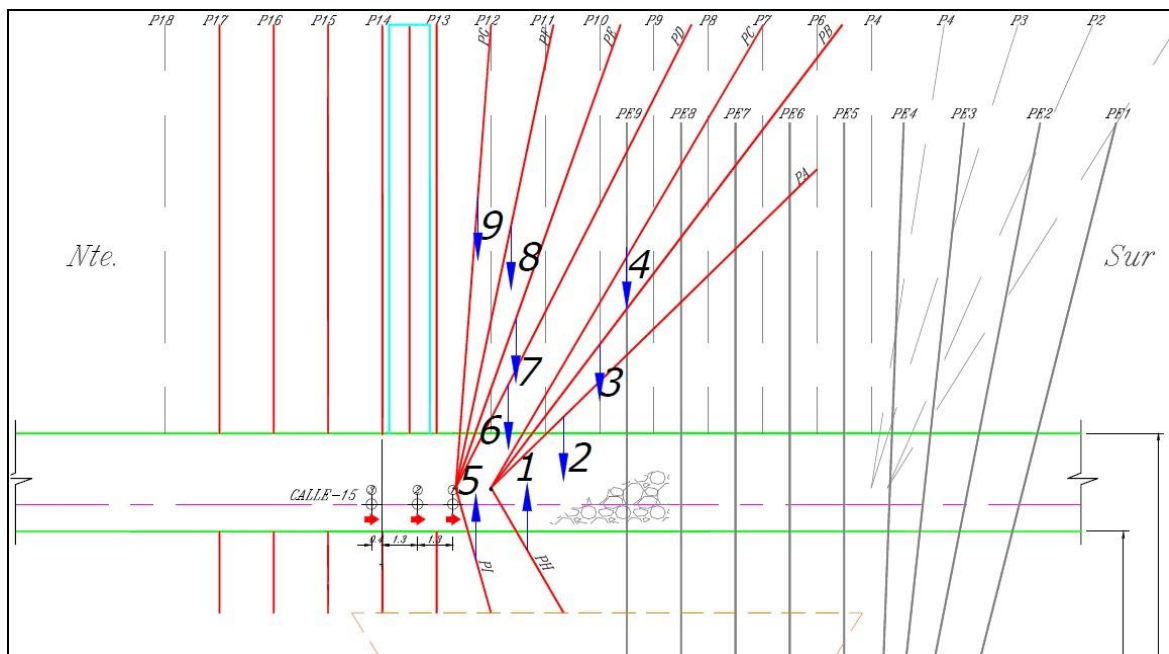


Ilustración 107. Secuencia de tronadura cuñas.

En primera instancia esta tronadura se realiza en dos fases: la primera del número 1 al 4, es decir PH-PA-PB y PC; y la segunda va del número 5 al 9, es decir PI-PD-PE-PF y PG, usando la galería como cara libre. El canalón o slot se incluye en la misma fase, para esto, la chimenea se ubica entre dos paradas radiales, las que entreguen las mejores condiciones para su ejecución.

Lo anterior varía de calle en calle, ya sea dependiendo de si se pueden perforar y/o cargar las semi-cuñas descendentes, así como también de la ubicación del slot. Lo primero puede significar realizar una tronadura sin considerar las paradas PH y PI (descendentes), y tronando en el orden PA-PB-PC-PD-PE-PF y PG, mientras que lo segundo considera proseguir con las paradas radiales (en caso de existir) entre el canalón y las paradas de levante.

A continuación se incluye el detalle de la tronadura en cada calle, según el siguiente orden y secuencia.

Tronadura de la C11:

- La primera fase se realizó el 28 de agosto, pudiéndose tronar las paradas PA-PB y PC.
- El 23 de septiembre se prosigue con la segunda fase, con las paradas PD-PE y PG, donde no fue posible cargar la parada PF. En la misma fase se prosigue con la parada 27 y con el canalón, el que se ubica entre las paradas 28 y 29 (Ilustración 108).
- Con 100 [ms] de retardo con respecto a las cuñas se comienza la parada 27 radial con secuencia de tronadura estándar.
- Luego de 100 [ms] se comienza la tronadura de la chimenea con la secuencia vista previamente en la prueba de la C7 del UCL.
- Posteriormente, con 125 [ms] de retardo, comienza la tronadura de las paradas radiales y central del canalón, con la secuencia que se aprecia en la Ilustración 108.

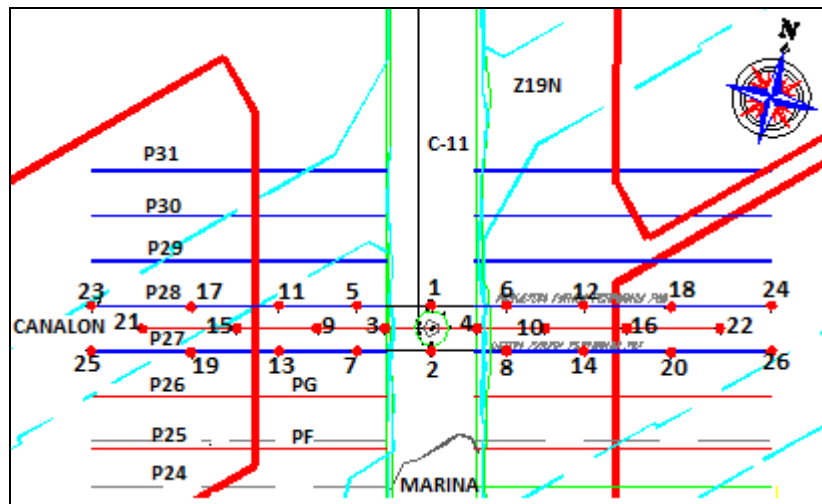


Ilustración 108. Secuencia de tronadura canalón C11.

- Finalmente, los tiros restantes de las paradas radiales pertenecientes al canalón se terminan con la secuencia estándar de los tiros radiales, seguidos por los tiros descendientes de la parada siguiente, en este caso corresponde la parada 29.

El resultado de la tronadura se ve en la Ilustración 109, con fotografías de la C11 tomadas el 25 de septiembre.



Ilustración 109. Fotografías post tronadura levante, C11 UCL (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).

Tronadura de la C13:

- Se inició el 21 de octubre, pudiéndose tronar sólo la segunda fase, correspondiente a las paradas PD-PE-PF y PG.
- En este caso no había parada radial entre cuñas y slot, por lo que luego de la tronadura de semi-cuñas, con un retardo de 650 [ms] se inició la tronadura de la chimenea.

- La secuencia de las paradas radiales y central pertenecientes al canalón, se aprecia en la Ilustración 110, donde además se nota la ubicación de la chimenea, entre las paradas 19 y 20.

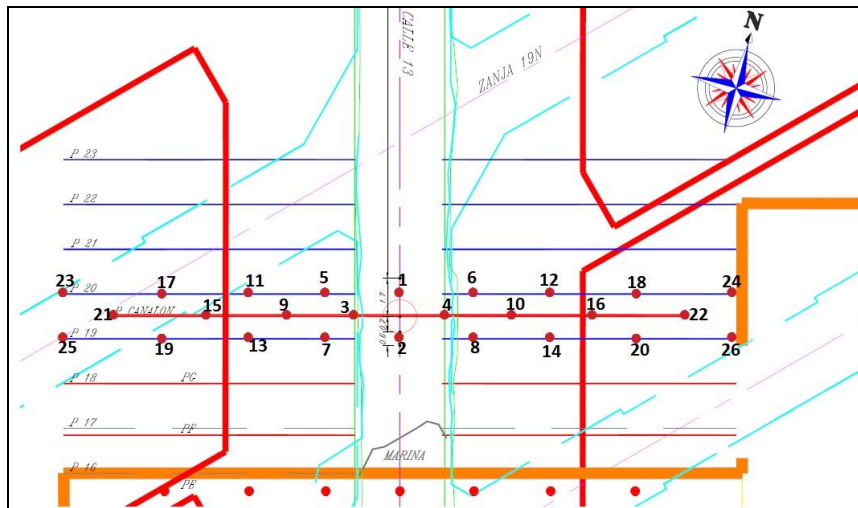


Ilustración 110. Secuencia de tronadura canalón C13.

Tronadura de la C14:

- La primera fase corresponde a todas las cuñas positivas, es decir, PA-PB-PC-PD-PE-PF y PG.
- El 23 de octubre se tronó la segunda fase, la que corresponde al canalón. Su secuencia se indica en los puntos siguientes.
- Tronadura de la chimenea.
- La secuencia de las paradas radiales y central correspondiente al canalón se presentan en la Ilustración 111.

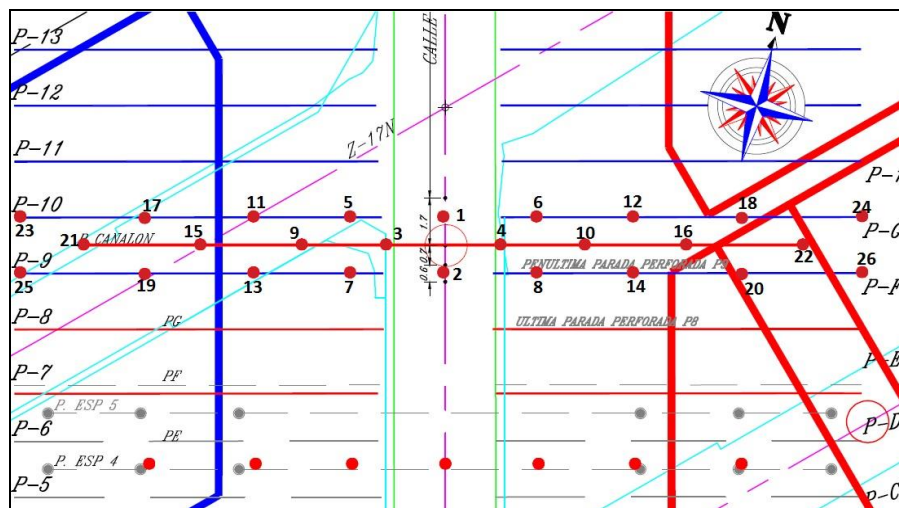


Ilustración 111. Secuencia de tronadura canalón C14.

La tronadura de la C15:

- La primera fase comprende las cuñas positivas PA-PB y PC, tronadura realizada el 24 de septiembre. Para apreciar el resultado de la tronadura de la primera fase se fotografió la C15 el 25 de septiembre (Ilustración 112).

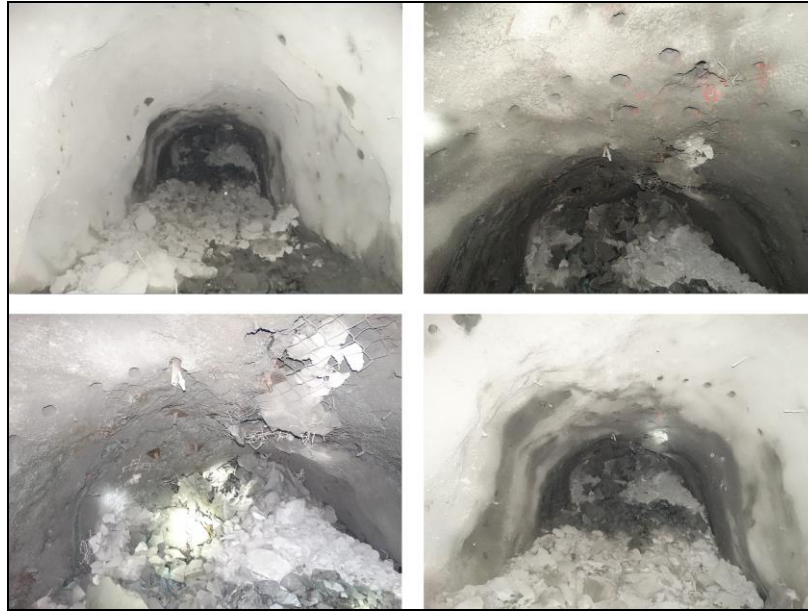


Ilustración 112. Fotografías post tronadura levante, C15 UCL (Superintendencia Mina Norte (b) 2014).

- Una vez removido el mineral de la calle se procede a realizar la segunda fase, el día 26 de septiembre. Esta fase se inició con las cuñas positivas que corresponden a las paradas PD-PE-PF y PG.
- Luego, no existe parada radial previa al canalón, por lo que se inicia la tronadura de la chimenea con la secuencia descrita en la prueba realizada en la C7 del UCL.
- Finalmente, se define el canalón con la secuencia de la Ilustración 113.

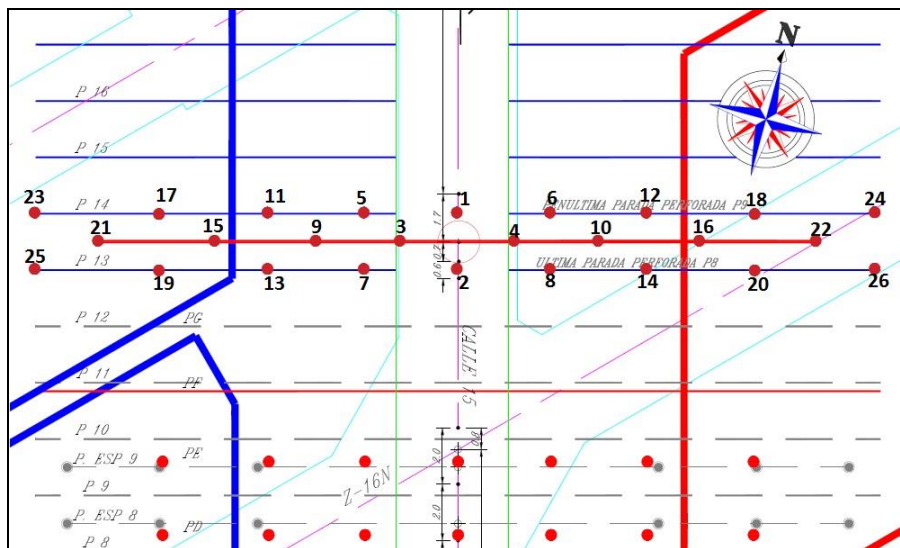


Ilustración 113. Secuencia de tronadura canalón C15.

En la C12 no se realizó la tronadura de cuñas, dado que la tronadura realizada desde el nivel de producción tuvo efectos positivos y fue posible cargar tal cual lo previsto por el diseño hacia el lado cabeza. Esto provocó un correcto quiebre del mineral, ya que seguido por una extracción adecuada se logró la propagación del hundimiento.

Para comprobar lo anterior se realizaron 3 perforaciones centrales, cuya auscultación permitió verificar la altura de columna deseada (Ilustración 114).

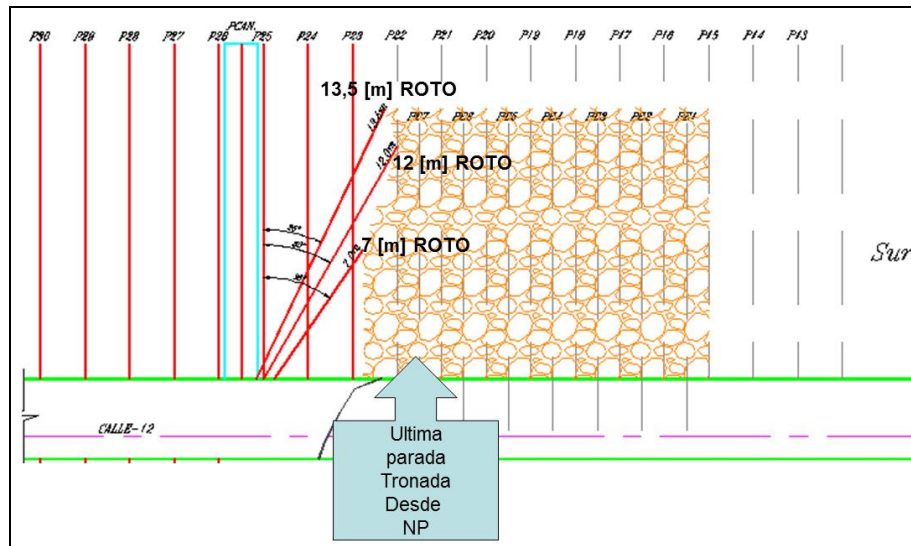


Ilustración 114. Auscultación especial C12 (Superintendencia Mina Norte (c), 2014).

El detalle de esta auscultación se entrega en la Tabla 17.

Tabla 17. Detalle auscultación especial C12.

Perforación	Ángulo perforado	Distancia de rotura [m]	Altura proyectada [m]
1	25°	7	5,8
2	30°	12	10,4
3	35°	13,5	12,5

Sumado a lo anterior, se verificó el estado de las perforaciones radiales ubicadas hacia el norte de las paradas tronadas desde el nivel de producción. Como se aprecia en la Ilustración 111, estas comienzan en la parada 23, cuyos tiros se encontraban en buenas condiciones hacia el lado cabeza; en tanto, las paradas 24, 25 y 26, se encontraban en buen estado hacia ambos lados. Por esta razón se decidió realizar la tronadura sin canalón, tronando estas 4 paradas de manera simultánea el día 24 de octubre.

El calendario que se presenta en la Tabla 19, posee en la parte superior las fechas informadas para las actividades mencionadas. En la Tabla 20 se incluye la leyenda para este calendario.

Tabla 18. Calendario de actividades.

Calle	19-Mar	21-Mar	03-Abr	08-Abr	11-Abr	23-Abr	07-May	09-May	28-Ago	23-Sept	21-Oct	23-Oct	24-Oct
10													
11													
12													
13													
14													

Tabla 19. Leyenda para calendario de actividades

	Inicio extracción de mineral
	Perforación desde NP
	Tronadura tiros desde NP
	Tronadura de cuñas desde NH
	Tronadura chimenea y/o slot
	Tronadura paradas radiales
	Sin actividad de P&T o Sin información

Durante la realización de cada una de las actividades de perforación y tronadura, se suspende la extracción de mineral de las calles interceptadas por el trabajo o en caso de ser necesario se interrumpen todas las calles del sector.

Se aprecia que existen diferencias de tiempos entre una calle y otra, dicho de otra manera no existe una temporalidad definida para la realización de las actividades. Esto se debe a que cada una de las calles presenta condiciones distintas y si bien existe un orden estratégico para lograr los objetivos planteados, cada calle se trabaja como un caso en particular.

6. ACTIVIDADES CLAVES

Luego de la descripción realizada del caso de estudio y dados los positivos resultados de las acciones tomadas, es posible identificar las actividades más relevantes realizadas en el desarrollo del trabajo que, ante la ocurrencia de daños severos en el nivel de hundimiento, permitieron recuperar el frente, reiniciar el sistema de explotación y evitar merma productiva, para el caso de estudio en particular.

6.1 Resumen de actividades claves.

1. Primero, se debe aislar la zona afectada hasta apreciar una mejoría de las condiciones del evento, de tal manera de realizar los trabajos de forma segura.
2. Otra acción inmediata es generar un grupo de trabajo con las competencias necesarias para estudiar la situación y controlarla, definiendo inicialmente los objetivos de la tarea.
3. Luego se debe iniciar el levantamiento de información para obtener detalles de la situación.
4. Se deben tomar fotografías de la situación inicial para poder evaluar a futuro la evolución de los daños.
5. Se evalúan los daños según criterios geomecánicos y se realiza un mapeo de la situación, cuantificando estos daños.
6. Se monitorea constantemente la situación, para apreciar la evolución del mecanismo y sus daños, teniendo especial cuidado en el monitoreo sísmico.
7. El grupo de trabajo define sus criterios de éxito en cada una de las áreas de trabajo, de manera de tener metas concretas.
8. Se hace auscultación de perforaciones en el UCL hacia la zona de daños y hacia los pilares, para obtener información adicional y específica de la propagación de los daños y las condiciones del macizo rocoso en cada calle afectada.
9. Junto con esta información se levanta información topográfica periódicamente, para verificar la deformación de las galerías, así como también un levantamiento geológico de aguas y estructuras.
10. Se define la planificación de la extracción, considerando la altura de columna extraída en los puntos de extracción, teniendo como objetivo equiparar los perfiles de extracción y disminuir los esfuerzos. En otras palabras, se incrementa la altura de columna extraída de los puntos de extracción, con la finalidad de generar interacción entre puntos de extracción contiguos y así evitar posibles pilares remanentes sobre las calles, los cuales pueden transmitir cargas puntuales.
11. Se define el diseño de la solución de P&T, cuyo objetivo es lograr recuperar el frente de hundimiento y a la vez regularizar la geometría del crown pillar en la zona de daños. Para esto en algunos casos es necesario perforar hacia el UCL desde el nivel de producción, para poder quebrar la zona de daños que no sea posible socavar desde el UCL. En este caso, al decidir realizar la tronadura hasta la extensión del techo del UCL se debe modificar el diseño, de manera de hacer más eficiente la metodología desde el punto de vista del tiempo y de costos asociados. La Ilustración 118 presenta el diseño propuesto.

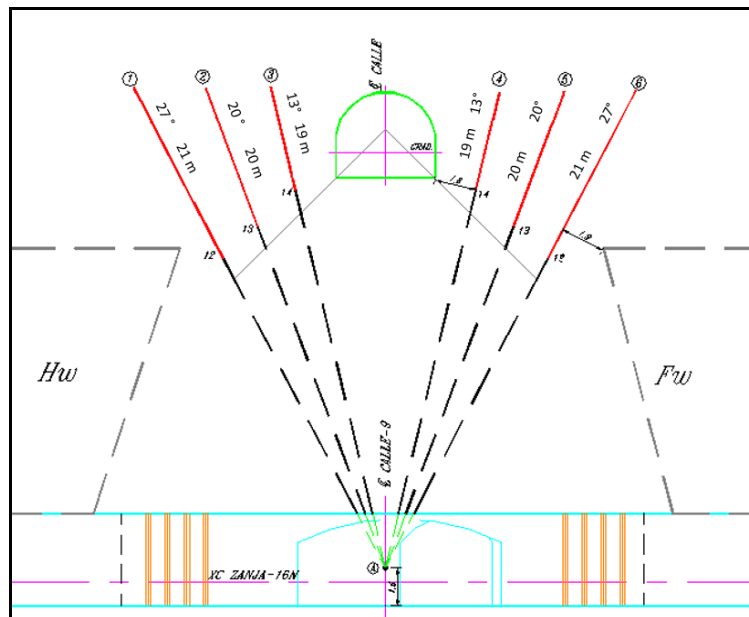


Ilustración 115. Diseño estándar modificado de perforaciones realizadas desde el nivel de producción.

12. En segundo lugar se realizan perforaciones desde el mismo nivel de hundimiento, por detrás de la zona de daños (cuñas y canalón), donde se busca recuperar altura de socavación y de esta manera retomar el método de explotación.
13. Finalmente, la solución puede tener variaciones según las condiciones específicas de cada calle, dadas por observaciones de terreno y/o de la información levantada por las distintas áreas. Ejemplos de esto son, en primer lugar lo ocurrido en la C10 del UCL donde fue posible recuperar algunas perforaciones radiales y realizar la socavación, y en segundo lugar la experiencia de la C12, donde no fue necesario realizar las paradas de levante, ya que la tronadura desde el nivel de producción fue suficiente.

7. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

En la extracción se implementó el uso de TAGS, esta herramienta es fundamental para controlar de manera precisa la extracción; el conocimiento de las alturas de columna extraída permite mantener un perfil de extracción adecuado a las recomendaciones geomecánicas.

En las actividades claves identificadas se realiza una recomendación en el diseño de la solución, modificando el largo de las perforaciones desde el nivel de hundimiento solo hasta la extensión del techo de la galería del UCL. Esto reduce el costo de perforación y el tiempo que toma el proceso, haciéndolo más eficiente.

El caso de estudio es una fuente de información valiosa, ya que fue posible reiniciar el frente de hundimiento, y más importante aún, se pudo continuar con el método de explotación, sin necesidad de implementar variantes en este.

A lo largo de la historia de la Mina El Teniente, las experiencias relacionadas con estallidos de roca y colapsos han generado un aprendizaje que incide directamente sobre el método de explotación y su evolución; el caso de estudio no fue la excepción puesto que las actividades claves desarrolladas para recuperar el frente de hundimiento en el caso de estudio, fueron posibles, gracias al sistema de explotación aplicado (variante convencional), ya que al encontrarse las bateas abiertas por debajo del frente de hundimiento, permitieron distender esfuerzos mediante la extracción de mineral. Lo anterior no hubiese sido posible en hundimiento previo o avanzado. Esto puede significar una ventaja para el panel caving convencional, la cual se puede considerar para elegir este sistema, por sobre las mencionadas, para proyectos futuros.

La temporalidad de los sucesos no tiene coherencia alguna entre una calle y otra, esto se debe a que cada galería presenta reacciones diferentes a los esfuerzos, por lo que las condiciones geomecánicas y de desarrollo varían. Por esto, cada calle se trabajó de manera independiente.

Dado lo anterior, si bien las actividades claves pueden significar recuperar el frente de hundimiento en eventos similares, se recomienda estudiar en detalle los diferentes matices que pueden tener estos eventos. Es así, como el levantamiento de información cobra vital importancia.

8 BIBLIOGRAFÍA

1. ARANEDA, O. & SOUGARRET, A., 2007. Lessons learned in cave Mining: El Teniente 1997-2007.
2. ALVIÑA, N., 2008. Análisis numérico del comportamiento dinámico de túneles ante eventos sísmicos, caso de estallidos de roca en El Teniente. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.
3. BIZAMA, C., 2014. Recomendaciones Geomecánicas para Programa de Producción Mensual (PPM) de Marzo 2014, Sectores Reservas Norte y Corbata. División El Teniente, Codelco Chile.
4. BRAVO, C., 2010. Recuperación de reservas colapsadas en minas panel caving. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
5. CAVIERES, P., 1999. Evolución de los métodos explotación en la mina El Teniente.
6. CAVIERES, P., 2007. Dimensionamiento de mallas de extracción, bateas recolectoras y pilar corona para método panel caving en roca primaria, mina El Teniente.
7. COCHILCO, 2014. Informe tendencias del mercado del cobre. Abril – Junio.
8. CODELCO CHILE, DIVISIÓN EL TENIENTE, 2007. Rock Preconditioning application in virgin caving condition in a panel caving mine.
9. CODELCO CHILE, DIVISIÓN EL TENIENTE, 2014. Presentación Guía de prácticas panel caving convencional.
10. CUBILLOS, J., GONZALEZ, R., GUZMAN, J., 2013. Plano geológico integrado mina Reno – Dacita - Pilar Norte, nivel de hundimiento (2121). Superintendencia Geología, División El Teniente, Codelco Chile.
11. GERENCIA DE RECURSOS MINEROS Y DESARROLLO (GRMD), 2014. Nota Interna: Actualización plano condición de infiltración de agua, Sector Reservas Norte (Centro - Fw). División El Teniente, Codelco Chile.
12. INFOMINE USA, INC. COSTMINE, 2011. Mining cost service, section CM, Cost Models.
13. MASSMIN, 2008. Preconditioning implementation on rock bulks in Codelco Chile and its results.
14. PARDO, C., 2014. Implementación variantes de explotación del panel caving en Mina El Teniente. Codelco Chile, División El Teniente.
15. SAAVEDRA, L., 2007. Diseño óptimo de experimentos para estimar el campo de esfuerzos en el macizo rocoso en torno al frente de avance de una cavidad minera. Memoria de Ingeniero Civil Matemático. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

16. SUPERINTENDENCIA GEOLOGÍA, 2014. Presentación Antecedentes geológicos. División El Teniente, Codelco Chile.
17. SUPERINTENDENCIA MINA NORTE, 2012. Presentación Visita Pilar Norte y Reservas Norte. División El Teniente, Codelco Chile.
18. SUPERINTENDENCIA MINA NORTE, 2014. (a) Presentación Parámetros operacionales Sector Reservas Norte. División El Teniente, Codelco Chile.
19. SUPERINTENDENCIA MINA NORTE, 2014. (b) Archivo fotográfico 2014. División El Teniente, Codelco Chile.
20. SUPERINTENDENCIA MINA NORTE, 2014. (c) Presentaciones Comité de seguimiento Grupo Tarea Mina Reservas Norte. División El Teniente, Codelco Chile.

9 ANEXOS

ANEXO A: Nomenclatura interior mina

La nomenclatura ocupada en la mina El Teniente tiene la particularidad de poseer términos propios de ésta, por lo que es conveniente detallarla para comprender menciones a futuro de estos términos.

Orientación

Un esquema básico de lo que es la orientación en la mina se presenta en la Ilustración 118, como se aprecia los puntos cardinales Oeste y Este fueron intercambiados por Hw (Cabeza) y Fw (Patilla) respectivamente.

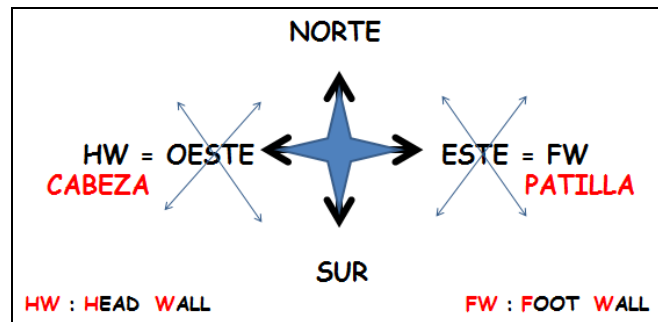


Ilustración 116. Nomenclatura de orientación interior mina.

Galerías

Las galerías de la mina tienen distintas denominaciones según su orientación y ubicación. Como se aprecia en la Ilustración 119, existe una nomenclatura antigua que generalmente se encuentra en los barrios cívicos de la mina, mientras que la nomenclatura moderna es más recurrente en los niveles de producción.

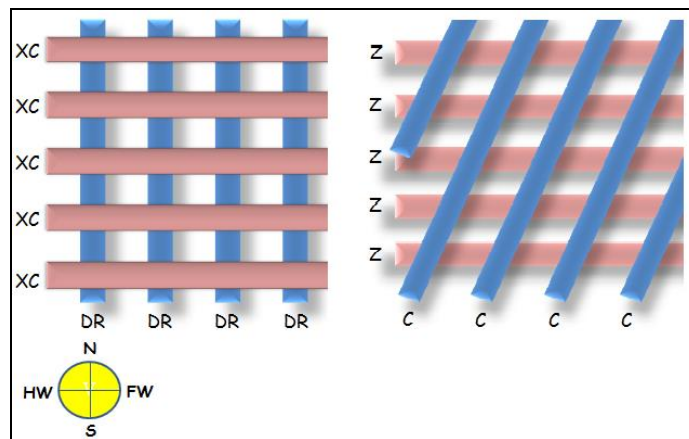


Ilustración 117. Nomenclatura de orientación. Izquierda: Barrio cívico - Derecha: Nivel de producción.

La nomenclatura se detalla a continuación:

- C: Calle (Orientación N-S).
- Z: Zanja (Orientación Hw-Fw).
- DR: Drift (Orientación N-S).
- XC: Cruzado (Orientación Hw-Fw).

ANEXO B: Cálculo de beneficio económico reservas afectadas.

Datos:

Tabla 20. Datos para cálculo de beneficio.

Reservas de mineral, m	1.452.600	[ton]
Ley media, l	0,9	[%]
Costo de mina, Cm	10	[US\$/ton]
Costo de planta, Cp	6	[US\$/ton]
Costo de fundición y refinación, Cfy	2	[US\$/ton]
Precio del cobre, P	3,1	[US\$/libra]
Recuperación, R	85	[%]

El precio del cobre utilizado fue el que se tuvo durante los meses que ocurrió el evento (Cochilco, 2014). El resto de los datos requeridos son supuestos.

Fórmula de cálculo de beneficio:

$$B = (P - Cfy) * R * l * m - (Cm + Cp) * m$$

$$\text{BENEFICIO} = 52.656.023 \text{ [US\$]}$$

