



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

**ESTUDIO DE FLUJO GRAVITACIONAL DE MATERIAL  
HUNDIDO POR MEDIO DE TRAZADORES INTELIGENTES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**DIEGO LUIS CARLOS GARCÉS ALARCÓN**

**PROFESOR GUÍA:**

RAÚL CASTRO RUIZ

**MIEMBROS DE COMISIÓN:**

NICOLÁS MONTECINO BASTÍAS

ELEONORA WIDZYK-CAPEHART

SANTIAGO DE CHILE  
2015

## RESUMEN

Un entendimiento más adecuado sobre el comportamiento del flujo gravitacional es un aspecto clave para el diseño, operación y éxito de los métodos por *caving*. Dentro de la literatura, el fenómeno del flujo de material fragmentado ha sido tema de investigación por bastantes años. Sin embargo, el entendimiento actual se ha obtenido a través de modelamiento físico y numérico, y un limitado número de pruebas a escala mina.

Codelco-Chile ha ejecutado pruebas experimentales utilizando la tecnología de trazadores inteligentes. Estas pruebas se implementaron en Bloque-2 de mina Esmeralda, División El Teniente, que corresponde a un sector emplazado en roca competente y explotado por *panel caving* con hundimiento convencional. Mina Esmeralda también ha considerado cambiar el diseño actual, desde un espaciamiento entre puntos de extracción de 20 m a 24 m, para aumentar la estabilidad del nivel productivo. Los datos de la prueba se comenzaron a registrar desde agosto de 2012 hasta enero de 2015.

Los objetivos principales de esta investigación son examinar la geometría de la zona de extracción y su evolución, junto con obtener datos que permitan entender el flujo gravitacional para mejorar aspectos del diseño minero y control de tiraje.

La metodología de trabajo incluye la recopilación y análisis de datos de extracción, trazadores recuperados y granulometría. La información desde trazadores se procesa empleando una interpolación lineal de la posición inicial de los marcadores y el tonelaje acumulado de extracción en cada zanja.

Aproximadamente el 53 por ciento de los marcadores ha sido recuperado de la región de prueba (159 marcadores registrados). Los resultados experimentales sugieren que el flujo gravitacional es más o menos regular dependiendo del tonelaje extraído y la diferencia de fragmentación observada en los puntos de extracción. Este hallazgo muestra que el material removido no sólo tiene un impacto significativo en el comportamiento del flujo y su crecimiento, sino que también influye en el movimiento de diferentes tamaños de partículas dentro de la columna de mineral.

Además, los resultados indican que el espaciamiento actual entre puntos de extracción entrega las condiciones necesarias para la interacción entre zonas de flujo adyacentes. El valor promedio para la altura de interacción y ángulo de flujo se estimó en 26 m y 67 grados, respectivamente, permitiendo que el mineral sea extraído desde el pilar mayor y pilar menor.

Finalmente, este estudio complementa el actual estado del arte relacionado al flujo gravitacional. Más aún, la prueba en Bloque-2 de mina Esmeralda valida la aplicación de la tecnología de trazadores inteligentes para proyectos futuros, y se evidencia que los resultados de esta investigación son claves para el diseño del nivel de producción y el control de la extracción para Mina El Teniente.

## ABSTRACT

Better understanding of gravity flow behavior in panel caving operations is a key aspect to the design, operation and success of caving methods. In the literature, the phenomenon of broken material flow has been investigated for many years. Nevertheless, current understanding has been gained using physical modeling, numerical and limited number of full-scale tests.

*Codelco-Chile* has carried out trials using Smart Markers Technology. Tests have been conducted in Esmeralda mine's Block-2 at *El Teniente* Mine, which is a sector located in competent rock using conventional undercutting. Esmeralda Mine also has considered a change on the design from a drawpoint spacing of 20 m to 24 m in order to increase the stability of the production level. Data started to be collected from August 2012 up to January 2015.

The main objectives of this investigation are to examine extraction zone geometry and its evolution, as well as to get data that allows understanding gravity flow for design and draw control purposes.

Methodology of the tests include the collection and analysis of tonnage, markers and fragmentation data. The data from the markers was analyzed using a linear interpolation of both initial position of markers and drawbell accumulated tonnage of recovery.

Approximately 53 per cent of markers have been recovered from the test region (159 markers registered). The experimental results suggest that gravity flow was found to be more or less regular depending on the tonnage drawn and the difference on fragmentation observed in drawpoints. This finding shows that material drawn has significant impact on both gravity flow behavior and its growth, and on the movement of different particle sizes inside the column of ore.

Furthermore, results indicate that current drawpoint spacing provide the conditions for interaction of adjacent flow zones. The average value of the height of interaction and angle of draw was estimated to be 26 m and 67 degrees, respectively, allowing ore to be extracted from the major and minor apex.

Finally, this study complement current state-of-art related to the gravity flow. Moreover, the full-scale trial adopted at Esmeralda Mine's Block-2 validates the usage of Smart Marker Technology for future projects and the results of this research has been found to be the key factor in the production level design and production control for *El Teniente* Mine.

## AGRADECIMIENTOS

*Primero que todo, agradezco a mi familia, porque a mi familia le debo todo, desde mis fracasos hasta mis triunfos. A mis padres, quienes dedicaron gran parte de su vida, a mi vida; gracias por ser mi sustento y pilar, su amor inconmensurable, por hacerme quien soy (algo bueno, o malo?), y en fin, por todo lo que he vivido en este pequeño camino. A mi hermano, te agradezco el apoyo desde que comencé este proceso, gracias por compartir tu tiempo conmigo, tus ideas, tu música, tu vida, y cómo no, gracias por ser mi hermano!! Gracias a ustedes por aguantarme todo el tiempo.*

*Quiero agradecer a mi nueva familia, esa que se conoce por “destino”, que entra en tu vida, la complementa y la mejora: Nadia. Gracias por tu apoyo, amor, ternura, pacienciaaaa, tus detalles, ideas, por compartir tu vida conmigo, por entender, y las veces que no fue así, bueno, no te lo agradezco tanto. Todo lo que soy también es gracias a ti. Eres uno de mis cuatro tesoros más amados.*

*También debo mencionar a mis abuelitos, por entregarme todo su amor y paciencia a lo largo de esta vida. Por contarme sus historias y por aconsejarme innumerables veces. A ti, tata Luis, que partiste tan temprano, te agradezco la simpleza, sabiduría y cariño todas las veces que estuve contigo. Cuídanos donde quieras que estés; este logro también te pertenece.*

*Por otro lado, deseo extender mi agradecimiento al profesor Raúl Castro, por su confianza, apoyo, opinión y rigurosidad para concluir este estudio. A mi profesor co-guía, Nicolás Montecino, por guiarme y preocuparse de este trabajo. Además, le agradezco a don Manuel Montecino y don Mauricio Meléndez, por confiarme este proyecto; a Eduardo Viera, porque sin tu ayuda nada de esto podría haberse logrado, gracias por formar este equipo de trabajo, y sobre todo, por soportarme varios meses en la mina, en Colón, y en Rancagua.*

*A la gente de la SGP, siempre estuvieron apoyándome, nunca me negaron información ni su ayuda, y porque me incluyeron como parte de la familia desde el día en que llegué. Gracias C. Hernández, P. Miranda, H. Rebolledo, Ma. Mejías, E. (a que zí) Diez, F. Llanos, S. Urbina, Manota, P. Álvarez.*

*A mis amigos: Diego y Pablo, por ser mis compañeros de vida, de risas y juergas; Felipe, José y Bernardo, porque siempre han estado en todo momento... Sin ustedes, la vida sería un desierto.*

*A la gente de la universidad, quienes me ayudaron a sacar adelante este trabajo, y los que no, también les agradezco por compartir conmigo durante estos años: Nachín, Javi, Carlos Aedo, Osito, Maty, Mono, Joaquín, Muuuurci, Lucho, Alfonso (el más buscado de Rancagua), Jano, Seba, Mineritos F.C., Δ, Rupe, Acro. A la gente de BCLab – BCTec: Mena, Doli, René, Isaac, Pancho Armijo y Seba Valerio.*

*A la música, compañera de mis días, porque cómo dijo un sabio: “sin música la vida sería un error”. Y hablando de música, le agradezco a Pink Floyd por existir, porque además de ser un aporte sublime a la humanidad, me otorgó el apellido. Adicionalmente, debo mencionar a lo más grande (después de Pink Floyd, obviamente): Colo-Colo. El equipo perfecto, que mezcla el sufrimiento y la felicidad.*

*A ti Juanita, que ya no nos acompañas; gracias por ser la madre del departamento y por tener siempre una sonrisa para nosotros. Este informe está atrasado, más atrasado que cualquier otro que entregué, pero este trabajo te lo dedico, porque sin tu ayuda no podría haber llegado hasta donde llegué. También agradezco a Luchito, por su buena onda, amabilidad y paciencia para echarme del Búnker.*

Y honraremos tu nombre, Internado, combatiendo en las lides del bien...

*A mis cuatro amores...*

*Vivir no es sólo existir,  
sino existir y crear,  
saber gozar y sufrir  
y no dormir sin soñar.  
Descansar, es empezar a morir...*

## TABLA DE CONTENIDO

### CAPÍTULO 1

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1.    Preámbulo.....	1
1.2.    Objetivos del estudio .....	2
1.3.    Alcances del estudio.....	2
1.4.    Hipótesis de la investigación.....	2
1.5.    Justificación de la investigación.....	3
1.6.    Metodología general de desarrollo.....	3
1.7.    Estructura del trabajo de investigación .....	4

### CAPÍTULO 2

<b>ESTADO DEL ARTE –ESTUDIOS DE FLUJO GRAVITACIONAL PARA LA MINERÍA DE HUNDIMIENTO</b> .....	5
2.1.    Introducción .....	5
2.2.    Modelamiento físico a escala .....	5
2.2.1.    Modelos físicos de arena .....	6
2.2.2.    Modelos físicos de grava .....	9
2.2.3.    Resumen de modelos físicos a escala.....	9
2.3.    Modelos matemáticos para el flujo gravitacional .....	10
2.4.    Pruebas de flujo gravitacional a escala mina .....	11
2.4.1.    Pruebas en minería de <i>sublevel caving</i> .....	12
2.4.2.    Pruebas en minería de <i>block/panel caving</i> .....	12
2.5.    Modelos de flujo gravitacional.....	13
2.5.1.    Modelo de Laubscher .....	13
2.5.2.    Modelo de Susaeta.....	15
2.6.    Modelo conceptual de flujo gravitacional para el campo cercano en mina <i>Ridgeway Deeps</i> 16	
2.7.    Conclusiones del capítulo.....	19

### CAPÍTULO 3

<b>ANTECEDENTES DE LA PRUEBA DE TRAZABILIDAD EN BLOQUE-2 DE MINA ESMERALDA</b> .....	20
3.1. Antecedentes de mina Esmeralda.....	20
3.1.1. Descripción general de Bloque-2 .....	21
3.1.2. Aspectos geomecánicos de Bloque-2 .....	21
3.1.3. Diseño minero de Bloque-2.....	22
3.1.4. Diseño de perforación y tronadura .....	23
3.1.5. Estudio de fragmentación en mina Esmeralda .....	24
3.2. Sistema de trazadores inteligentes.....	25
3.2.1. Descripción de la tecnología de marcadores inteligentes.....	25
3.2.2. Principales componentes del sistema de marcadores inteligentes.....	26
3.3. Prueba de trazabilidad de flujo gravitacional en sector Bloque-2.....	27
3.3.1. Diseño de campo cercano para la instalación de trazadores inteligentes .....	27
3.3.2. Instalación operacional de trazadores para prueba de campo cercano .....	28
3.3.3. Instalación operacional de trazadores en nivel Teniente 5 Acarreo .....	29
3.3.4. Instalación de lectores .....	30
3.4. Conclusiones del capítulo.....	31

### CAPÍTULO 4

<b>METODOLOGÍA DE TRABAJO</b> .....	32
4.1. Introducción .....	32
4.2. Descripción de etapas de trabajo para la investigación.....	32
4.2.1. Etapa I: Generación de la base de datos .....	32
4.2.2. Etapa II: Interpolación lineal de datos –procesamiento de información .....	33
4.2.3. Fase III: Análisis de variables operacionales .....	34
4.2.4. Fase IV: Generación del modelo conceptual de flujo gravitacional.....	35
4.3. Criterios para el análisis de datos mediante interpolación lineal .....	35
4.4. Conclusiones del capítulo.....	36

## CAPÍTULO 5

<b>PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	37
5.1. Introducción .....	37
5.2. Procesamiento de datos y análisis de variables operacionales .....	38
5.2.1. Análisis en zanja Z-30 .....	39
5.2.1.1. <i>Extracción de material en zanja Z-30</i> .....	39
5.2.1.2. <i>Interpolación de la zona de extracción en zanja Z-30</i> .....	40
5.2.1.3. <i>Granulometría observada en zanja Z-30</i> .....	42
5.2.2. Análisis en zanja Z-31 .....	43
5.2.2.1. <i>Extracción de material en zanja Z-31</i> .....	43
5.2.2.2. <i>Interpolación de la zona de extracción en zanja Z-31</i> .....	44
5.2.2.3. <i>Granulometría observada en zanja Z-31</i> .....	46
5.2.3. Análisis en zanja Z-32 .....	47
5.2.3.1. <i>Extracción de material en zanja Z-32</i> .....	47
5.2.3.2. <i>Interpolación de la zona de extracción en zanja Z-32</i> .....	48
5.2.3.3. <i>Granulometría observada en zanja Z-32</i> .....	50
5.2.4. Análisis de zanja Z-33 .....	51
5.2.4.1. <i>Extracción de material en zanja Z-33</i> .....	51
5.2.4.2. <i>Interpolación de la zona de extracción en zanja Z-33</i> .....	52
5.2.4.3. <i>Granulometría observada en zanja Z-33</i> .....	54
5.2.5. Análisis de zanja Z-34 .....	56
5.2.5.1. <i>Extracción de material en zanja Z-34</i> .....	56
5.2.5.2. <i>Interpolación de la zona de extracción en zanja Z-34</i> .....	57
5.2.5.3. <i>Granulometría observada en zanja Z-34</i> .....	59
5.2.6. Resumen de los resultados obtenidos .....	60
5.3. Análisis de la zona de extracción .....	60
5.3.1. Interacción de la zona de extracción.....	60
5.3.1.1. <i>Análisis de interacción sobre el pilar mayor</i> .....	61
5.3.1.2. <i>Análisis de interacción sobre el pilar menor</i> .....	61
5.3.2. Recuperación de trazadores desde nivel Teniente 5 Acarreo .....	62
5.4. Discusión general del capítulo .....	64
5.4.1. Influencia de la extracción en el comportamiento del flujo gravitacional .....	64
5.4.2. Comportamiento de la zona de extracción en campo cercano.....	65
5.4.3. Influencia de la granulometría en el comportamiento del flujo gravitacional.....	67



5.4.4.	Relación entre la extracción y granulometría del material .....	68
5.4.5.	Desempeño del diseño minero para el caso de estudio .....	69
5.5.	Conclusiones del capítulo.....	71
 <b>CAPÍTULO 6</b>		
<b>MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO GRAVITACIONAL PARA LA ZONA DE EXTRACCIÓN EN EL CAMPO CERCANO.....</b>		
6.1.	Introducción .....	73
6.2.	Antecedentes generales .....	74
6.3.	Modelo conceptual de flujo gravitacional en el campo cercano .....	74
6.4.	Discusión general del capítulo .....	76
6.5.	Conclusiones del capítulo.....	77
 <b>CAPÍTULO 7</b>		
<b>CONCLUSIONES DEL ESTUDIO .....</b>		
7.1.	Preámbulo.....	78
7.2.	Conclusiones de la investigación .....	79
7.2.1.	Comportamiento del flujo gravitacional en el campo cercano .....	79
7.2.2.	Desempeño del diseño minero en Bloque-2 .....	80
7.2.3.	Prueba de trazabilidad en Bloque-2.....	80
7.3.	Recomendaciones y enfoque a futuro .....	80
 <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		
<b>ANEXO A.....</b>		
<b>ANEXO B.....</b>		
<b>ANEXO C.....</b>		
<b>ANEXO D.....</b>		

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

*El presente capítulo entrega la introducción al estudio de flujo gravitacional empleando trazadores inteligentes, donde se presenta un contexto general del tema abordado; objetivos, alcances, hipótesis y justificación de la investigación; metodología de análisis y finalmente, la estructura de esta investigación.*

### 1.1. PREÁMBULO

Durante el último tiempo, los métodos de hundimiento, referidos también como métodos no soportados (Brown, 2003), se han convertido en métodos de minería masiva elegidos preferentemente, y se espera que continúe esta tendencia hacia el futuro (Chitombo, 2010). El éxito del método dependerá intrínsecamente del comportamiento del flujo de material, pues la recuperación de mineral y la dilución son fuertemente determinadas por el diseño y desempeño del nivel de producción, y por las características de flujo de los materiales involucrados (Julin, 1992).

Desde las primeras explotaciones por métodos *caving*, se han propuestos diferentes mecanismos para comprender el movimiento de los fragmentos dentro de la columna extractiva, la mayoría de los cuales se basan en experimentos físicos a escala de laboratorio y modelos numéricos que tratan de simular y entender la realidad. En contraparte, históricamente se han efectuado pocas pruebas a escala mina para estudiar el flujo gravitacional, aplicados mayoritariamente a minería de *sublevel caving* (Castro, 2006). En este escenario, se aprecia que las herramientas desarrolladas para predecir el flujo de material y recuperación de recursos se basan en relaciones meramente empíricas. No obstante, recientemente se ha incorporado tecnología en pruebas a escala mina empleando trazadores electrónicos inteligentes, implementado por primera vez en la mina *Ridgeway Deeps*. De esta forma, fue posible cuantificar y evaluar la zona de extracción de material en el campo cercano (hasta 30 [m] sobre el nivel de hundimiento).

En los próximos años, División El Teniente se enfrentará a un escenario cada vez más desafiante, caracterizado por complejos panoramas geomecánicos y mayores exigencias en los planes de producción. Dentro de este contexto, el estudio del flujo gravitacional es un aspecto clave para tomar decisiones tanto en el corto como en el largo plazo. Asimismo, la calidad de la información cumple un rol fundamental, por tanto, la integración de tecnología representa un paso esencial.

En consecuencia, el actual estudio propone entregar un mayor conocimiento asociado al comportamiento del flujo, utilizando nuevas oportunidades de innovación tecnológica, como herramienta primordial para el mejoramiento técnico-operacional. Igualmente, esta investigación procura incorporar la importancia del recurso mineral en la *creación de valor* dentro de la *cadena productiva* de División El Teniente, lo que permitirá optimizar diversas etapas, desde el diseño minero, la planificación, hasta la extracción de material. Para ello, se implementó una prueba de trazabilidad de flujo gravitacional, ejecutada en el sector productivo Bloque-2 de mina Esmeralda, ubicada en División El Teniente, Codelco-Chile, emplazada entre las calles C-57 y C-59, abarcando cinco zanjas (zanja Z-30 a zanja Z-34).

## 1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo principal de esta investigación es analizar las características del flujo gravitacional mediante una prueba a gran escala utilizando la tecnología de marcadores inteligentes, implementada en Bloque-2 de mina Esmeralda. Se pretende complementar el conocimiento asociado a la zona de extracción para mejorar aspectos del diseño minero y control de tiraje.

Para cumplir con lo anterior, se proponen los siguientes objetivos específicos claves de la investigación.

1. Desarrollar un algoritmo de interpolación lineal de datos desde trazadores recuperados, para cada zanja del sector de estudio.
2. Analizar el efecto de la extracción y granulometría del material en el comportamiento de la zona de extracción.
3. Verificar la interacción de las zonas de extracción y estimar la recuperación del diseño minero en mina Esmeralda.
4. Formular un modelo conceptual para describir el comportamiento general del flujo gravitacional de roca fragmentada para el campo cercano.

## 1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO

Con el fin de contribuir a la comprensión general de este trabajo, se han adoptado los siguientes enfoques y limitaciones para la investigación.

- i. Establecer una revisión del estado del arte relacionado con los estudios de flujo gravitacional.
- ii. La realización de este estudio se basa en coleccionar y analizar los datos provenientes de marcadores recuperados en mina Esmeralda desde agosto de 2012 hasta enero de 2015.
- iii. Se adoptan diferentes criterios, dentro de la metodología, para aplicar el procesamiento de datos mediante la interpolación lineal. Además, el despliegue de resultados de la interpolación se realiza por medio de diferentes planos representativos para cada zanja.
- iv. Dentro del estudio, sólo se considera un análisis cualitativo sobre la influencia de la extracción y fragmentación en el comportamiento del flujo de roca.

## 1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de este estudio se basa en las siguientes hipótesis generales de investigación:

- (1) El flujo de extracción de material, a escala mina, se extiende en zonas con geometrías aproximadamente regulares y definidas por la extracción y fragmentación de la roca.

Debido a esto, se espera evidenciar que la regularidad o irregularidad en el movimiento del material depende de las variables operacionales anteriormente mencionadas, y no un proceso de naturaleza caótica.

- (2) Existencia de interacción entre zonas de flujo, a través del pilar mayor y pilar menor, en cada una de las zanjas analizadas.
- (3) Una recuperación sobre el 50 % del total de marcadores instalados se considera suficiente para estudiar el comportamiento del flujo de material extraído y la interacción de la zona de extracción entre las zanjas del sector de prueba.
- (4) Mediante una interpolación lineal es posible efectuar un manejo adecuado de la información procedente de los trazadores recuperados.

### **1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La mayor parte del entendimiento actual referente al comportamiento del flujo gravitacional proviene desde modelos físicos y numéricos (Sharrock & Hashim, 2009). Todos estos trabajos han ofrecido una visión útil, pero aún existen debates sobre la precisión del comportamiento real de la roca en minería masiva (Whiteman, 2011). Así, la caracterización del flujo gravitacional de roca es uno de los aspectos teóricos y operacionales que aún no se ha revelado en su totalidad dentro de los fundamentos del *caving*.

La literatura muestra una baja ejecución de pruebas a escala mina empleando marcadores electrónicos en explotaciones de hundimiento, donde actualmente la mina *Ridgeway Deeps* ha implementado el sistema de trazadores inteligentes, obteniendo resultados concluyentes para su operación. De esta manera, esta investigación es uno de los primeros registros, a nivel mundial, que documenta un estudio acabado de flujo gravitacional, mediante un experimento a escala mina empleando marcadores electrónicos. Todo lo anterior resulta en una gran oportunidad para desarrollar nuevo conocimiento y entregar valor a la recuperación de reservas.

En consecuencia, la aplicación del proyecto tiene la ventaja de ejecutar una prueba que evita problemas de escalabilidad de datos e información, garantizando la obtención de mediciones reales y de alta calidad para el caso de estudio.

### **1.6. METODOLOGÍA GENERAL DE DESARROLLO**

El método para realizar esta investigación se enfoca en el manejo adecuado de datos, dirigida a cumplir con los objetivos propuestos. La **Ilustración 1-1** resume la propuesta general para la metodología de trabajo.

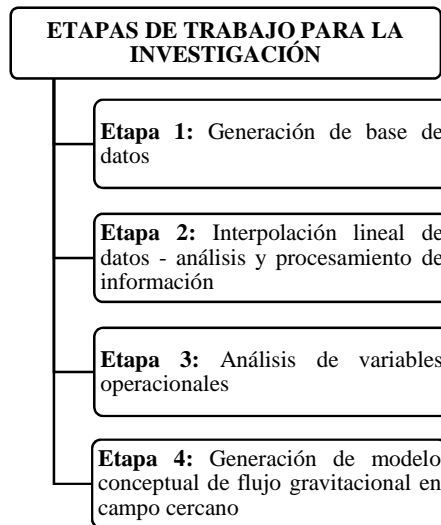


Ilustración 1-1 Descripción esquemática de la metodología general de trabajo.

## 1.7. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El estudio se compone de los siguientes capítulos:

- Capítulo 1** Corresponde a la introducción del tema de investigación desarrollado. Se entregan los objetivos, alcances, hipótesis y metodología general de trabajo, junto con los aspectos que justifican el estudio.
- Capítulo 2** Entrega una breve revisión del estado del arte sobre estudios de flujo gravitacional, para comprender el fenómeno del movimiento de material fragmentado.
- Capítulo 3** Se reportan los antecedentes de la prueba de trazabilidad implementada en División El Teniente, refiriéndose a la descripción de mina Esmeralda, funcionamiento del sistema de marcadores inteligentes, y el diseño de instalación de marcadores.
- Capítulo 4** Se define la metodología para el desarrollo de la investigación, donde se explica detalladamente el procedimiento aplicado durante este estudio. Adicionalmente, se establecen los criterios considerados para el análisis de la información desde los trazadores recuperados.
- Capítulo 5** Contiene los resultados de la investigación, donde se presenta el análisis relacionado al comportamiento del flujo gravitacional, la influencia que tienen la extracción y granulometría en el movimiento del material, y el desempeño que alcanza el diseño minero en mina Esmeralda.
- Capítulo 6** Postula un nuevo modelo conceptual de flujo dentro de la zona de extracción en el campo cercano, incorporando todos los resultados obtenidos en el estudio, para complementar el conocimiento sobre el fenómeno gravitacional del flujo de roca.
- Capítulo 7** Se presentan las conclusiones finales de la investigación y el enfoque a futuro para estudios posteriores en esta materia.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL ARTE –ESTUDIOS DE FLUJO GRAVITACIONAL PARA LA MINERÍA DE HUNDIMIENTO

*Este capítulo entrega un estudio crítico de las principales bases teóricas sobre las que se sustenta el desarrollo de la investigación, con la finalidad de describir el entendimiento actual acerca del flujo gravitacional e identificar los vacíos vigentes del conocimiento.*

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno del flujo gravitacional ha sido estudiado desde la primera implementación del método *block caving* (Lehman, 1916), desarrollándose una amplia gama de investigaciones para conocer y estimar tanto el comportamiento como los mecanismos que gobiernan el flujo de material fragmentado. Estos estudios se componen de modelos físicos en laboratorios utilizando arena o gravas, enfoques de modelos matemáticos y pruebas a escala mina empleando marcadores.

El flujo gravitacional tiene un impacto directo en la recuperación de mineral y en el contenido de material diluyente, por lo que resulta trascendental para determinar óptimos diseños del nivel de producción y prácticas de control del tiraje. A pesar de su importancia, los aspectos claves del flujo gravitacional aún no son bien entendidos (Brady & Brown, 2004). A nivel general, el flujo gravitacional ha sido estudiado por uno o una combinación de las siguientes técnicas:

- a. Experimentos físicos utilizando modelos a escala reducida.
- b. Analogías al flujo de otros materiales dentro de contenedores.
- c. Modelamiento numérico.
- d. Estudios a escala mina.

La revisión de la literatura se ha enfocado en estudios relacionados con esta investigación, detallados en las siguientes secciones.

#### 2.2. MODELAMIENTO FÍSICO A ESCALA

El modelamiento físico a escala es uno de los métodos más antiguos empleados para simular el flujo de roca fragmentada. Los estudios desarrollados para entender el flujo gravitacional se han basado principalmente en observaciones y mediciones realizadas para representar el proceso de *caving* (Kvapil, 1965; McCormick, 1968; Peters, 1984; McNearny & Abel, 1993; Power, 2004; Castro, 2006; Hashim *et al.*, 2008; Sharrock, 2008).

De acuerdo con Schuring (1977), la elaboración a escala de un modelo físico proporciona algunas ventajas:

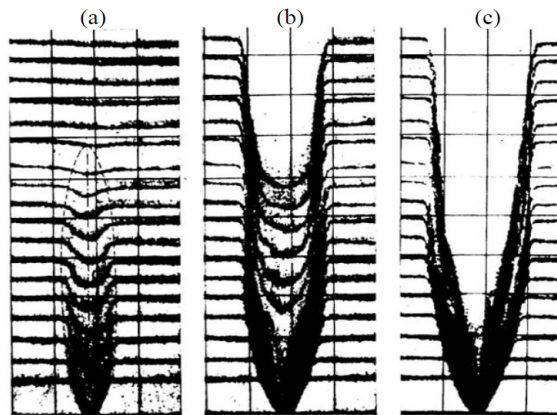
- i. Capacidad de realizar analíticamente cualquier trabajo experimental con información empírica.
- ii. Los modelos a escala permiten la transformación de un sistema a proporciones manejables para llevar a cabo la simulación.
- iii. Períodos más cortos de experimentación.
- iv. Promueve una comprensión más profunda del fenómeno bajo investigación

Sin embargo, los esfuerzos por mejorar el entendimiento del flujo de roca ha motivado el uso de dos tipos de materiales en los experimentos: arena y grava.

### 2.2.1. Modelos físicos de arena

Dentro de los resultados más influyentes para la teoría de flujo gravitacional se encuentra el estudio realizado por Kvapil (Kvapil, 1965a, 1965b, 1992; Janelid & Kvapil, 1966).

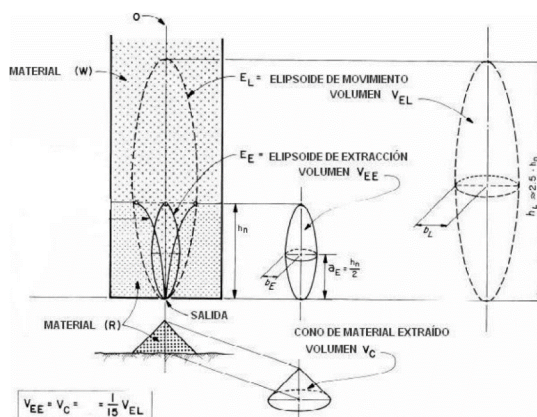
Kvapil construyó un modelo vertical simple con capas de arena blanca y negra, junto con una ranura en el fondo. Cuando la abertura estaba abierta, la arena fluyó en fases (**Ilustración 2-1**). Se puede observar que solo una cierta parte del material comenzó a moverse al mismo tiempo que la ranura estaba abierta.



**Ilustración 2-1** Modelo de flujo gravitacional de Kvapil (after Kvapil, 1965a). (a) Etapa temprana de extracción. (b) Etapa intermedia de extracción. (c) Previa a la última etapa de extracción.

Posteriormente, Kvapil postuló la existencia de dos regiones que experimentan flujo. El primer sector se denomina *elipsoide de extracción*, correspondiente al volumen definido por la ubicación original del material extraído desde el punto de extracción. En cambio, la segunda zona se designa como *elipsoide de movimiento* al volumen que determina el límite entre el material estacionario (sin movimiento) y el material que se ha movido desde su posición inicial (**Ilustración 2-2**).

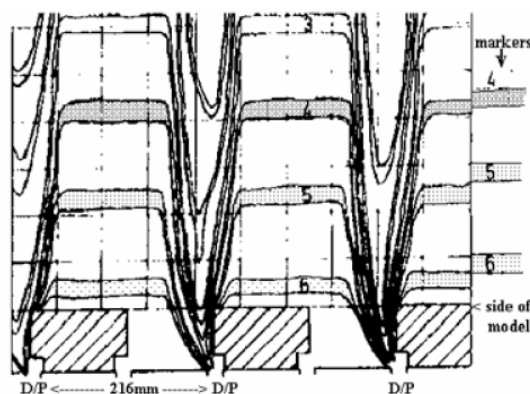
Además, Kvapil (1992) establece relaciones geométricas entre ambas elipsoides, estableciendo que la relación de altura entre las elipsoides de extracción y movimiento es 1:2.5, mientras que la razón entre volúmenes corresponde a 1:15.



**Ilustración 2-2** Representación esquemática de la elipsoide de extracción y elipsoide de movimiento para una extracción aislada (after Kvapil, 1992).

La teoría elipsoidal de Kvapil, desde entonces, ha sido ampliamente aceptada como guía de diseño en minas de *sublevel caving*. No obstante, algunos autores posteriores encontraron que esta teoría no modela el flujo con precisión (McCormick, 1968; Marano, 1980; Heslop & Laubscher, 1981; Heslop, 1983; Laubscher, 1994, 2000). Resulta interesante notar que desde esta publicación, nadie intentó aplicar esta teoría a minas de *block caving* hasta los años 1980's. Kvapil llevó a cabo experimentos con múltiples tolvas (Kvapil, 1965a). El autor concluyó que para asegurar una correcta actividad de las aberturas, la distancia entre las tolvas debe ser menor o igual al ancho del elipsoide de movimiento. Así, la formación de zonas pasivas entre aberturas se limita al mínimo. Sin embargo, nadie efectuó alguna investigación en esta área hasta Marano, Heslop y Laubscher.

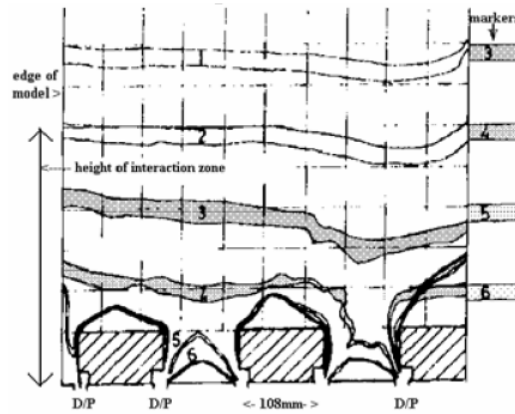
De este modo, la teoría de Kvapil fue desafiada por Marano, Heslop y Laubscher (Marano, 1980; Heslop & Laubscher, 1981; Heslop, 1983; Laubscher, 1994, 2000). Estos autores efectuaron un primer experimento en un modelo de arena 3D, diseñado especialmente para investigar la interacción en el tiraje de puntos de extracción adyacentes. La extracción de los puntos en este modelo fue simultáneo, y el espaciamiento entre los puntos se fijó en 216 [mm] (**Ilustración 2-3**).



**Ilustración 2-3** Patrón de flujo con espaciamiento de puntos de extracción a 216 mm (Heslop, 1983).

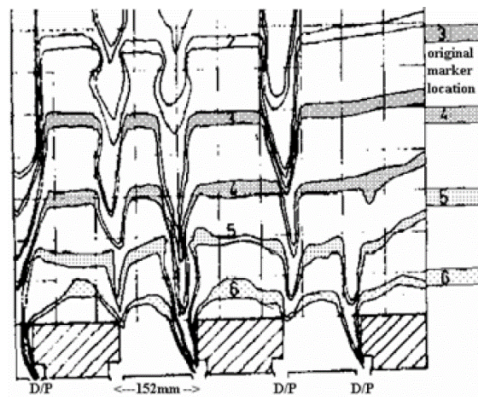
De esta manera, los autores ejecutaron una segunda prueba donde los puntos de extracción fueron separados al ancho de la zona de extracción aislada (IEZ), que fue medida en 108 [mm] desde el experimento previo. Los autores encontraron que la reducción uniforme de los marcadores ocurre cuando los puntos de extracción fueron simultáneamente extraídos, como se observa en la **Ilustración 2-4**.





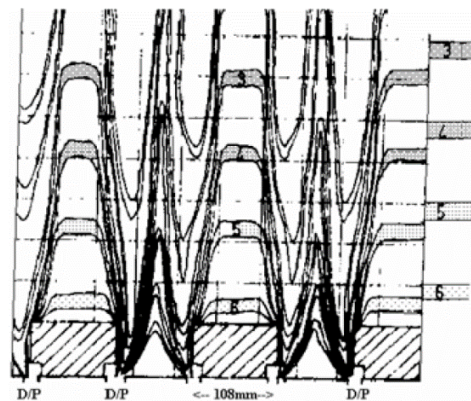
**Ilustración 2-4** Patrón de flujo con espaciamento de puntos de extracción igual al ancho de la zona de flujo (Heslop, 1983).

Un tercer experimento se realizó espaciando los puntos 1.4 veces el ancho de la zona de extracción aislada (IEZ), mediante una extracción regular, alternando la extracción (**Ilustración 2-5**). Desde esta comparación, los autores concluyen que la teoría elipsoidal no se aplica a *block caving*, lo que más tarde se denominará *teoría de flujo interactivo*.



**Ilustración 2-5** Patrón de flujo con espaciamento de puntos de extracción a 1.4 veces el ancho de la zona de extracción aislada (Heslop, 1983).

Finalmente, en el último experimento, el espaciamento de los puntos de extracción se estableció en 108 [mm], pero la extracción de material se llevó a cabo de manera *no simultánea* entre los puntos adyacentes. La **Ilustración 2-6** exhibe el comportamiento irregular de los resultados.



**Ilustración 2-6** Patrón de flujo con espaciamento entre puntos de 108 mm y extracción no simultánea (Heslop, 1983).

### 2.2.2. Modelos físicos de grava

El modelamiento físico a gran escala es más representativo para simular el flujo de roca (Peters, 1984; Power, 2004; Castro, 2006). Lo anterior se debe a la incorporación de materiales más gruesos, como la grava, que posee características semejantes a la roca producida por efecto del *caving*.

De esta manera, en el contexto del *International Caving Study II*, Castro *et al.* (2006) desarrolló un modelo físico a gran escala en tres dimensiones, con la finalidad de estudiar el flujo gravitacional de material e inferir los mecanismos de flujo que rigen a escala mina, utilizando grava como material fragmentado. Las conclusiones más relevantes de la investigación de Castro *et al.* (2006) para efectos de esta investigación se entregan a continuación:

- i. Los factores principales que afectan la geometría de la zona de extracción aislada (IEZ) y zona de movimiento aislada (IMZ) corresponden a la *extracción de material* y la *altura de extracción*.
- ii. Velocidades de flujo para diferentes tamaños de fragmentos indican que las partículas finas tienden a viajar más rápido que fragmentos gruesos dentro del flujo granular. Este efecto aumenta en la medida que el tamaño de partícula disminuye y parece resultar significativo en la geometría de la zona de flujo. Sin embargo, la percolación no es un factor importante en el flujo granular.
- iii. La altura a la cual el flujo de masa comienza (altura de interacción) depende del espaciamiento de los puntos de extracción.
- iv. Cuando el flujo de masa ocurre, las zonas de extracción de puntos de extracción adyacentes se traslapan.

### 2.2.3. Resumen de modelos físicos a escala

A modo de resumen, la **Tabla 2-1** entrega los principales modelos físicos a pequeña y gran escala desarrollados para estudiar el flujo gravitacional en el proceso de *caving*.

Desde la literatura se observa que el uso de arena ha sido arduamente discutido en relación a su capacidad para representar las propiedades y características del flujo gravitacional. En este aspecto, las diferencias entre los valores obtenidos por la teoría elipsoidal de Kvpil (1965) frente a los modelos de gravas y escala mina, sugieren que los modelos de arena *no son adecuados* para simular el flujo gravitacional de minas de hundimiento (Halim, 2004).

Por su parte, el modelamiento físico empleando material de grava ha sido determinado por algunos autores (Peters, 1984; Power 2004), como un medio adecuado para estudiar el flujo granular en materiales más gruesos. Halim (2004) señala que este método entrega cuestionamientos en la extrapolación de resultados para escala mina. En tanto, Gustafsson (1998) advierte dificultades sobre el poco control en la distribución granulométrica, análisis bidimensional, escasos marcadores dentro del modelo, utilización de un solo punto de extracción, entre otros.

Tabla 2-1 Resumen de los principales modelos físicos y los resultados obtenidos.

Características/Autor	Kvapil (1965-1992)	McCormick (1968)	Marano (1980)	Peters (1984)	Power (2004)	Castro (2006)
<b>Dimensiones del modelo</b>	-	Altura: 1.2 m	Altura: 2.4 m Escala 1:80	Altura: 4.6 m Largo: 6 m Ancho: 0.5 m	Altura: 3.5 m Largo: 2.2 m Ancho: 2.1 m Escala 1:30	Altura: 3.4 m Largo: 3.3 m Ancho: 2.4 m
<b>Material</b>	Arena	Arena	Arena	Grava	Grava	Grava
<b>Tipo de modelo</b>	2D	2D	3D	2D	3D	3D
<b>Sistema de extracción</b>	-	-	Scraper	LHD	LHD	LHD
<b>Resultados principales</b>	Forma elipsoidal de zonas de flujo	Forma de elipsoide de movimiento cilíndrica	Similitud total no puede ser alcanzada en modelo utilizando arena	No hay efecto del tamaño de partícula sobre la geometría de flujo	Tamaño de partícula tiene efecto significativo en alto y ancho de la zona de movimiento y extracción	Los puntos de extracción deben estar espaciados a menos del ancho de IMZ para que exista interacción entre zonas de flujo y el material entre puntos pueda ser extraído
	Proporciona relaciones matemáticas para el flujo de material granular en silos	Ancho del cilindro no depende del ancho del punto de extracción	Resultados de estudios derivados de experimentos con un único punto de extracción no son válidos cuando existen realmente múltiples puntos de extracción	El ancho del tiraje depende del porcentaje de finos incluidos y dimensiones del punto de extracción	Los modelos físicos en 2D no son válidos para el estudio de flujo gravitacional	El ancho de la zona de extracción y movimiento aislado es función de la masa y altura extraída

Fuente: Modificación a Halim (2004).

### 2.3. MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL FLUJO GRAVITACIONAL

Los modelos matemáticos han incrementado su importancia en la actualidad, fundamentalmente por la gran utilidad de predecir el flujo gravitacional en bajo tiempo de cálculo. Dependiendo de la base teórica empleada y el propósito para cual se concibieron, se distinguen dos tipos de modelos matemáticos.

El primer tipo de modelo, conocido como *modelo dinámico*, simula el flujo gravitacional por medio de la teoría mecánica, implementando ecuaciones de balance de fuerza entre partículas para determinar el movimiento o flujo de material.

El segundo modelo, llamado *modelo estocástico*, simula la cinemática del flujo gravitacional incluyendo un autómata celular (componente estocástica), utilizando elementos discretos que migran por efecto de la gravedad en la medida que se extrae material desde el punto de extracción.

La **Tabla 2-2** expone un resumen de los modelos matemáticos existentes para la simulación del flujo gravitacional.

Tabla 2-2 Resumen de los principales modelos matemáticos de flujo gravitacional.

Tipo de modelo	Fuerzas de contacto	Medios discretos	Patrones de flujo	Parámetros de entrada	Calibración y validación	Capacidad de estudiar mecanismos de flujo	Aplicación en control de tiraje
<b>Distinct Element (DEM)</b>	✓	✓	✓	Características del material: tamaño límite de partícula, forma y fricción	Cantidad acotada de elementos que limitan la posibilidad de validación	✓	X
<b>Elementos finitos</b>	✓	X	X	Parámetros de material continuo: ángulo de fricción, módulos de elasticidad, dilatación y modelos de falla	Tamaño de partícula no puede ser incorporada	✓	X
<b>REBOP</b>	X	X	✓	Erosión, colapso y perfil de velocidad de extracción	Puede ser calibrado con IEZ e IMZ experimental	X	✓
<b>Medio continuo estocástico</b>	X	X	✓	Coefficientes de difusión, cambio de densidad en medio continuo, condiciones de borde	Puede ser calibrado con IEZ e IMZ experimental	X	✓
<b>Estocástico</b>	X	X	✓	Probabilidad de llenar un vacío	Puede ser calibrado con IEZ experimental	X	✓
<b>Autómata celular</b>	X	✓	✓	Probabilidad de llenar un vacío y reglas para la función de transición	Puede ser calibrado con IEZ e IMZ experimental	✓	✓
<b>LGrCA</b>	✓	✓	✓	Modos de colisión de partículas y propagación en una grilla fija	Puede ser calibrado con IEZ e IMZ experimental	✓	X
<b>Modelos volumétricos</b>	X	X	X	PED, altura de interacción y geometría de flujo	Puede ser calibrado usando leyes de mineral o modelo de flujo	X	✓

#### 2.4. PRUEBAS DE FLUJO GRAVITACIONAL A ESCALA MINA

Los esfuerzos por recopilar antecedentes y datos de experimentos a escala mina son fundamentales para entender el comportamiento del flujo gravitacional, pues la principal ventaja de estas pruebas es prevenir problemas de escalabilidad que entregan los modelos físicos. Cabe destacar que todos los experimentos descritos en la literatura se han centrado en minas de *sublevel caving*, destacando sólo dos pruebas en métodos *block/panel caving* con antecedentes de conocimiento público.

La principal desventaja de este tipo de prueba es la dificultad y limitado acceso al cuerpo mineral antes de las operaciones mineras. Esto retrasa el progreso del experimento y la recopilación de

datos (Castro, 2006). Otros inconvenientes apuntan a costos relativamente altos y la naturaleza extremadamente lenta del experimento (Sandstrom, 1972; Just, 1981).

A continuación se presentan los diferentes experimentos a escala mina ejecutados históricamente, separados en aplicación a *sublevel caving* y *block/panel caving*.

### 2.4.1. Pruebas en minería de *sublevel caving*

El objetivo para desarrollar diferentes pruebas a escala mina en operaciones de *sublevel caving* se puede resumir en los siguientes tópicos.

1. Verificar y entender el mecanismo del flujo gravitacional de material.
2. Estudiar la geometría de la zona de extracción (IEZ) para la recuperación de mineral.

Durante este período (entre 1972 y 2004) se pretendía continuar con la generación de conocimiento sobre el comportamiento del flujo de roca, sin buscar mejoras en los aspectos operacionales. Es decir, estos estudios aún se enfocaban en validar y verificar cómo se comportaba la teoría en la predicción del movimiento gravitacional.

Los resultados obtenidos apuntan a un comportamiento complejo y no uniforme del flujo de material. Asimismo, en la mayor parte de los estudios no se observa evidencia de flujo interactivo entre zonas de extracción. La **Tabla 2-3** entrega un resumen con todas las pruebas a escala mina realizadas en *sublevel caving*, en las cuales se utilizaron marcadores convencionales.

Tabla 2-3 Resumen de pruebas a gran escala en minas de *sublevel caving*.

Mina/Localización	Investigador	Tipo de marcador	Marcadores recuperados
Grängesberg, Suecia	Janelid (1972)	Convencional	75% aproximadamente
He-Pei, China	Chen & Boshkov (1981)	Convencional	60% aproximadamente
Kiruna, Suecia	Gustafsson (1998) Quinteiro <i>et al.</i> (2001)	Convencional	30% aproximadamente
Perseverance, Australia	Hollins & Tucker (2004)	Convencional	73% aproximadamente
Ridgeway, Australia	Power (2004)	Convencional	59% (primario) 73% (secundario)

### 2.4.2. Pruebas en minería de *block/panel caving*

En este tipo de estudios se encuentran las pruebas de Alvial (1992) y Brunton *et al.* (2012).

Por una parte, Alvial (1992) efectuó parcialmente una prueba a escala mina en División El Teniente, instalando neumáticos como trazadores de flujo en una zona antigua sobre el sector Teniente 4 Sur. Los resultados no pudieron definir concretamente el comportamiento del flujo de material durante la operación, debido a la baja recuperación de marcadores (19 trazadores recuperados en 10 años).

En tanto, el experimento de Brunton *et al.* (2012) se implementó en mina *Ridgeway Deeps* durante los años 2008 – 2010, considerando la disposición de marcadores convencionales y electrónicos en

el campo cercano (altura máxima de 30 [m] medidos desde el nivel de hundimiento). Los objetivos de la prueba apuntaban a:

1. Cuantificar y evaluar el desarrollo y forma de la zona de extracción.
2. Interpretar y cuantificar los mecanismos de movimiento que controlan el comportamiento del flujo material.
3. Identificar posibles fuentes de ingreso de estéril.
4. Conocer el grado de variabilidad del comportamiento de flujo.

Los resultados obtenidos indican un comportamiento caótico, no uniforme y crecimiento asimétrico de la zona de extracción, asociado principalmente a movimientos preferenciales y percolación de material fino a través de vacíos intersticiales generados por perturbaciones cinemáticas y estáticas de los fragmentos más gruesos.

Análogo al caso anterior, se reporta una tabla resumen con estas pruebas a escala real efectuadas en operaciones de *block/panel caving* (**Tabla 2-4**).

Tabla 2-4 Resumen de pruebas a gran escala en minas de *block/panel caving*.

Mina/Localización	Investigador	Tipo de marcador	Marcadores recuperados
El Teniente, Chile	Alvial (1992)	Convencional	19 marcadores en 10 años
Ridgeway Deeps, Australia	Brunton <i>et al.</i> (2012)	Convencional y electrónico	50% aproximadamente

## 2.5. MODELOS DE FLUJO GRAVITACIONAL

### 2.5.1. Modelo de Laubscher

Laubscher (2000) desarrolla un modelo a partir de los resultados obtenidos en experimentos físicos de arena (**Ilustración 2-7**), donde postula tres posibles mecanismos de flujo gravitacional de material fragmentado, descritos en la **Tabla 2-5**.

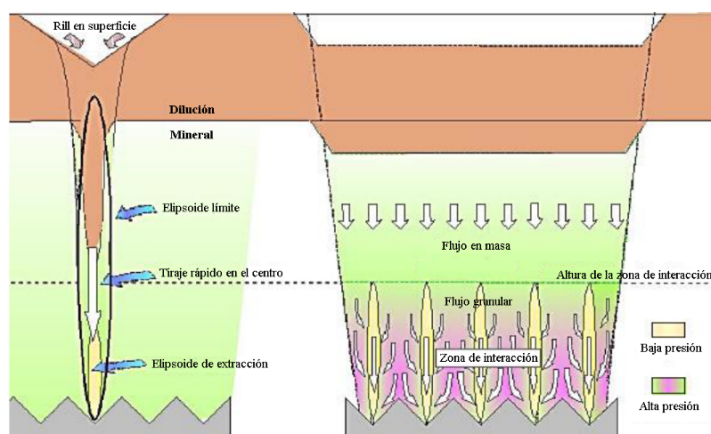


Ilustración 2-7 Representación del modelo de flujo gravitacional de Laubscher (Laubscher, 2000).

Tabla 2-5 Mecanismos del flujo gravitacional en el modelo de Laubscher (2000).

Mecanismo	Descripción
<b>Flujo de masa (<i>mass flow</i>)</b>	El mecanismo de flujo de masa ocurre en la parte superior del hundimiento, donde la subsidencia del material quebrado es uniforme. La trayectoria de las partículas es aproximadamente vertical, preferente hacia las zonas de menor presión (mayor porosidad) y hacia los puntos de extracción con mayor tasa de tiraje. En este tipo de flujo no existe mezcla vertical ni horizontal y el material fino se desplaza a la misma velocidad que el grueso. Esta zona de flujo masivo está delimitada por una zona inferior de interacción y mezcla.
<b>Flujo granular (<i>granular flow</i>)</b>	Si existe una elevada cantidad de puntos de extracción activos simultáneamente, las características de la extracción pueden cambiar radicalmente. En la parte inferior de la zona de flujo de masa se desarrolla una región de interacción de esfuerzos que pueden inducir la migración lateral de material ubicado sobre sectores con menor tasa de tiraje hacia aquellos puntos de extracción con mayor actividad extractiva. El movimiento lateral de material ayuda a igualar la tasa de subsidencia en la zona superior de flujo masivo. Este mecanismo también recibe el nombre de <i>flujo interactivo</i> .
<b>Difusión de vacío (<i>void diffusion</i>)</b>	<p>El mecanismo de difusión de vacío se asocia a las etapas tempranas del hundimiento, en las cuales no se desarrolla la teoría elipsoidal del flujo, debido a la existencia de material esencialmente grueso y angular. En cambio, se presentará un patrón irregular de flujo gravitacional, caracterizado por la formación de <i>rat holes</i> o <i>chimeneas</i> de flujo a lo largo de la columna. (Ilustración 2-8).</p> <p>Este tipo de difusión fue postulado por Jolley (1968) para <i>sublevel caving</i>, provocada por la variación de tamaño de roca y la angulosidad que exhiben los fragmentos. De esta manera, los vacíos pueden ser llenados con material más fino proveniente de zonas superiores o desde los costados.</p> <p>Laubscher (2000) postula que la difusión de vacío actúa de forma similar en <i>block</i> y <i>panel caving</i>, identificando comportamientos diferentes para tiraje aislado y tiraje interactivo.</p> <p>a. <b>Difusión de vacío en tiraje aislado</b> –La interacción de vacíos sobre el punto de extracción induce una zona de baja densidad, favoreciendo el flujo preferencial de material fino superior y la entrada de dilución temprana (Ilustración 2-8a).</p> <p>b. <b>Difusión de vacío en tiraje interactivo</b> –La existencia de una serie de puntos de extracción activos permite lograr un traslape entre los vacíos, originando una mezcla vertical y horizontal de material fragmentado. Así, se favorece el flujo vertical de masa y se retrasa la entrada de material estéril (Ilustración 2-8b).</p>

En síntesis, Laubscher (2000) concluye que si el material quebrado está compuesto por fragmentos redondeados y distribución granulométrica homogénea, el comportamiento del flujo gravitacional es semejante al modelo de flujo granular. Por lo contrario, si el material posee un amplio rango de tamaño con alta proporción de grandes fragmentos y elevada angulosidad, el comportamiento del flujo gravitacional estará determinado por el mecanismo de difusión de vacío.

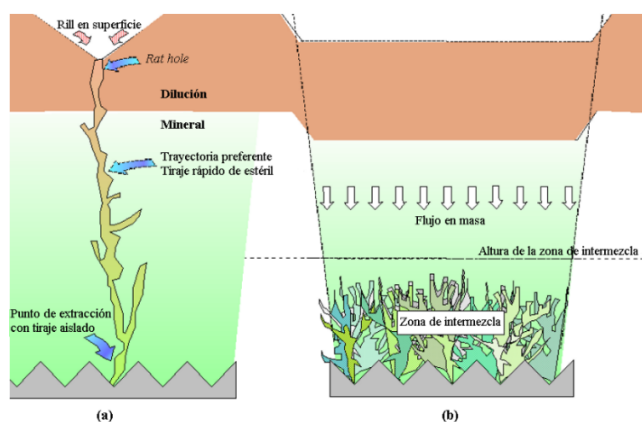
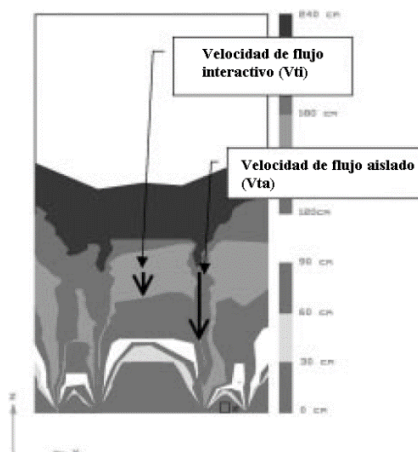


Ilustración 2-8 Mecanismo de difusión de vacío. (a) Comportamiento en tiraje aislado. (b) Comportamiento en tiraje interactivo. (Laubscher, 2000).

### 2.5.2. Modelo de Susaeta

El modelo de flujo propuesto está compuesto de experimentos físicos de arena, análisis conceptual y back-análisis de minas pertenecientes a Codelco-Chile. Susaeta (2004) observa que pueden presentarse dos tipos de velocidades; una velocidad que posee el material dentro de un elipsoide de flujo aislado, denominada *velocidad de tiraje aislado* ( $v_{ta}$ ). En cambio, si las partículas se trasladan fuera de la zona de baja densidad que genera el elipsoide de flujo aislado, entonces el desplazamiento se realiza con una *velocidad de tiraje interactivo* ( $v_{ti}$ ). La **Ilustración 2-9** esquematiza las velocidades estudiadas por Susaeta (2004).



**Ilustración 2-9** Comportamiento aislado-interactivo del experimento de Susaeta, para malla tipo Teniente (Susaeta, 2004).

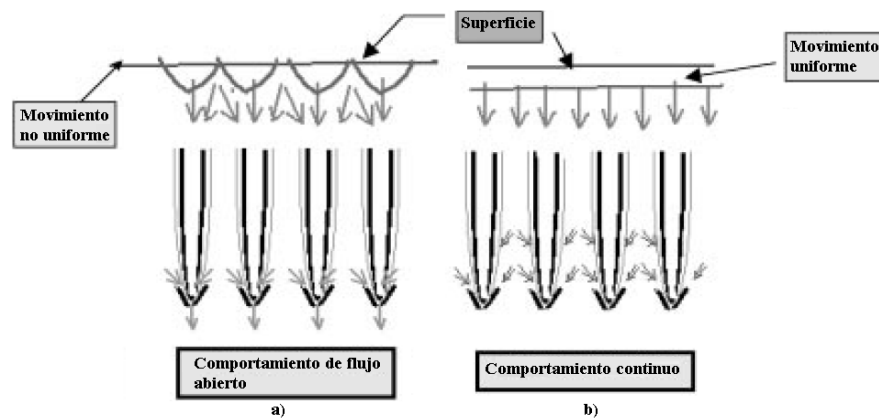
De esta manera, el autor plantea que el fenómeno del flujo gravitacional es afectado por la superposición de dos estados que generan el movimiento del material, detallado en la **Tabla 2-6**.

**Tabla 2-6** Mecanismos de flujo gravitacional en el modelo de Susaeta (2004).

Mecanismo	Descripción
<b>Punto de extracción abierto</b>	<p>El comportamiento del flujo gravitacional corresponde al movimiento real del material hundido cuando el punto de extracción está abierto (o cuando el equipo carga el material). Como consecuencia, la propagación del flujo granular ocurre posterior a fallas de arcos de presión formadas por el material.</p> <p>La propagación es de tal forma que la región cerca de la zona de extracción aislada en la parte baja de la columna es afectada generando un movimiento lateral hacia la zona de extracción, cuando la distancia entre puntos de extracción es menor a 1.5 veces el diámetro de flujo aislado (<math>D_{ta}</math>). Este efecto se conoce como <i>tiraje aislado-interactivo</i>.</p>
<b>Punto de extracción cerrado</b>	<p>Cuando un punto de extracción se cierra, la densidad sobre el punto de extracción es mucho menor que en el entorno inmediato, por lo que ocurre una lenta igualación de densidades, similar al comportamiento de medios continuos (como los fluidos). Por tanto, se produce un arreglo de material hacia un <i>equilibrio estático litológico</i> con movimiento vertical y lateral hacia sectores de menores densidades.</p>

La **Ilustración 2-10** reproduce simplifícadamente el comportamiento del flujo gravitacional, incorporando los estados de movimiento entregados previamente.





**Ilustración 2-10** Descripción general del comportamiento del flujo gravitacional. (a) Comportamiento para punto de extracción abierto. (b) Comportamiento para punto de extracción cerrado (Susaeta, 2004).

## 2.6. MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO GRAVITACIONAL PARA EL CAMPO CERCANO EN MINA *RIDGEWAY DEEPS*

Brunton *et al.* (2012) adoptó una metodología para asignar el tonelaje de extracción a cada marcador recuperado, considerando los siguientes supuestos:

- (1) El punto de extracción más cercano donde el marcador fue inicialmente ubicado.
- (2) Asignar el tonelaje acumulado del punto de extracción sobre el marcador recuperado desde el sistema de manejo de materiales.

Además, para graficar los trazadores extraídos, el autor define una serie de polígonos basados en el tonelaje. La demarcación de los límites entre polígonos se determina por los próximos criterios:

- (i) El límite de un polígono se constituye por el punto medio entre dos marcadores (en la dirección X e Y de cada sección).
- (ii) Los marcadores no recuperados del manejo de materiales representan al material no extraído.
- (iii) Sectores dentro del área experimental que no contienen marcadores, se tratan como no monitoreadas (es decir, los polígonos no se extienden en zonas sin cobertura de marcadores, dejando sectores en blanco).

La **Ilustración 2-11** muestra los resultados obtenidos en *Ridgeway Deeps*, incorporando la visualización de polígonos en cinco secciones representativas de la zona de prueba.

A partir de estos resultados, conjuntamente con datos de fragmentación e información asociada a observaciones en puntos de extracción y análisis de esfuerzos, se desarrolló un modelo conceptual de flujo gravitacional en campo cercano de cuatro fases (**Ilustración 2-12**).

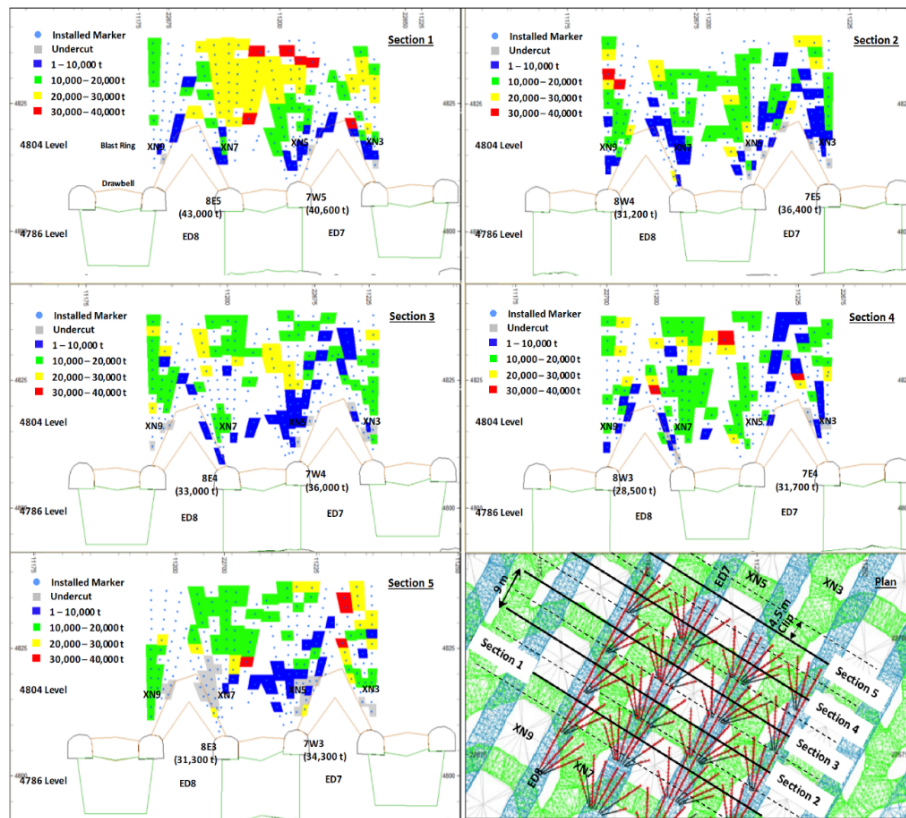


Ilustración 2-11 Resultados de la prueba a escala mina en *Ridgeway Deeps*, representados en cinco secciones para la visualización de marcadores recuperados (Brunton *et al.*, 2012).

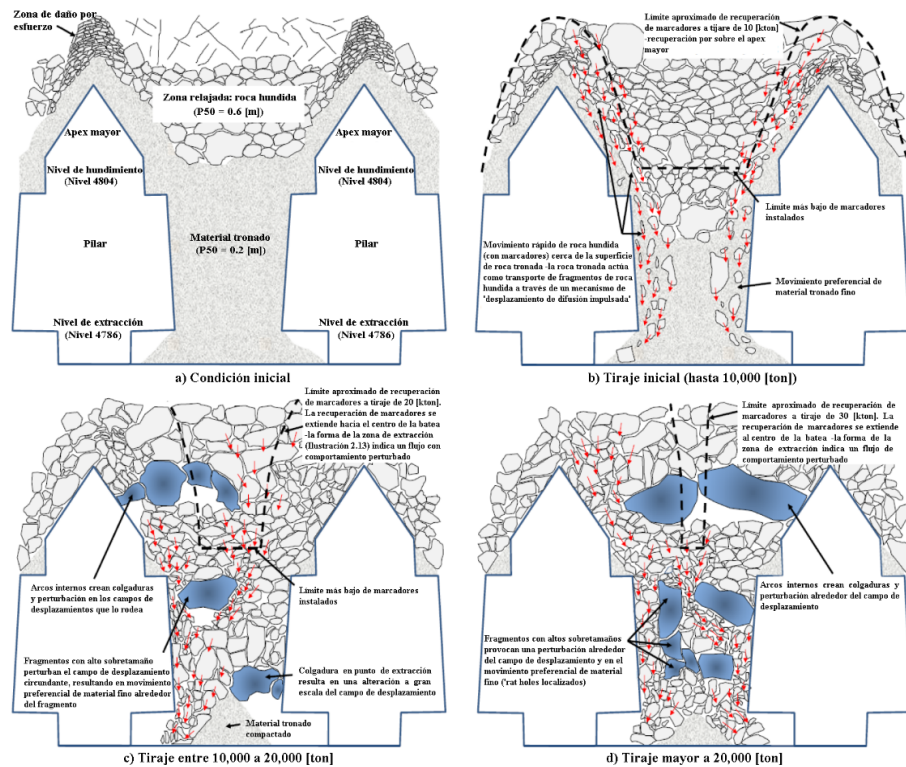


Ilustración 2-12 Modelo conceptual de flujo gravitacional de campo cercano en mina *Ridgeway Deeps* (Brunton *et al.*, 2012).

La etapa 1 (**Ilustración 2-12a**) representa el estado inicial en la proximidad del frente de hundimiento, inmediatamente después del corte basal, pero antes de retirar la marina de la socavación. Existen tres diferentes zonas que representan la distribución de tamaño de partícula:

- a) El material tronado.
- b) El material hundido relajado.
- c) Zonas de daño por esfuerzos sobre el pilar mayor.

La porosidad del material fragmentado y la razón de tamaño entre partículas en cada zona son parámetros considerados como factores que controlan el movimiento y segregación observadas en las próximas tres etapas.

En la etapa 2 (**Ilustración 2-12b**) se observa el inicio de la extracción, donde movimientos lentos y arcos de roca en la zona relajada actúan como un ring (parada de tronadura) inclinado en *sublevel caving*, promoviendo el movimiento de partículas finas, que transportan los fragmentos de roca más gruesos (que contienen los marcadores) desde el borde inferior de la zona relajada, por tanto, desde arriba del pilar mayor. Como resultado, partículas gruesas en contacto o incrustados en la matriz de material fino se mueven más rápidamente y se recuperan antes que el material del centro. En consecuencia, las partículas finas actúan para arrastrar el material desde las zonas dañadas y relajadas a los puntos de extracción. Por el contrario, el material más grueso en el centro de la batea se mueve más lentamente y un conjunto de partículas se acumula en este sector. Este tipo de flujo se conoce como *perturbación cinemática*, y resulta de los movimientos diferenciales entre los fragmentos finos y gruesos (Sharrock & Hashim, 2009).

Durante la etapa 3 (**Ilustración 2-12c**) se ha removido la mayor parte de las partículas de la zona tronada. Como la extracción continúa, ocurre más formación de arcos de partículas gruesas, lo que lleva a la percolación de material fino a través de huecos intersticiales. Durante esta fase, se mantiene la recuperación de marcadores sobre el pilar mayor. Cabe destacar que se experimentó un alto número de colgaduras en el área experimental, entregando como resultado un flujo caótico y desvirtuado de la zona de extracción (representado también por los polígonos verdes en la **Ilustración 2-11**). Las colgaduras se originan por la formación de zonas de estancamiento, constituyendo sectores de movimiento rápido de material en otras partes para satisfacer los requerimientos de balance de masa.

Finalmente, en la cuarta etapa (**Ilustración 2-12d**) la mayor parte de la roca hundida desde la zona relajada ha sido removida, mientras que la recuperación de marcadores muestra altos niveles de flujo caótico. Grandes fragmentos y arcos de roca perturban el campo de desplazamiento, lo que deriva en un crecimiento asimétrico de la zona de extracción, pero con una mayor recuperación por encima de la batea. Este tipo de flujo alterado se denomina *perturbación estática*, que ocurre cuando se forma una zona estacionaria de material, ya sea de límites fijos o una partícula estática de gran dimensión. Tal como se muestra en la **Ilustración 2-12d**, las partículas estáticas (grupo de material) forman efectivamente un nuevo borde, que altera el flujo gravitacional.

## 2.7. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

De acuerdo con la revisión de antecedentes sobre el estado del arte actual del flujo gravitacional aplicado a minería de hundimiento, se describen las principales conclusiones del capítulo.

- ✓ El fenómeno del flujo gravitacional ha sido ampliamente abordado por diversos autores, empleando modelamiento físico y matemático para entender los mecanismos que rigen el movimiento del material fragmentado. El gran interés por realizar estos estudios guarda relación con las repercusiones sobre el diseño minero, proceso de extracción y recuperación de reservas minerales.

A pesar de que estas investigaciones y trabajos han sentado las bases fundamentales para modelos que ajustan razonablemente la realidad, el flujo de material no puede ser descrito satisfactoriamente por teorías desarrolladas por experimentos con material particulado como arena, grava o granos (Yenge, 1981). Asimismo, numerosos simuladores 3D de flujo gravitacional para la recuperación de mineral y dilución de material aún no pueden ser utilizados confiablemente para condiciones de una mina específica, pues no han sido validados correctamente (Halim, 2010).

- ✓ Aunque no exista un factor de escalabilidad definido entre los modelos físicos/matemáticos y los resultados operacionales, la teoría general de flujo gravitacional ha identificado dos regiones características de desplazamiento de partículas: una zona de extracción bien definida sobre el punto de extracción y un sector de movimiento de material determinada por la extracción.

Dado lo anterior, en la actualidad se cuenta únicamente con este tipo de información para desarrollar metodologías de diseño minero y modelos de flujo en la construcción de diferentes estrategias de extracción. En consecuencia, este trabajo de investigación propone estudiar, a escala mina, la existencia de interacción entre zonas de flujo de material extraído, comprobando la efectividad del diseño minero, junto con abordar el efecto que posee la extracción y la fragmentación observada en el movimiento del material dentro de la columna de mineral.

- ✓ En relación con las pruebas a escala mina, existen diversas investigaciones que pretenden examinar el comportamiento gravitacional real del material fragmentado, y validar/invalidar los aspectos formulados por la teoría general de flujo.

En este sentido, la revisión de antecedentes entrega evidencia para justificar la realización de este trabajo, fundamentalmente por la escasa aplicación de pruebas a escala mina en minería de *panel caving*, junto con un limitado procesamiento y análisis de información de trazadores recuperados durante la prueba en la mina *Ridgeway Deeps*.

- ✓ Sobre la perspectiva anterior, surge la motivación por incorporar una metodología totalmente diferente para ejecutar el manejo de información de marcadores extraídos, mejorando los criterios adoptados por Brunton *et al.* (2012) e incorporando aspectos operacionales imprescindibles para el análisis de los resultados. Así, esta investigación contempla generar un nuevo modelo conceptual para el comportamiento del flujo de extracción en el campo cercano.

## CAPÍTULO 3

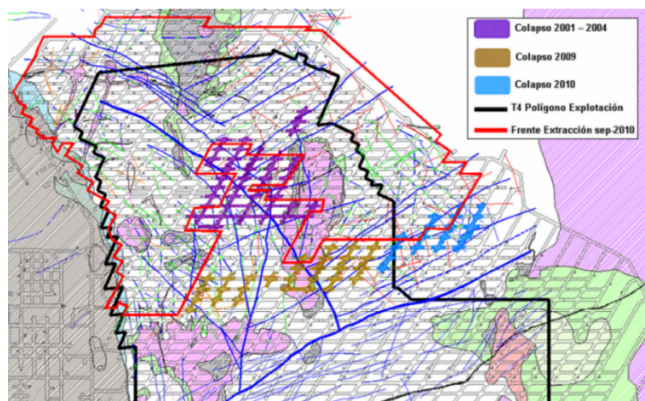
### ANTECEDENTES DE LA PRUEBA DE TRAZABILIDAD EN BLOQUE-2 DE MINA ESMERALDA

*Este capítulo recopila la información asociada a Bloque-2 de mina Esmeralda y entrega los antecedentes referentes a la prueba de trazabilidad implementada, para contextualizar el caso de estudio y describir las actividades relacionadas con la ejecución de la prueba a escala mina.*

#### 3.1. ANTECEDENTES DE MINA ESMERALDA

Mina Esmeralda, ubicada en División El Teniente de Codelco-Chile, comenzó el proceso de socavación en agosto de 1996, para continuar con la producción en septiembre de 1997 bajo la variante *panel caving* de hundimiento previo, con un ritmo de explotación cercano a 1,000 toneladas diarias. El layout del nivel de producción es una malla tipo Teniente de 30 x 20 [m].

Sin embargo, entre 2001 a 2003 se generó el colapso de 26,600 [m<sup>2</sup>] de área productiva. Asimismo, entre 2009 y 2010 se registra inestabilidad en el nivel de hundimiento y nivel de producción, generando un colapso de 30,605 [m<sup>2</sup>] delante del frente de extracción, impidiendo el crecimiento. La **Ilustración 3-1** destaca los colapsos documentados en mina Esmeralda.



**Ilustración 3-1** Ubicación de colapsos delante del frente de hundimiento en mina Esmeralda, actualizado al año 2010.

De acuerdo a estas condiciones, en julio de 2010 se evalúan diferentes opciones de crecimiento para cumplir con los planes productivos del sector.

Finalmente, se implementa la alternativa de iniciar el crecimiento en dos frentes, llamados bloques, desde un acceso ubicado en el cruzado XC-3. La **Ilustración 3-2** muestra la nueva forma de explotación, bajo el concepto de mina nueva, debajo del polígono de explotación del sector Teniente 4 Sur.

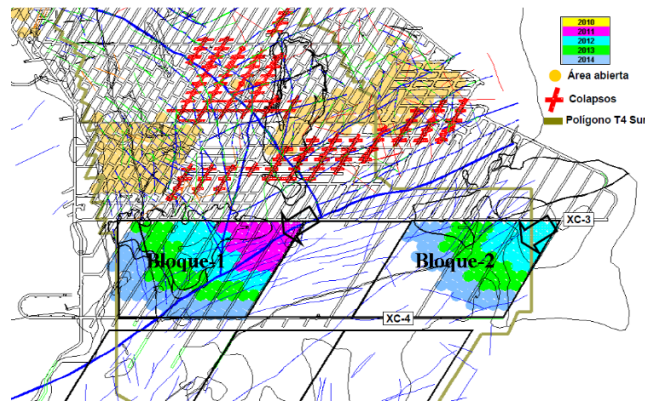


Ilustración 3-2 Alternativa de crecimiento en los sectores Hw (Bloque-1) y Fw (Bloque-2), desde el cruzado XC-3 al Sur.

### 3.1.1. Descripción general de Bloque-2

El Bloque-2 abarca un área cercana a 40,825 [m<sup>2</sup>] y corresponde al segundo bloque en iniciar la producción. Registra una altura de columna de 800 [m] a 1,000 [m], desde el nivel de hundimiento hasta la superficie, donde los primeros 160 [m] corresponden a roca in situ, y el resto representa material quebrado de la mina Teniente 4 Sur. El inicio del hundimiento se realiza desde la esquina Nor-Este hacia el sector Sur- Oeste (Ilustración 3-2).

### 3.1.2. Aspectos geomecánicos de Bloque-2

Dentro del sector comprendido entre los accesos XC-3 y XC-4, se identificaron las unidades litológicas incorporadas en la Ilustración 3-3.

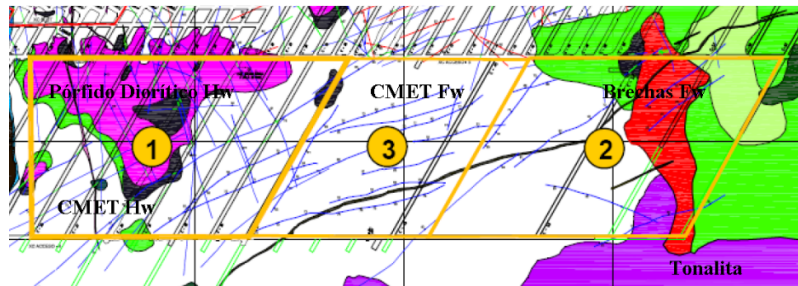


Ilustración 3-3 Principales unidades litológicas incorporadas a producción en mina Esmeralda.

Sobre esta base, se entrega información referente a las propiedades físicas de la roca intacta para las unidades litológicas (Tabla 3-1).

Tabla 3-1 Propiedades físicas de la roca intacta para las unidades geotécnicas establecidas en Bloque-2.

Unidad Geotécnica	Densidad [ton/m <sup>3</sup> ]	Porosidad [%]	Resistencia a la compresión [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Razón de Poisson	Ángulo de fricción [°]
Brechas Fw	2.75	0.75	109	10	43	0.13	42
Tonalita	2.70	0.90	171	11	52	0.12	47
CMET Fw	2.77	0.40	145	15	56	0.12	46

En cuanto a la clasificación geomecánica, se define la calidad del macizo rocoso in situ mediante el índice IRMR (In Situ Rock Mass Rating) de Laubscher & Jakubec (2001). De este modo, la **Tabla 3-2** indica el valor de IRMR y la frecuencia de fracturas para cada unidad geotécnica.

Tabla 3-2 Clasificación de la calidad del macizo rocoso in situ para la explotación de Bloque-2.

Unidad Geotécnica	IRMR	Clase	Calidad del macizo rocoso	Frecuencia de fracturas [ff/m]
Brechas Fw	62±1	2	Buena	0.26 – 0.31
Tonalita	62±1	2	Buena	–
CMET Hw	–	3	Regular	0.37

Finalmente, la condición de esfuerzos previo a la explotación se entrega en la **Tabla 3-3**.

Tabla 3-3 Resumen de la condición de esfuerzo para Bloque-2.

Tipo de esfuerzo	Magnitud [MPa]	Trend	Plunge
$\sigma_1$	50	191 ± 13	10 ± 12
$\sigma_2$	31	95 ± 16	16 ± 17
$\sigma_3$	19	327 ± 23	65 ± 9

### 3.1.3. Diseño minero de Bloque-2

El análisis geomecánico del crecimiento productivo reporta un cambio en la variante de explotación, pasando de un hundimiento avanzado a un hundimiento convencional, debido a la mejor redistribución de esfuerzos delante del frente de hundimiento, generado por el aumento en la altura de socavación. Respecto a la malla de extracción, se implementa una modificación al layout de mina Esmeralda, variando el diseño actual de 30 x 20 [m] a una nueva configuración 30 x 24 [m] al sur de la zanja Z-33, mejorando la estabilidad en el pilar calle-zanja.

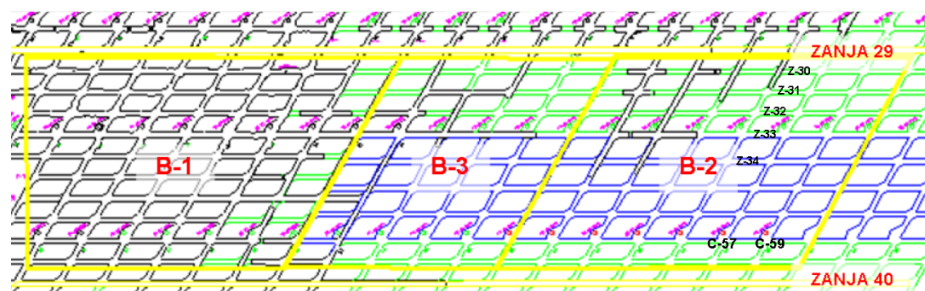


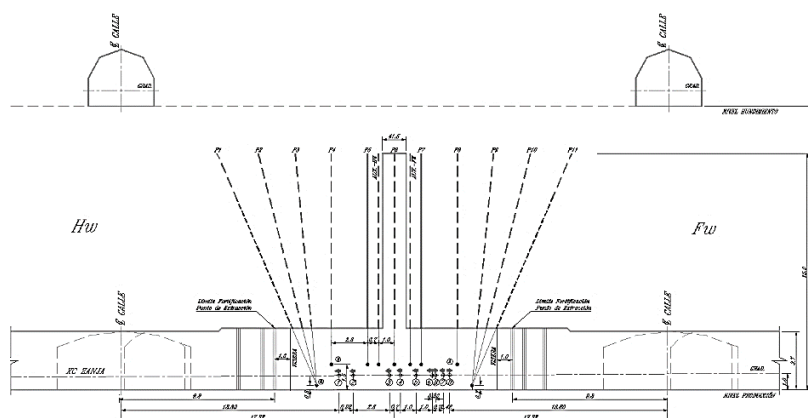
Ilustración 3-4 Nuevo diseño minero para Bloque-2, considerando la interfase entre la malla antigua de 30 x 20 m (color verde) y la nueva malla de extracción de 30 x 24 m (color azul).

A partir de la figura anterior, se observa en color negro las galerías completadas en 2010, en verde la proyección de desarrollo proyectados bajo una malla 30 x 20 [m] (que responde a desarrollos existentes), y en color azul la configuración 30 x 24 [m] propuesta para el nuevo crecimiento.

Conjuntamente, la nueva estrategia productiva incorpora pre-acondicionamiento en el Bloque-2, empleando fracturamiento hidráulico, para disminuir el riesgo sísmico, asistir el proceso de propagación de *caving* y mitigar el efecto de la respuesta sísmica en las fallas principales producto de la actividad minera.

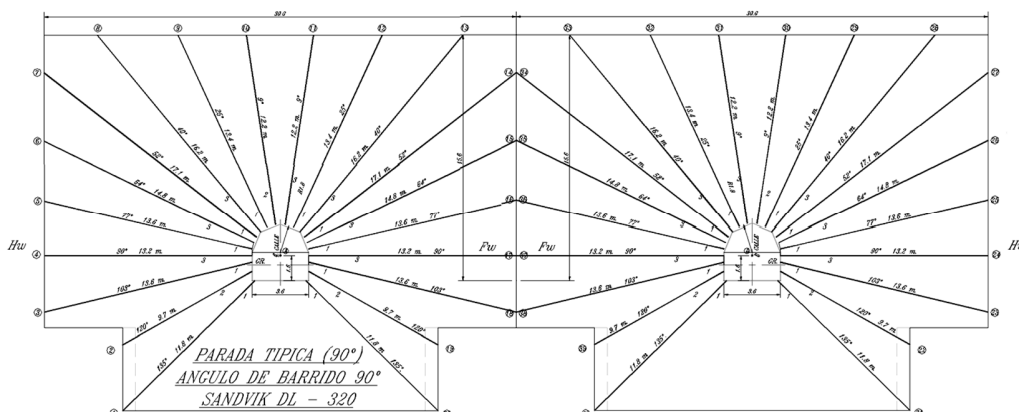
### 3.1.4. Diseño de perforación y tronadura

El diseño de la batea (**Ilustración 3-5**) se ejecuta en dos etapas; la primera etapa de tronadura corresponde a la perforación *raise* central, junto con perforaciones en su lado Norte y Sur; la segunda fase incluye las perforaciones del lado Este (Hw) y Oeste (Fw). El diseño considera 58 perforaciones de 15 [m], dejando una losa de 3 [m] hasta el nivel de hundimiento. El volumen removido es aproximadamente 1,824 [m<sup>3</sup>].



**Ilustración 3-5** Diseño estándar de perforación y tronadura para batea de Bloque-2 en mina Esmeralda.

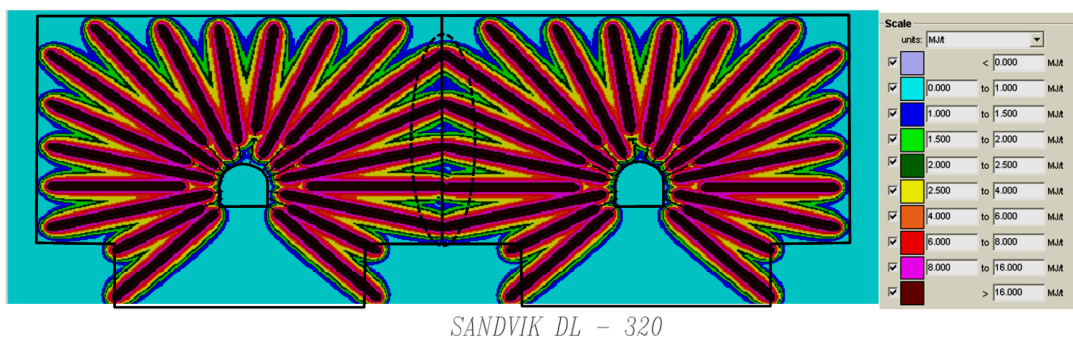
En el nivel de hundimiento, se realiza un diagrama de tiros radiales, comprendiendo 20 perforaciones con burden de 2 [m] y una altura de socavación de 15 [m] (**Ilustración 3-6**). El diseño incluye tiros negativos que permiten conectar la batea y el nivel de hundimiento.



**Ilustración 3-6** Diseño estándar de perforación de paradas para la socavación de Bloque-2 en mina Esmeralda.

Finalmente, un análisis de la tronadura de socavación, para el diseño teórico de la **Ilustración 3-6**, se presenta en la **Ilustración 3-7**. Como se puede observar en esta figura, la región donde se intersectan las perforaciones de la primera parada con la segunda parada (línea segmentada) pueden tener un efecto de acoplamiento de los pozos, lo que provocaría tiros quedados. Por este motivo, es importante controlar la tronadura y evitar que los pozos se inicien al mismo tiempo que las paradas.





SANDVIK DL - 320

BARRERADURA		PARADA	TRONADURA		PARADA
TIPO DE ROSA		VER LITOLÓGICA	TIPO ESTILO		ALFO
DIÁMETRO DE PERFORACIÓN (PULG.)	3"		CANTIDAD DE TRONADURAS		20
NÚMERO DE TIROS	20		CANTIDAD DE TRONADAS CILÍNDRICAS		20
BORDE	(M)	2.0	LONGITUD SIN CASCAJES (M)		37.0
DISTANCIA EN EL FONDO (M)	3.0 - 4.0		LONGITUD DE CASCAJES (M)		234.2
LONGITUD BARRERADURA (M)	271.2		CANTIDAD DE TACOS SUELO (3 CASP./TIRO)		60.0
VOLUMEN BARRERADO (M <sup>3</sup> )	1096		DENSIDAD DE CARGA LINEAL (KG/M)		4.1
ÁREA HENDIDA (M <sup>2</sup> IND.)	60		CANTIDAD DE ANFOS (KG)		969.2
FACTOR DE PERFORACIÓN (M <sup>3</sup> /M <sup>2</sup> )	0.2		FACTOR DE CARGA (KG/M <sup>2</sup> )		0.9
BARRERADURA POR ÁREA HENDIDA (M <sup>3</sup> /M <sup>2</sup> IND.)	4.5		EXPLOSIÓN POR ÁREA HENDIDA (KG/M <sup>3</sup> IND.)		16.0
ALTURA DE SOCAVACIÓN (M)	15.6				

Ilustración 3-7 Diseño estándar de tronadura de paradas para la socavación de Bloque-2 en mina Esmeralda.

### 3.1.5. Estudio de fragmentación en mina Esmeralda

Viera & Diez (2014) realizaron un estudio acerca de la evolución de la granulometría observada en los puntos de extracción y la frecuencia de colgaduras, para el Bloque-1 y Bloque-2, relacionada con el porcentaje de extracción de la columna primaria.

La clasificación de la granulometría se obtiene por levantamientos visuales del porcentaje de tamaños de roca presentes en los puntos de extracción. Los rangos de granulometría consideran el promedio de las tres longitudes ortogonales de los fragmentos, y corresponden a los siguientes:

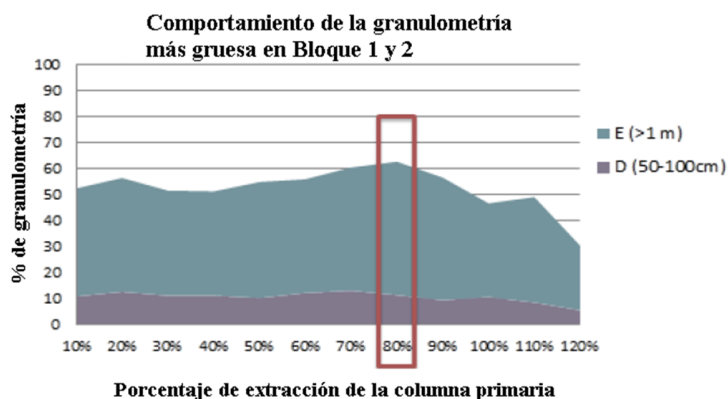
- Granulometría tipo A: menor a 5 [cm].
- Granulometría tipo B: entre 5 [cm] y 25 [cm].
- Granulometría tipo C: entre 25 [cm] y 50 [cm].
- Granulometría tipo D: entre 50 [cm] y 100 [cm].
- Granulometría tipo E: mayor a 100 [cm].

Para efectos de la investigación, se considera que la granulometría tipo E (Ilustración 3-8) corresponde a sobretamaños de la roca fragmentada, y se estudiará su efecto en el comportamiento del flujo gravitacional.



Ilustración 3-8 Ejemplo de granulometría tipo E para rocas observadas en punto de extracción (Viera & Diez, 2014).

Dentro de sus resultados, Viera & Diez proponen que el índice de tonelaje extraído entre reducciones secundarias (REH) aumenta proporcionalmente con la altura de columna extraída. Sin embargo, se observa que, a una extracción desde el 80% de la altura de columna primaria, se presenta una disminución en la distribución granulométrica de los tamaños de roca más gruesos. La **Ilustración 3-9** muestra la evolución de la granulometría durante el período de investigación



**Ilustración 3-9** Fragmentación observada en puntos de extracción como función de la altura primaria extraída.

### 3.2. SISTEMA DE TRAZADORES INTELIGENTES

#### 3.2.1. Descripción de la tecnología de marcadores inteligentes

El modo de operación del sistema de trazadores inteligentes es bastante sencillo. Una serie de trazadores con identificación ID única son instalados en diferentes posiciones conocidas dentro de la columna de mineral *in situ*. En la medida que los marcadores son extraídos por los equipos LHD junto con el mineral desde los puntos de extracción, estos trazadores son detectados electrónicamente (cuando aún se encuentran en el balde del LHD) por lectores instalados en el techo de las galerías del nivel de producción.

Con este tipo de tecnología es posible obtener datos de mejor calidad, pues se reporta la fecha exacta de extracción y el ID del marcador. De esta forma, se logra determinar el punto de extracción asociado a la salida del trazador y se asigna el tonelaje acumulado de la zanja al momento de la recuperación, a partir de la información disponible por el sistema *dispatch* de la operación.

No obstante lo anterior, si en determinadas zonas no se presenta recuperación de marcadores, el sistema podría indicar zonas sin movimiento de extracción.

La **Ilustración 3-10** esquematiza el procedimiento de aplicación de la tecnología *Smart Marker* para una mina subterránea explotada por hundimiento.

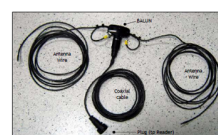
PROCEDIMIENTO	DESCRIPCIÓN
<p><b>Instalación</b></p> 	<p>Los lectores (readers) se instalan sobre las locaciones donde el equipo LHD extrae y transporte mineral.</p> <p>Posteriormente, los <i>smart markers</i> se activan e instalan en el cuerpo mineral.</p>
<p><b>Extracción</b></p> 	<p>Después de la instalación, los <i>smart markers</i> fluyen junto con el mineral hacia los puntos de extracción.</p> <p>El equipo LHD carga el mineral y algún <i>smart marker</i> dentro del balde.</p>
<p><b>Detección</b></p> 	<p>Los lectores instalados en el techo de la galería detectan automáticamente <i>smart markers</i> en el balde de LHD (permitiendo establecer la salida del marcador).</p> <p>La lectura de los datos se transfiere vía red o Bluetooth a un scanner (PC de mano para lectura de datos).</p>
<p><b>Análisis</b></p> 	<p>El análisis de flujo de roca comienza tan pronto como los <i>smart markers</i> son detectados automáticamente.</p> <p>Se utilizan herramientas gráficas para analizar los datos obtenidos.</p>

Ilustración 3-10 Proceso esquemático de la aplicación del sistema *Smart Marker* (Whiteman, Elexon Electronics 2009).

### 3.2.2. Principales componentes del sistema de marcadores inteligentes

Los elementos que componen el sistema de medición de flujo son los siguientes:

- a. **Smart Marker (Marcador inteligente)** –Es un dispositivo RFID (*Radio Frequency IDentification*), es decir, de identificación por radiofrecuencia, diseñado para soportar la tronadura en el nivel de producción y nivel de hundimiento. Este marcador puede transmitir su identificación ID única a un lector *Smart System*.
- b. **Smart Marker Barb (Araña)** –Corresponde a la funda del marcador, dispuesto en el extremo superior del dispositivo. Este elemento se utiliza para fijar el marcador en la zona deseada dentro de la perforación de instalación.
- c. **Reader (Lector)** –Detecta la fecha y la identificación de los trazadores que han sido extraídos y pasan por debajo del lector (o en un entorno cercano).



- d. **Activator (Activador)** –Es un activador inalámbrico del marcador, antes de proceder con la instalación, permitiendo la detección por el lector. Además, puede comprobar automáticamente el estado del trazador y desactivar algún trazador en caso necesario.
- e. **Scanner** –Corresponde a un PC de mano que actúa como interfaz para las lecturas y activaciones a través de una conexión inalámbrica *Bluetooth*. Permite acceder a los registros de ID de los marcadores activados y transferir los datos registrados en el lector



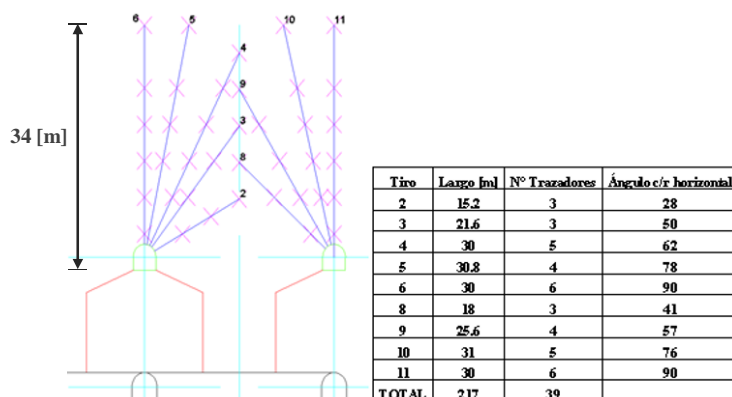
### 3.3. PRUEBA DE TRAZABILIDAD DE FLUJO GRAVITACIONAL EN SECTOR BLOQUE-2

#### 3.3.1. Diseño de campo cercano para la instalación de trazadores inteligentes

La finalidad del diseño es estudiar el flujo gravitacional en un conjunto de zanjas (zanja Z-30 a zanja Z-34) que incluye cambio de malla a partir de la zanja Z-33, maximizando la cantidad de información proveniente de los trazadores. Para ello, se emplearon los siguientes criterios:

- i. Tiempo ejecutable para la recuperación de trazadores entre dos a tres años.
- ii. Estudiar el flujo en campo cercano, reportando información sobre la interacción de las zonas de extracción en la zanja, pilar menor y pilar de mayor. Con esto, se puede determinar la recuperación de mineral, por tanto, la definición de mallas de extracción.
- iii. Facilidad en la instalación operacional, considerando la menor cantidad de perforaciones verticales (minimizar costo y tiempo de ejecución).
- iv. La prueba considera 390 trazadores en el campo cercano.

De esta forma, la propuesta de diseño incorpora 10 paradas de perforaciones radiales en el nivel de hundimiento, espaciadas a 10 [m], compuesta de 9 tiros que permiten instalar 39 trazadores en cada parada, dentro de una columna de hasta 34 [m]. La **Ilustración 3-11** exhibe la configuración del diseño experimental para la prueba de trazabilidad en Bloque-2 de mina Esmeralda.



**Ilustración 3-11** Sección Hw-Fw (Este-Oeste) del diseño experimental implementado para la prueba de trazabilidad de flujo gravitacional (*Block Caving Laboratory*, 2012).

La **Tabla 3-4** resume los parámetros de diseño de las perforaciones radiales ubicadas en el nivel de hundimiento, para la instalación de los trazadores de flujo.

**Tabla 3-4** Resumen de parámetros designados para el diseño experimental de la prueba de flujo en campo cercano.

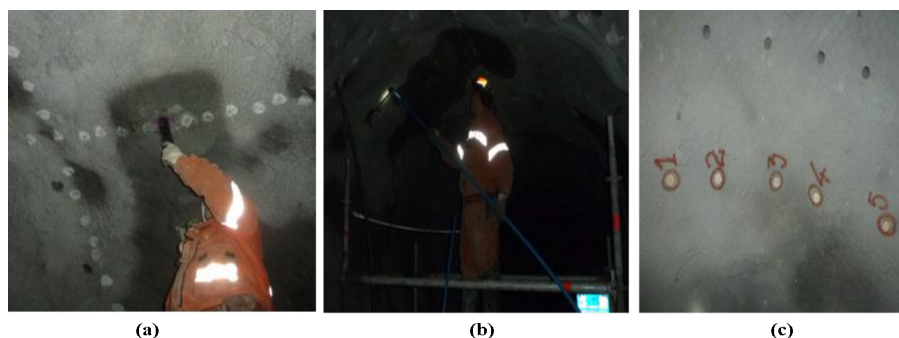
Perforación radial	Cantidad
Paradas en sector de prueba	10
Perforaciones por parada	9
Trazadores por parada	39
Metros perforados por parada [m]	217
Metros totales perforados [m]	2,170
Espaciamiento vertical trazadores [m]	5
Trazadores totales utilizados	390

### 3.3.2. Instalación operacional de trazadores para prueba de campo cercano

El procedimiento operacional para emplazar los trazadores en la zona de prueba se presenta a continuación.

- 1) Definir la parada de marcadores correspondiente, intercalada entre 2 paradas de socavación.
- 2) Realización de perforación radial en nivel de hundimiento de 3 pulgadas de diámetro.
- 3) Introducción del primer trazador con su respectiva araña al interior del pozo perforado, lo que otorga mayor adherencia dentro del tiro.
- 4) Una vez instalado el primer marcadores, se introduce una barra de PVC de 5 [m] de largo, que permite mantener la distancia entre cada marcador, evitando desplazamientos verticales.
- 5) Finalmente, con todos los trazadores ubicados, se introduce un cono de madera para sellar la instalación, impidiendo el descenso vertical de la columna de marcadores.

La **Ilustración 3-12** esquematiza parte del procedimiento operacional ejecutado durante la instalación de los trazadores desde el nivel de hundimiento del sector de prueba.



**Ilustración 3-12** Proceso de instalación de trazadores en prueba de campo cercano. (a) Instalación de trazador. (b) Instalación de espaciador PVC. (c) Sellado de tiros. (Viera, 2014).

El resultado operacional de la instalación de marcadores en Bloque-2 de mina Esmeralda se presenta en la **Ilustración 3-13**. Cabe destacar, según lo observado en la **Ilustración 3-13**, que

existen instalaciones no realizadas (simbolizadas en color rojo), debido principalmente a la dificultad y nula posibilidad de introducir trazadores dentro de los tiros ejecutados. Por tanto, el porcentaje de cumplimiento respecto al diseño original corresponde a 77% (301 marcadores instalados de 390).

El Anexo A entrega, en detalle, el diseño operacional de cada parada en el nivel de hundimiento.

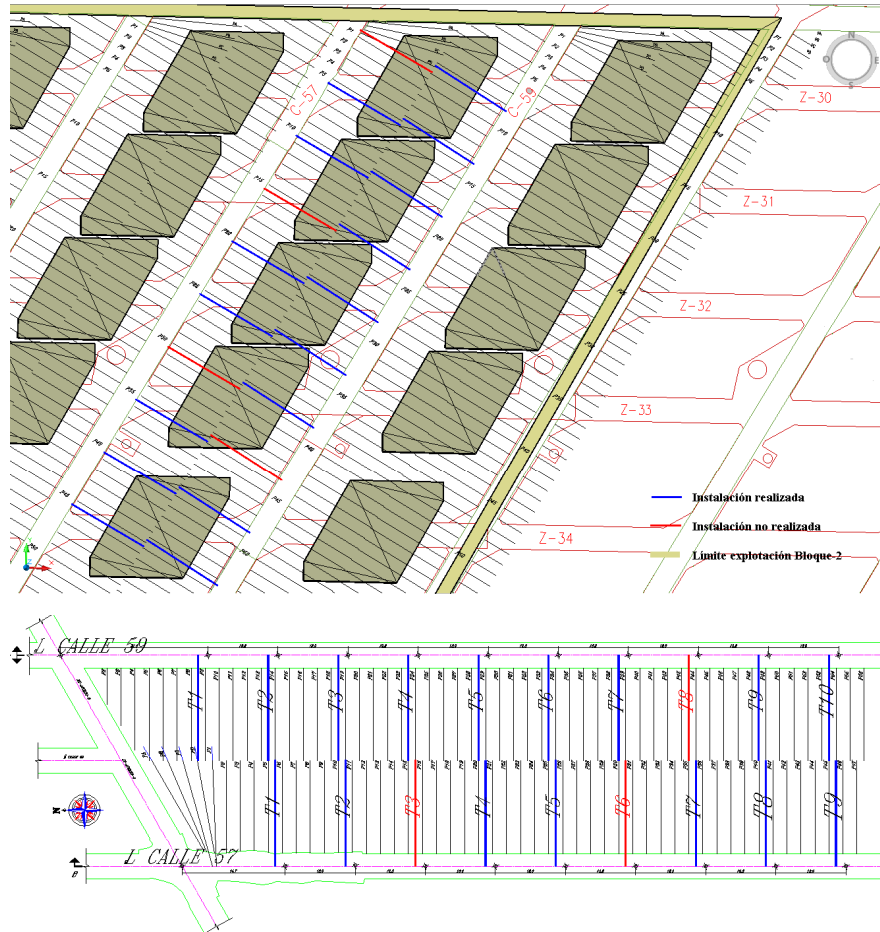
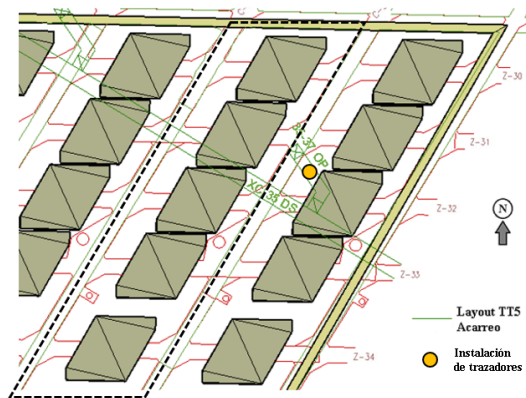


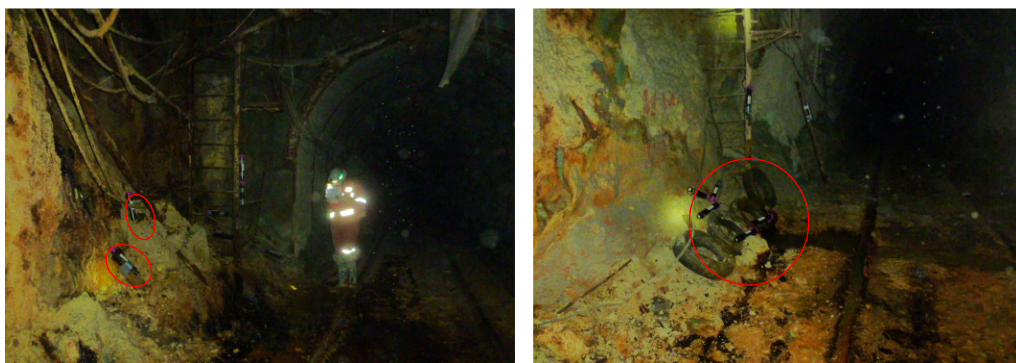
Ilustración 3-13 Estado operacional actual de la instalación de trazadores en Bloque-2 de mina Esmeralda.

### 3.3.3. Instalación operacional de trazadores en nivel Teniente 5 Acarreo

A 71 [m] sobre el nivel de hundimiento de Bloque-2 se sitúa el nivel de transporte principal de FFCC Teniente 5, donde las galerías se encuentran arriba del área productiva. En este sector se gestionó la instalación de siete trazadores en el piso del cruzado XC-35DS OP 35-37. La **Ilustración 3-14** muestra la ubicación de los marcadores respecto al sector de prueba, mientras que la **Ilustración 3-15** exhibe la disposición de los trazadores a lo largo de la galería.



**Ilustración 3-14** Instalación operacional de trazadores en el nivel de transporte principal de FFCC Teniente 5.

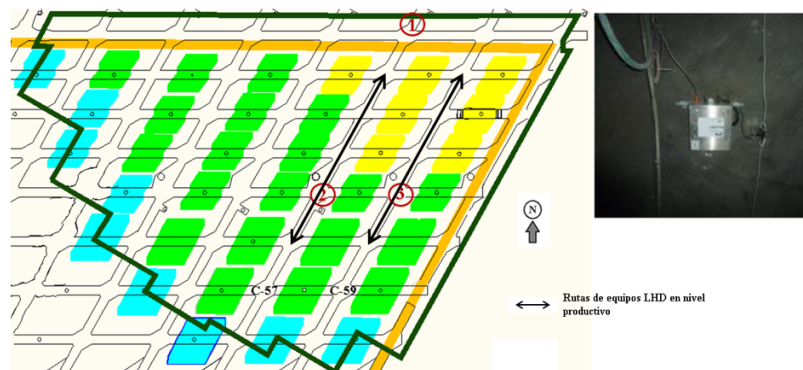


**Ilustración 3-15** Instalación de trazadores en las inmediaciones del nivel FFCC Teniente 5.

El objetivo de esta instalación corresponde a estudiar el comportamiento vertical del flujo de material en el entorno superior al campo cercano.

### 3.3.4. Instalación de lectores

Para registrar la mayor cantidad de marcadores recuperados, la estrategia de instalación de lectores contempla asegurar que todos los equipos LHD que deban operar en el sector de prueba sean detectados por el sistema. De esta manera, la ubicación de los lectores en el nivel de producción de Bloque-2 de mina Esmeralda se representa por los números entregados en la **Ilustración 3-16**.



**Ilustración 3-16** Representación de la instalación de lectores en nivel de producción de Bloque-2 en mina Esmeralda.

Conjuntamente, en marzo de 2014 se instaló un nuevo lector, ubicado en el nivel de transporte principal de ferrocarriles (Teniente 8). Esto permite que todos los marcadores recuperados desde el sector de prueba en Bloque-2 sean registrados, lo que se traduce en un mayor control y evitando la pérdida de información.

### 3.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

De acuerdo con la revisión de antecedentes del estado actual de la prueba de trazabilidad, se describen las principales conclusiones del capítulo.

- ✓ La instalación de marcadores inteligentes en Bloque-2 de mina Esmeralda se considera como una etapa exitosa, logrando un alto grado de control durante la operación y sin mayores percances durante el período.
- ✓ El porcentaje de cumplimiento en la instalación de trazadores en el nivel de hundimiento corresponde a 77% respecto al diseño de la prueba, lo anterior representa 301 marcadores dispuestos en la columna mineral del sector experimental, de un total de 390 trazadores indicados por diseño.
- ✓ Se destaca el gran nivel de confiabilidad en el funcionamiento de los equipos dispuestos para ejecutar la prueba de trazabilidad, en términos del proceso de registro de información de marcadores recuperados. En este ámbito, es importante señalar la instalación de lectores en los niveles principales de movimiento de mineral (tres lectores en el nivel de producción y un lector ubicado en el nivel de transporte principal), y en virtud de lo anterior, aumentar la probabilidad de mantener un registro continuo de información.



## **CAPÍTULO 4**

### **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

*Este Capítulo contiene la metodología adoptada para el estudio. La primera sección presenta una descripción de las diferentes etapas de trabajo a lo largo de la investigación. En tanto, la segunda sección define los criterios y condiciones para el procesamiento de información.*

#### **4.1. INTRODUCCIÓN**

Según lo abordado en el Capítulo 2, los estudios desarrollados para comprender el comportamiento del flujo gravitacional se basan principalmente en pruebas de laboratorio, considerando en sus procedimientos medios granulares para escalar finalmente los efectos de la explotación en una mina de hundimiento. Por otro lado, las pruebas a escala mina se han ejecutado con diferentes metodologías. Todo lo anterior indica la necesidad de plantear un nuevo método para procesar la información de los trazadores recuperados.

El objetivo de este Capítulo es entregar una metodología para el procesamiento y análisis de información obtenida en el caso de estudio.

#### **4.2. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS DE TRABAJO PARA LA INVESTIGACIÓN**

El procedimiento de trabajo para desarrollar el estudio se compone de cuatro etapas, descritas a continuación.

##### **4.2.1. Etapa I: Generación de la base de datos**

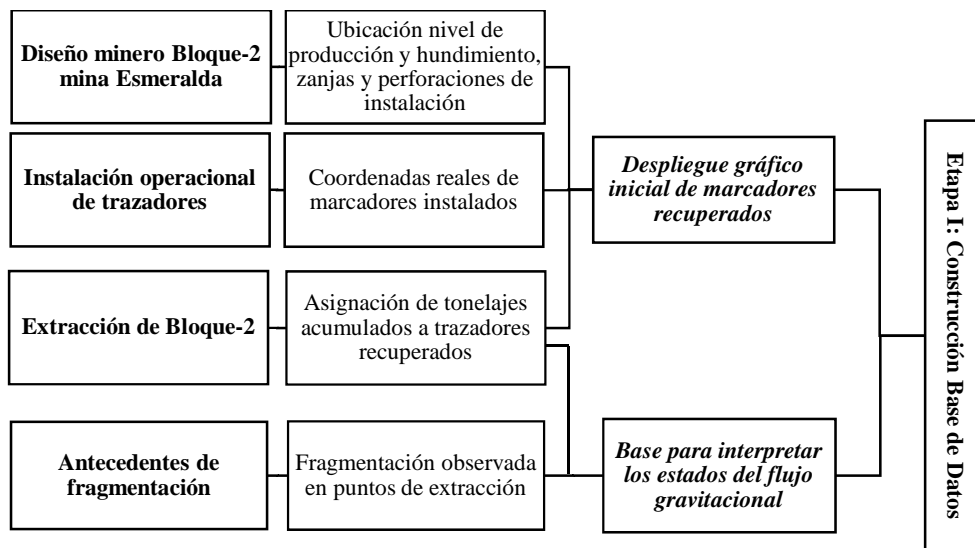
Para fijar la línea base de antecedentes, se requiere establecer la información adecuada para cumplir con el progreso de la investigación. Así, el objetivo de esta fase es conocer el contexto real en las cuales se ha implementado la prueba, permitiendo representar el estado inicial del sistema e interpretar los efectos ocurridos en estados posteriores. De esta forma, la elaboración de la base de datos debe cumplir dos propósitos fundamentales:

1. Definir la posición inicial de los trazadores y conocer la recuperación de los marcadores desde los puntos de extracción durante la operación.
2. Disponer de información de producción para la asignación de tonelaje a los trazadores extraídos; fundar la base para analizar los aspectos operacionales que intervienen en el comportamiento del flujo gravitacional en campo cercano.

Por consiguiente, para cumplir con lo anterior se realizan las siguientes actividades, en orden secuencial:

- a. Colectar información de diseño de Bloque-2, para establecer la ubicación real del nivel de hundimiento, nivel de producción, perforaciones de instalación de marcadores y geometría de las zanjas evaluadas, permitiendo el correcto despliegue espacial de los resultados.
- b. Recopilar la información de la instalación operacional de trazadores, para definir el número de trazadores realmente dispuestos en el nivel de hundimiento.
- c. Recolectar antecedentes de la extracción histórica dentro del sector de prueba, desde el sistema *dispatch*, y reunir datos de granulometría observada en los puntos de extracción.

La **Ilustración 4-1** esquematiza la metodología para la elaboración de esta etapa.



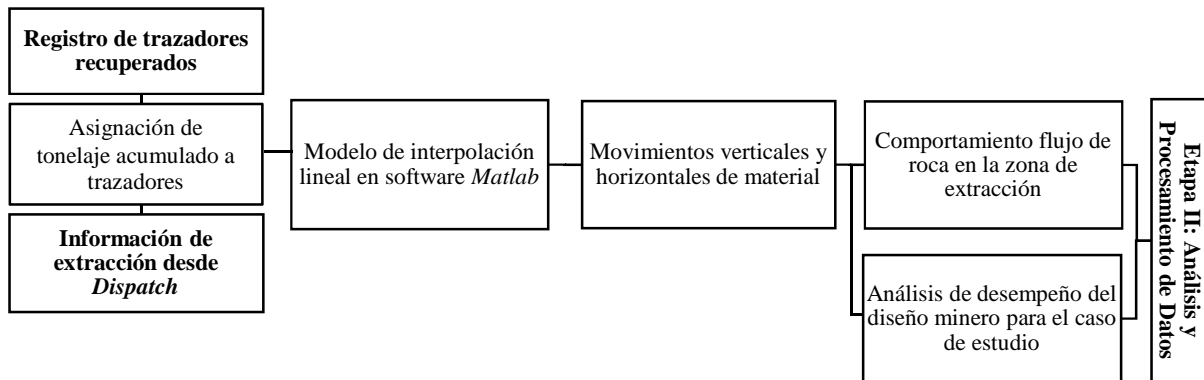
**Ilustración 4-1** Procedimiento para realizar la etapa I de la metodología de trabajo.

#### 4.2.2. Etapa II: Interpolación lineal de datos –procesamiento de información

Esta segunda etapa considera el registro de aparición de los trazadores y la asignación de tonelaje acumulado de la zanja correspondiente, con la información procedente del sistema *Dispatch*, para ejecutar el método de interpolación lineal. Así, es posible estimar y desplegar gráficamente la geometría y comportamiento en la zona de extracción entorno a los marcadores extraídos. Las actividades designadas para cumplir con la realización de esta fase se detallan a continuación:

- a. Comparar el registro de aparición de trazadores (desde la información de los lectores) con información del sistema *dispatch*, para establecer el punto de extracción de salida del marcador y la zanja correspondiente.
- b. Elaboración y ejecución del código de interpolación lineal en el software *Matlab2010*.
- c. La asignación de tonelaje acumulado a los marcadores define una medida de pseudo temporalidad para posteriores análisis.

La **Ilustración 4-2** presenta un resumen del procedimiento de esta etapa.



**Ilustración 4-2** Procedimiento para realizar la etapa II de la metodología de trabajo.

### 4.2.3. Fase III: Análisis de variables operacionales

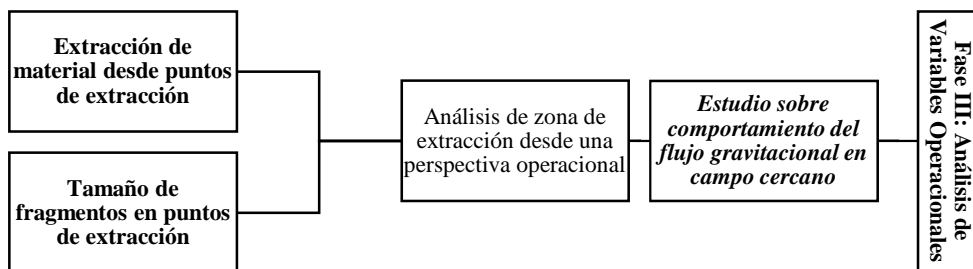
El análisis de los factores operacionales permite estudiar la incidencia que puedan tener estas variables en la geometría y comportamiento de la zona de extracción en el campo cercano. Se propone el análisis de dos variables consideradas como fundamentales para explicar el fenómeno del flujo gravitacional:

- i. La extracción de material.
- ii. El tamaño de fragmentos observados en el punto de extracción.

Este tipo de análisis se efectúa a los puntos de extracción de cada zanja dentro del sector de prueba, considerando la información adquirida en la construcción de la base de datos:

1. Extracción de los puntos de extracción durante el período de la prueba de trazabilidad.
2. Análisis granulométrico de material fragmentado en cada punto de extracción, utilizando información fotográfica y clasificación de tamaño durante inspecciones en terreno.

La **Ilustración 4-3** presenta una síntesis de esta etapa de trabajo.



**Ilustración 4-3** Procedimiento para realizar la etapa III de la metodología de trabajo.

#### 4.2.4. Fase IV: Generación del modelo conceptual de flujo gravitacional

La finalidad de esta etapa es plantear un nuevo modelo conceptual de flujo dentro del campo cercano, que incorpore todos los resultados observados en esta investigación, para complementar el conocimiento acerca del comportamiento de la zona de extracción. En este sentido, se incorporan antecedentes relacionados con:

- i. El comportamiento general del flujo, como resultado de la recuperación de trazadores.
- ii. El efecto que tiene la extracción dentro de la zona de extracción.
- iii. Los diferentes movimientos que pueden experimentar los fragmentos de roca.

#### 4.3. CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS MEDIANTE INTERPOLACIÓN LINEAL

Esta sección tiene por objetivo presentar los supuestos y limitaciones adoptadas para el desarrollo de la interpolación lineal.

- i. **Condición inicial de los trazadores** –Se asume que la ubicación real de los marcadores es idéntica a las coordenadas del diseño experimental. Además, se considera que las tronaduras de socavación y otros tipos de tronaduras en los alrededores no alteran la ubicación originalmente definida para los trazadores.

Este supuesto se basa en limitar las condiciones iniciales de los trazadores a un estado conocido. Para ello, se implementaron elementos que evitan perturbaciones en los trazadores instalados, desde la utilización de una barbilla (o araña) en los marcadores, para otorgar mayor adherencia dentro de la perforación, hasta la introducción de barras de PVC para mantener la distancia entre cada trazador y evitar desplazamientos verticales.

- ii. **Asignación de tonelaje a trazadores recuperados** –Para otorgar una medida de temporalidad a la zona de interpolación lineal, el tonelaje asociado a la recuperación de marcadores se asignará a nivel de extracción acumulada para cada zanja.

Sobre esta perspectiva se obtiene un resultado representativo de la zona de extracción, que incorpora las condiciones operativas en el comportamiento del flujo. Por otro lado, la condición inicial de extracción para efectos de la interpolación lineal de datos, es asumir un tonelaje de 0 [kton] desde el techo de la galería zanja.

- iii. **Método de interpolación lineal** –Se establece la utilización de una rutina de programación en el software computacional *Matlab2010*, para evaluar, interpretar y delimitar aproximadamente el comportamiento del flujo de extracción de material dentro de los límites en el que se conoce información de trazadores extraídos.

Así, la interpolación lineal proporciona un método de estimación que transforma datos discretos en una envolvente continua de tonelaje acumulado de extracción para cada zanja, mediante una codificación simple, reducida en tiempo y capacidad de cálculo. Sin embargo, una de las principales limitaciones del método de interpolación lineal corresponde a que los resultados obtenidos no entregan movimientos lógicos.

La función utilizada corresponde a *TriScatteredInterp*, que interpola nodos (*query points*) en un espacio 3D considerando la distancia lineal entre datos de la muestra real. Este método se basa en la triangulación de Delaunay, para entregar una superficie que siempre pasa por los datos originales.

- iv. **Condiciones de borde** –En relación a las condiciones para ajustar la definición de los límites de la zona de extracción, se asocian tres tipos de criterios:
- La interpolación lineal, por sobre el límite de los marcadores recuperados, entrega zonas en blanco, precisando el contorno estimado de la zona de extracción. Como consecuencia, la frontera de los sectores interpolados presenta bordes rectos.
  - Para añadir la forma de la batea de cada zanja, en la interpolación lineal, se agregan marcadores ficticios que relacionan la posición de diseño y el tonelaje esperado de material socavado (denominado repele). En virtud de lo anterior, los resultados están supeditados a exhibir la ruta de movimiento de extracción a través de la zanja.
  - Para evitar distorsiones en los límites de la zona de extracción, se considera que el volumen resultante de la zona de extracción está delimitado por las posiciones más externas de los marcadores recuperados. Más aún, se asume que el tonelaje de la zona de extracción interpolada es representativa del tonelaje realmente extraído.

#### 4.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Según lo abordado en el Capítulo 2, actualmente no existe dentro de la literatura una técnica que permita procesar la información de trazadores inteligentes en una prueba a escala mina. Sobre esta base, se requiere generar un procedimiento novedoso y único para el manejo de datos.

Por este motivo se formuló una metodología que incorporara antecedentes operacionales y herramientas computacionales para el estudio de flujo gravitacional. Adicionalmente, el presente método permite verificar la influencia real que tienen las variables operacionales (extracción y fragmentación) en el comportamiento de la zona de extracción y analizar el desempeño productivo real del diseño minero para el caso de estudio.

Este Capítulo presenta la descripción de una nueva metodología experimental, desarrollada para procesar la información de trazadores inteligentes recuperados, cumpliendo las siguientes características:

- ✓ Transforma datos discretos en el espacio en una envolvente continua de material extraído a nivel de zanja, permitiendo el estudio y análisis en 2D y 3D del flujo gravitacional.
- ✓ Permite estimar el desempeño del *caving*, esto es, el comportamiento de la zona de extracción en campo cercano, altura de interacción sobre el pilar menor y pilar mayor, y cumplimiento del diseño minero en la recuperación de reservas.
- ✓ Asocia factores operacionales, como la extracción de material y el tamaño de fragmentos en puntos de extracción, con el comportamiento real del *caving*.

## CAPÍTULO 5

### PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

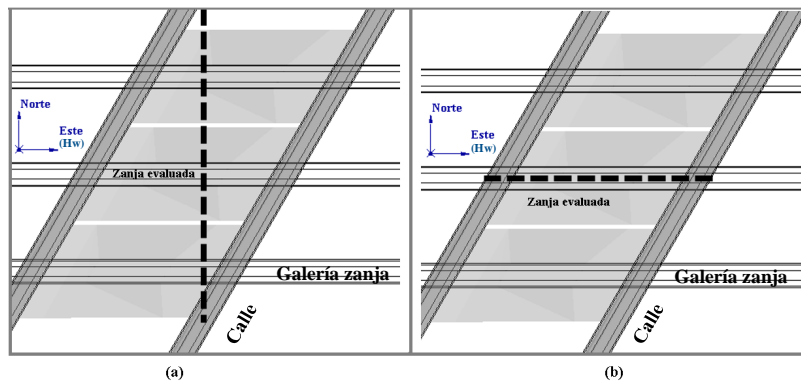
*Este Capítulo contiene un completo análisis sobre el comportamiento del flujo gravitacional y el desempeño real del diseño minero de Bloque-2 de mina Esmeralda. Los principales resultados indican que la malla de extracción de 30 x 20 m entrega las condiciones de interacción entre zonas de flujo adyacentes. El ángulo de flujo y altura de interacción promedio, a través del pilar mayor, se estimó en 67 grados y 37 m respectivamente. El comportamiento del flujo de roca es regular o irregular dependiendo de la extracción y la granulometría del material. Por último, se entiende que estos resultados corresponden a un aspecto clave en el diseño del nivel productivo y control de la producción en mina El Teniente.*

#### 5.1. INTRODUCCIÓN

Respecto a lo concluido en el Capítulo 2, se ha evidenciado una indudable necesidad de mejorar el conocimiento relacionado al comportamiento de la zona de extracción, con información confiable en condiciones a escala mina (Halim, 2010). Del mismo modo, resulta interesante notar que, en gran parte de las pruebas realizadas para comprender el fenómeno del flujo gravitacional, no existe un vínculo entre los factores operacionales, como la extracción y granulometría de material, con las características del flujo. Dentro de este contexto, el Capítulo tiene por objetivo procesar la información proveniente desde los trazadores recuperados, y complementar estos datos con un análisis que relacione el efecto del material extraído y la fragmentación en el comportamiento de la zona de extracción, para entregar un estudio completo de flujo gravitacional a escala mina. Dentro de las consideraciones y simplificaciones adoptadas, se destacan las siguientes:

##### a. Procesamiento de datos

- i. La zona de extracción del campo cercano se define como el límite de la posición de trazadores que han sido extraídos desde los puntos de extracción, generando una sola envolvente para cada zanja estudiada.
- ii. La interpolación lineal no se ejecuta en sectores sobre el límite de marcadores recuperados (condición de borde). Con esto, los contornos de la zona de extracción son rectos.
- iii. Los resultados entregados por la interpolación lineal no interpreta movimientos lógicos de material. El análisis se realiza a partir de evidencias basadas en el comportamiento general del tonelaje extraído acumulado para cada zanja.
- iv. Las figuras exhibidas, como resultado de la interpolación lineal, corresponden a perfiles 2D a través de los ejes transversal (**Ilustración 5-1a**) y longitudinal a la zanja evaluada (**Ilustración 5-1b**).



**Ilustración 5-1** Perfiles aplicados a los resultados de la interpolación lineal. (a) Vista transversal a la zanja. (b) Vista longitudinal a la zanja.

### b. Análisis de extracción y granulometría

- i. La extracción de material y fragmentación de partículas se consideran las variables operacionales más importantes en la explotación por hundimiento.
- ii. Se asume que los antecedentes de extracción incorporan las detenciones por colgaduras, sobretamaños, reparaciones, entre otros. Por tanto, se considera la extracción como una información robusta para el análisis.
- iii. Se definen tres tipos de extracción: regular (extracción similar desde ambos puntos en el tiempo), irregular (extracción desigual desde uno de los puntos) y no simultánea (extracción solo por uno de los puntos de la zanja).
- iv. Para efectos del análisis de granulometría, se utilizará solo información de terreno asociada a inspecciones visuales en los puntos de extracción estudiados. Adicionalmente, se considera que los antecedentes de granulometría son representativos de la fragmentación en la columna de material.

Las hipótesis de trabajo que guían la investigación del Capítulo corresponden a las siguientes:

- (1) El comportamiento del flujo gravitacional no es caótico por naturaleza, sino que tiene carácter regular dependiendo directamente de la extracción y el tamaño del material fragmentado.
- (2) Se espera la existencia de interacción entre las zonas de flujo adyacentes, tanto para la malla de extracción de 30 x 20 [m] como para la malla de 30 x 24 [m].

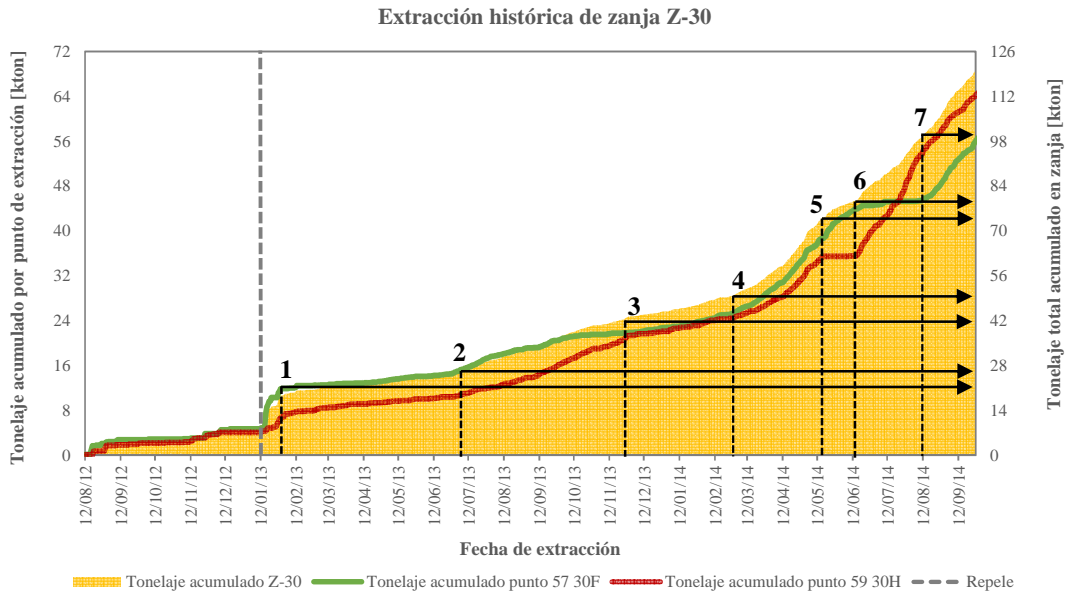
## 5.2. PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE VARIABLES OPERACIONALES

A partir de los antecedentes recopilados, las siguientes secciones presentan el análisis para cada zanja del sector de estudio.

### 5.2.1. Análisis en zanja Z-30

#### 5.2.1.1. Extracción de material en zanja Z-30

La extracción durante el período de prueba comienza en agosto de 2012 hasta septiembre de 2014. La **Ilustración 5-2** muestra el perfil de tonelaje extraído acumulado en la zanja Z-30 y sus respectivos puntos de extracción.



**Ilustración 5-2** Perfil de extracción acumulada para zanja Z-30 (área) y los puntos 57 30F/59 30H (línea continua).

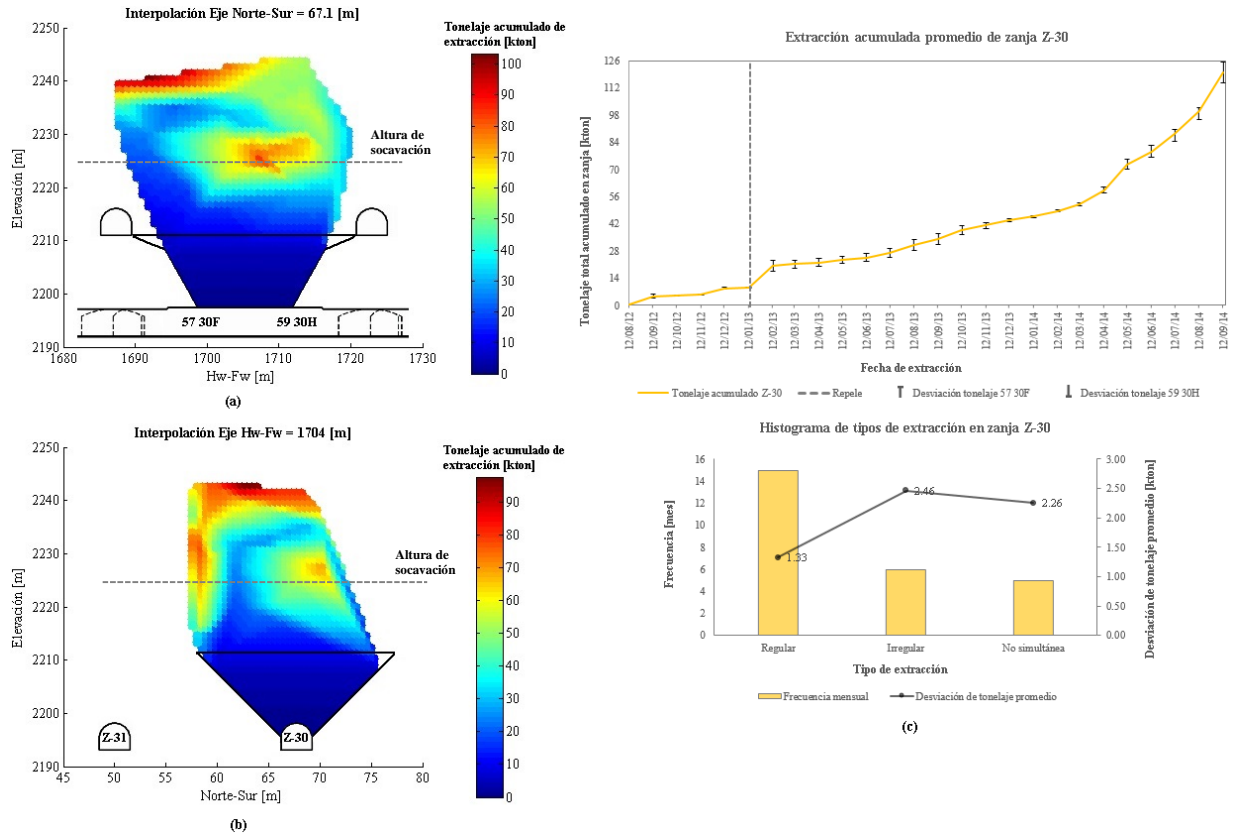
La figura indica siete períodos con diferentes tipos de extracción, detallados a continuación:

1. **Período 1** (20/01/13 – 17 [kton]): Se observa un lapso breve con extracción irregular desde el punto 57 30F.
2. **Período 2** (28/06/13 – 28 [kton]): Hasta este período se percibe un tiraje regular desde los puntos de extracción de la zanja.
3. **Período 3** (30/11/13 – 42 [kton]): Se aprecia una extracción irregular en el punto 59 30H hasta este período.
4. **Período 4** (10/03/14 – 54 [kton]): Es posible observar extracción regular en la zanja.
5. **Período 5** (12/05/14 – 73 [kton]): Se presenta extracción irregular desde el punto 57 30F.
6. **Período 6** (08/07/14 – 87 [kton]): En este período se aprecia no simultaneidad en la extracción de la zanja, con detención en el punto 59 30H.
7. **Período 7** (15/08/14 – 100 [kton]): Se observa extracción no simultánea en la zanja. Posterior a este período existe una extracción regular desde los puntos.



5.2.1.2. Interpolación de la zona de extracción en zanja Z-30

La interpolación lineal en esta zanja cuenta con 37 trazadores recuperados. La evolución de la zona de extracción se presenta en la **Ilustración 5-3**. La zona de extracción alcanza una altura de 34 [m] aproximadamente. Adicionalmente, se observa que el flujo de extracción, para ambos perfiles, muestra sectores regulares y definidos de material recuperado.



**Ilustración 5-3** Interpolación de la zona de extracción para la zanja Z-30. (a) Perfil longitudinal a la batea. (b) Perfil transversal a la batea. (c) Estadísticas mensuales para la extracción en zanja Z-30.

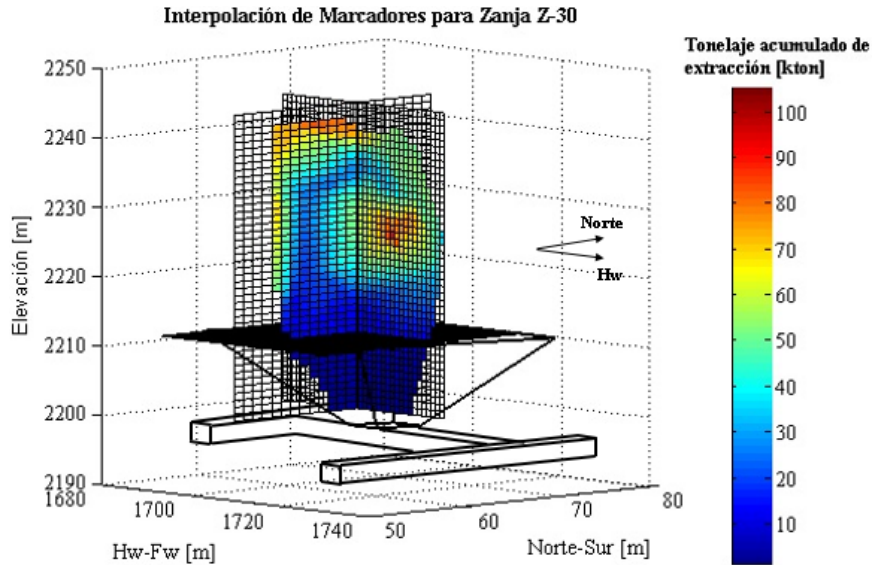
La recuperación de material a través del perfil longitudinal (**Ilustración 5-3a**) comienza en la región sobre el pilar mayor, con menor preponderancia, en términos de altura y velocidad relativa, para la zona central de la zanja. Mientras aumenta la extracción acumulada, la recuperación se desplaza hacia el centro de la zanja. Finalmente, se recupera material remanente en el centro de la batea y en la región superior de la zona de extracción. Un comportamiento similar se aprecia en la recuperación de material a través del perfil transversal (**Ilustración 5-3b**).

Considerando el análisis de extracción (**Ilustración 5-3c**), es posible observar que la regularidad del flujo depende de la forma en que se extrae el material desde los puntos de la zanja. Así, la desviación en la extracción promedio mensual tiene diferentes efectos, señalados a continuación:

- Mientras la extracción sea regular, una desviación promedio acumulada de 1.33 [kton] no afecta el comportamiento regular del flujo.

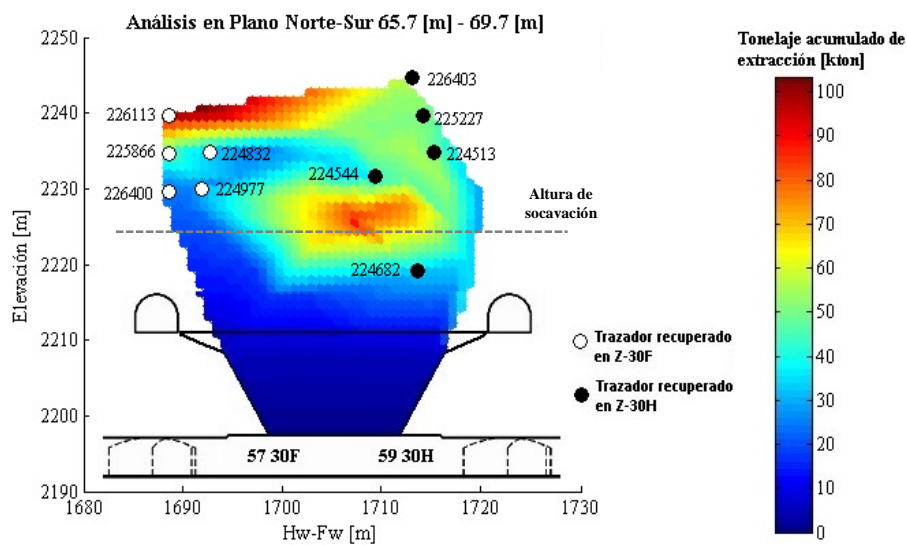
- Cuando la extracción es irregular o no simultánea, una desviación promedio acumulada de 2.46 y 2.26 [kton], respectivamente, provoca movimientos preferentes de partículas sobre el pilar mayor y recuperación de material ubicado en la región central de la zona de extracción.

Combinando los perfiles longitudinal y transversal, se entrega una representación tridimensional de la interpolación de trazadores recuperados (**Ilustración 5-4**), con el fin de complementar el análisis del comportamiento del flujo.



**Ilustración 5-4** Representación tridimensional de los perfiles longitudinal y transversal de la interpolación lineal en la zanja Z-30. Cortes en Hw-Fw=1704 m, N-S=67.7 m, Z=2211 m.

El desplazamiento de trazadores dentro de la zona de extracción se presenta en la **Ilustración 5-5**. En términos generales, no existe influencia de la extracción sobre la generación de movimientos horizontales en el flujo gravitacional.



**Ilustración 5-5** Movimiento de trazadores dentro de la zona de extracción hacia los puntos de extracción de la zanja Z-30.

5.2.1.3. Granulometría observada en zanja Z-30

La Ilustración 5-6 entrega el cambio de la granulometría observada en la zanja Z-30. Es posible notar que, para ambos puntos de extracción, la evolución en el tamaño de roca es similar a lo largo del tiempo y de la altura extraída.

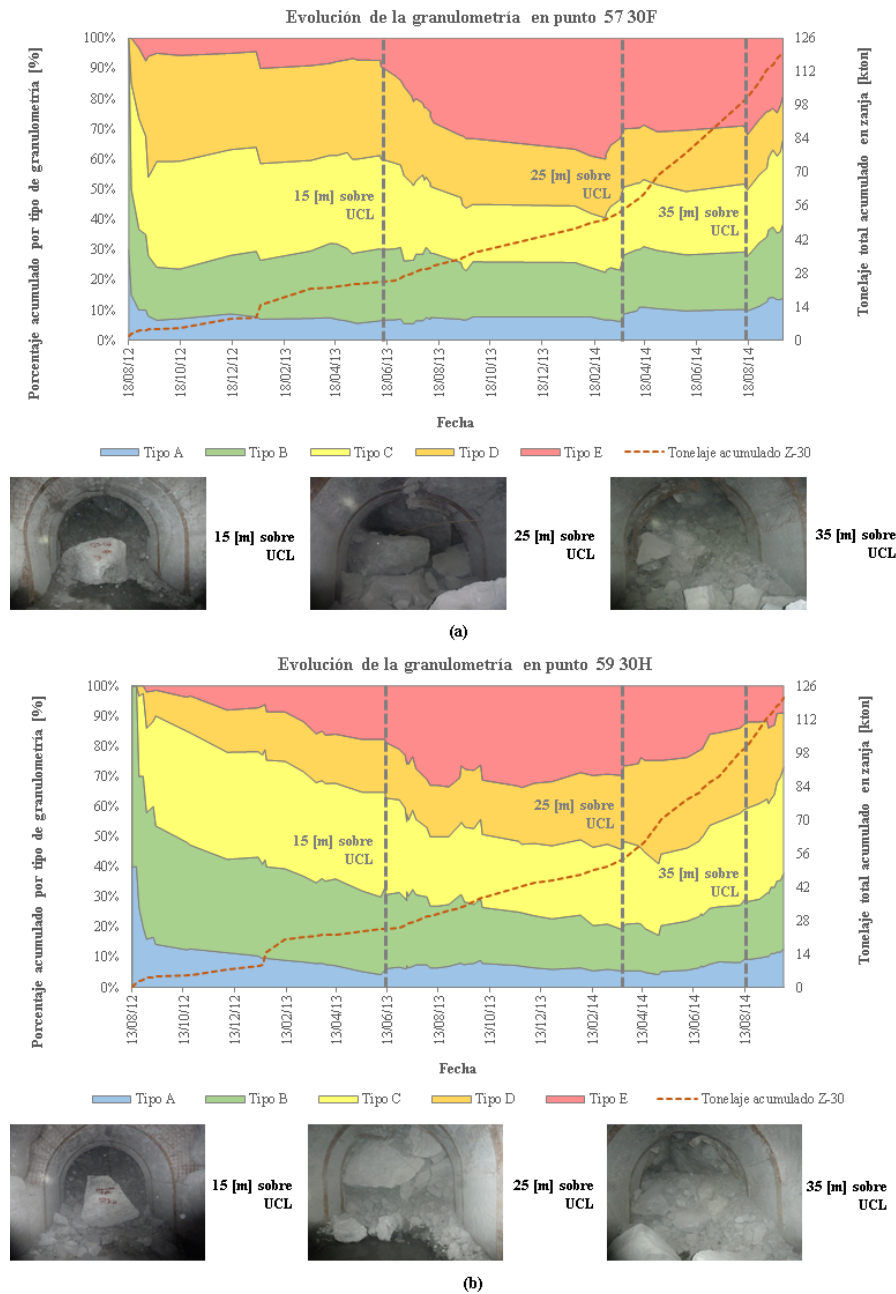


Ilustración 5-6 Evolución de la granulometría observada en la zanja Z-30 y alturas de columna extraídas. (a) Punto de extracción 57 30F. (b) Punto de extracción 59 30H.

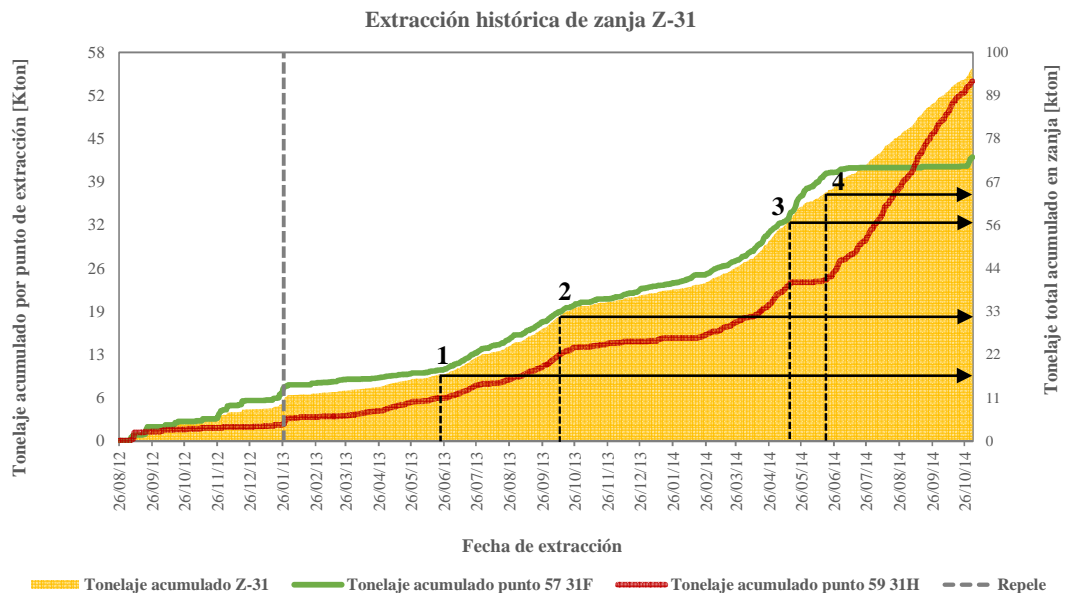
Considerando el análisis de extracción de material y comportamiento de la zona de extracción, es posible advertir dos efectos sobre el tamaño de partícula observado en la zanja:

- La irregularidad inicial en la extracción, asociada a un flujo preferente sobre el pilar mayor, permite el transporte de material con baja presencia de roca gruesa (granulometría tipo E) en el punto 57 30F.
- Durante una extracción irregular del punto 59 30H, asociada a flujo preferente sobre el pilar mayor, se aprecia una alta presencia de roca gruesa (porcentaje cercano al 30% de granulometría tipo E).

## 5.2.2. Análisis en zanja Z-31

### 5.2.2.1. Extracción de material en zanja Z-31

La extracción de material en el periodo de análisis comienza desde agosto de 2012 hasta noviembre de 2014. La **Ilustración 5-7** presenta el perfil de tonelaje extraído acumulado en la zanja Z-31 y sus respectivos puntos de extracción.



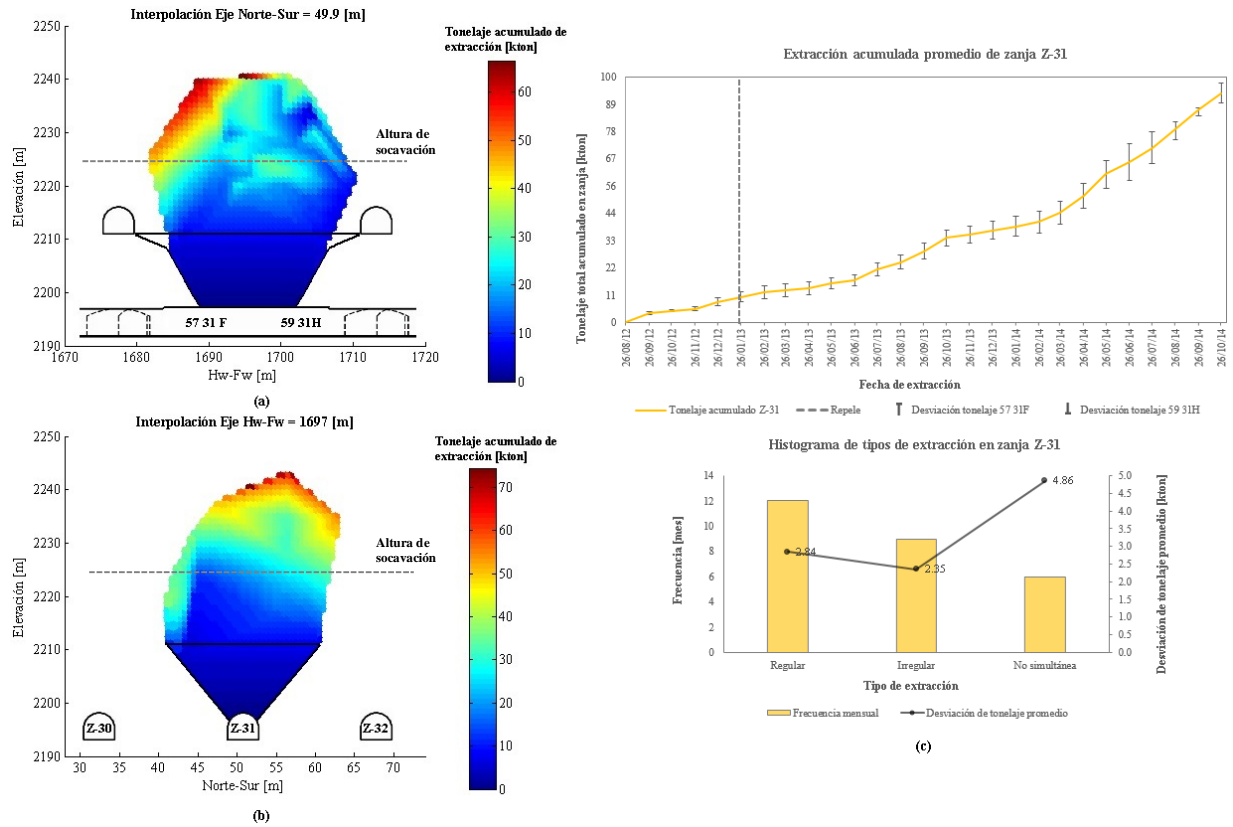
**Ilustración 5-7** Perfil de extracción acumulada para zanja Z-31 (área) y los puntos 57 31F/59 31H (línea continua).

La **Ilustración 5-7** indica cuatro períodos con diferentes tipos de extracción, mencionados a continuación:

1. **Período 1** (26/06/13 – 16 [kton]): Hasta este período se observa una extracción irregular desde el punto 57 31F.
2. **Período 2** (10/10/13 – 30 [kton]): Se percibe un tiraje regular en la zanja.
3. **Período 3** (17/05/14 – 56 [kton]): Se aprecia una extracción irregular en el punto 57 31F.
4. **Período 4** (10/03/14 – 54 [kton]): Hasta este período, se advierte extracción no simultánea en el punto 57 31F. Posteriormente, existe extracción no simultánea en el punto 59 31H.

5.2.2.2. Interpolación de la zona de extracción en zanja Z-31

La interpolación lineal en esta zanja emplea 26 trazadores recuperados. El crecimiento de la zona de extracción se entrega en la **Ilustración 5-8**. La zona de extracción alcanza una altura de 32 [m] aproximadamente. Asimismo, se observa que el flujo de extracción, para ambos perfiles, exhibe sectores regulares y definidos de material recuperado.



**Ilustración 5-8** Interpolación de la zona de extracción para la zanja Z-31. (a) Perfil longitudinal a la batea. (b) Perfil transversal a la batea. (c) Estadísticas mensuales para la extracción en zanja Z-31.

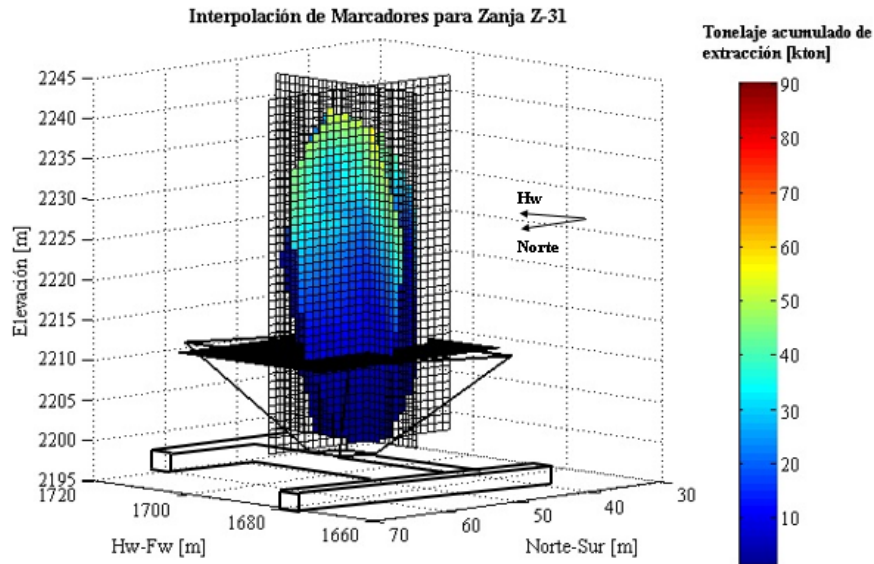
La recuperación de material a través del perfil longitudinal (**Ilustración 5-8a**) comienza en la región sobre el pilar mayor, con menor predominio de altura y velocidad relativa para la zona central de la zanja. Mientras aumenta la extracción acumulada, la recuperación se desplaza hacia el centro de la zanja. Finalmente, se recupera material remanente en el centro de la batea y en la región superior de la zona de extracción. Un comportamiento similar se aprecia en la recuperación de material a través del perfil transversal (**Ilustración 5-8b**).

Considerando el análisis de extracción (**Ilustración 5-8c**), es posible inferir que la regularidad del flujo depende de la forma en que se extrae el material desde los puntos de la zanja. Por tanto, una desviación en la extracción promedio mensual tiene diferentes consecuencias:

- Mientras la extracción sea regular, una desviación promedio acumulada de 2.84 [kton] no afecta el comportamiento regular del flujo.
- Cuando la extracción es irregular, una desviación promedio acumulada de 2.35 [kton] genera movimientos preferentes de material sobre el pilar mayor.

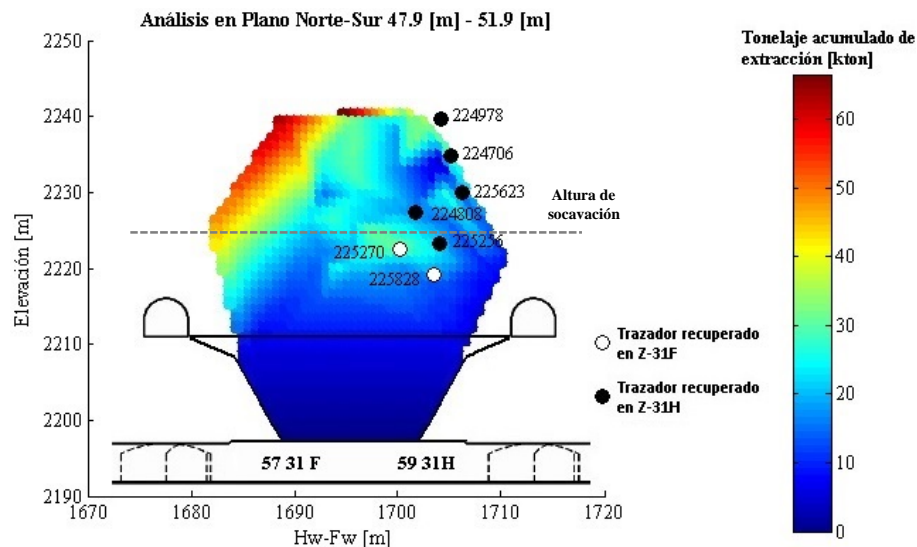
- En este caso no es posible analizar la influencia de la no simultaneidad en la extracción sobre el comportamiento del flujo.

La **Ilustración 5-9** corresponde a una representación tridimensional de la interpolación de trazadores recuperados, con el fin de complementar el análisis del comportamiento del flujo.



**Ilustración 5-9** Representación tridimensional de los perfiles longitudinal y transversal de la interpolación lineal en la zanja Z-31. Cortes en Hw-Fw=1697 m, N-S=49.9 m, Z=2211 m.

El desplazamiento de trazadores dentro de la zona de extracción se incluye en la **Ilustración 5-10**. En la figura se aprecia un efecto importante; la extracción irregular del punto 57 31F podría generar la migración de los trazadores 225828 y 225270 hacia el mismo punto 57 31F, presentando elevados desplazamientos laterales dentro de la zona de extracción.



**Ilustración 5-10** Movimiento de trazadores dentro de la zona de extracción hacia los puntos de extracción de la zanja Z-31.

Por consiguiente, se deduce que la irregularidad en la extracción, sostenida en el tiempo, puede producir una alta probabilidad de originar mezcla lateral dentro de la zona de extracción.

5.2.2.3. Granulometría observada en zanja Z-31

La Ilustración 5-11 presenta el cambio de la granulometría observada en la zanja Z-31. Se puede notar que, para ambos puntos de extracción, la evolución en el tamaño de roca es levemente diferente a lo largo del tiempo y de la altura extraída.

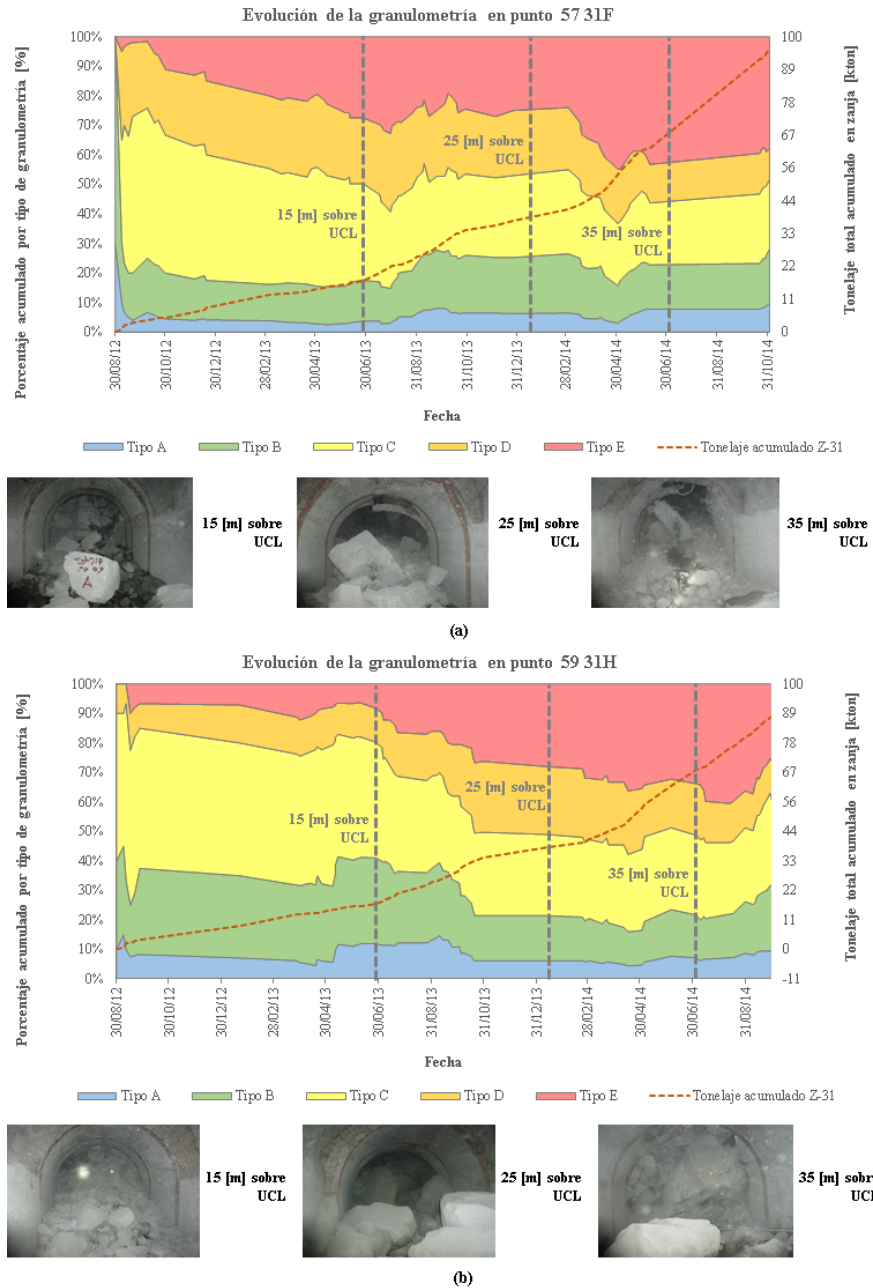


Ilustración 5-11 Evolución de la granulometría observada en la zanja Z-31 y altura de columna extraída. (a) Punto de extracción 57 31F. (b) Punto de extracción 59 31H.

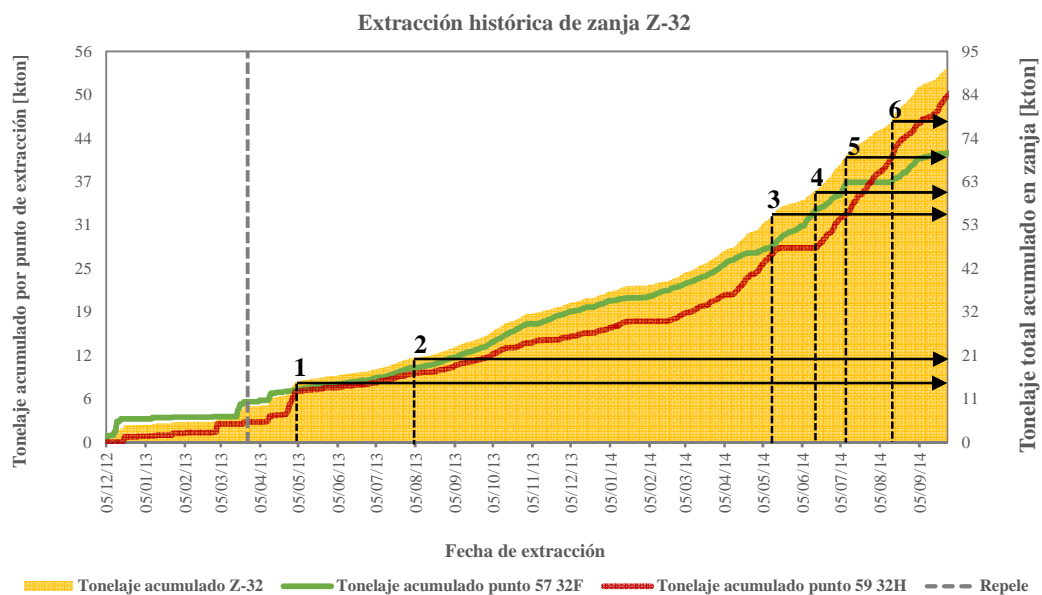
Empleando el análisis de extracción de material y comportamiento de la zona de extracción de las secciones previas, es posible deducir dos efectos sobre el tamaño de partícula observado en la zanja:

- La irregularidad inicial en la extracción, que genera un flujo preferente sobre el pilar mayor y produce elevados movimientos laterales, permite el transporte de un porcentaje considerable de roca gruesa al punto 57 31F (cercano a 25% de granulometría tipo E), pero baja presencia de partículas gruesas en el punto 59 31H.
- La extracción no simultánea en la zanja, permite la recuperación de material con alta presencia de roca gruesa (aproximadamente 45% de granulometría tipo E), ubicado sobre el pilar mayor del punto 57 31F y la región superior de la zona de extracción.

### 5.2.3. Análisis en zanja Z-32

#### 5.2.3.1. Extracción de material en zanja Z-32

La extracción durante el período de evaluación comienza desde diciembre de 2012 hasta septiembre de 2014. La **Ilustración 5-12** muestra el perfil de tonelaje extraído acumulado en la zanja Z-32 y sus respectivos puntos de extracción.



**Ilustración 5-12** Perfil de extracción acumulada para zanja Z-32 (área) y los puntos 57 32F/59 32H (línea continua).

La figura indica seis períodos con diferentes tipos de extracción, detallados a continuación:

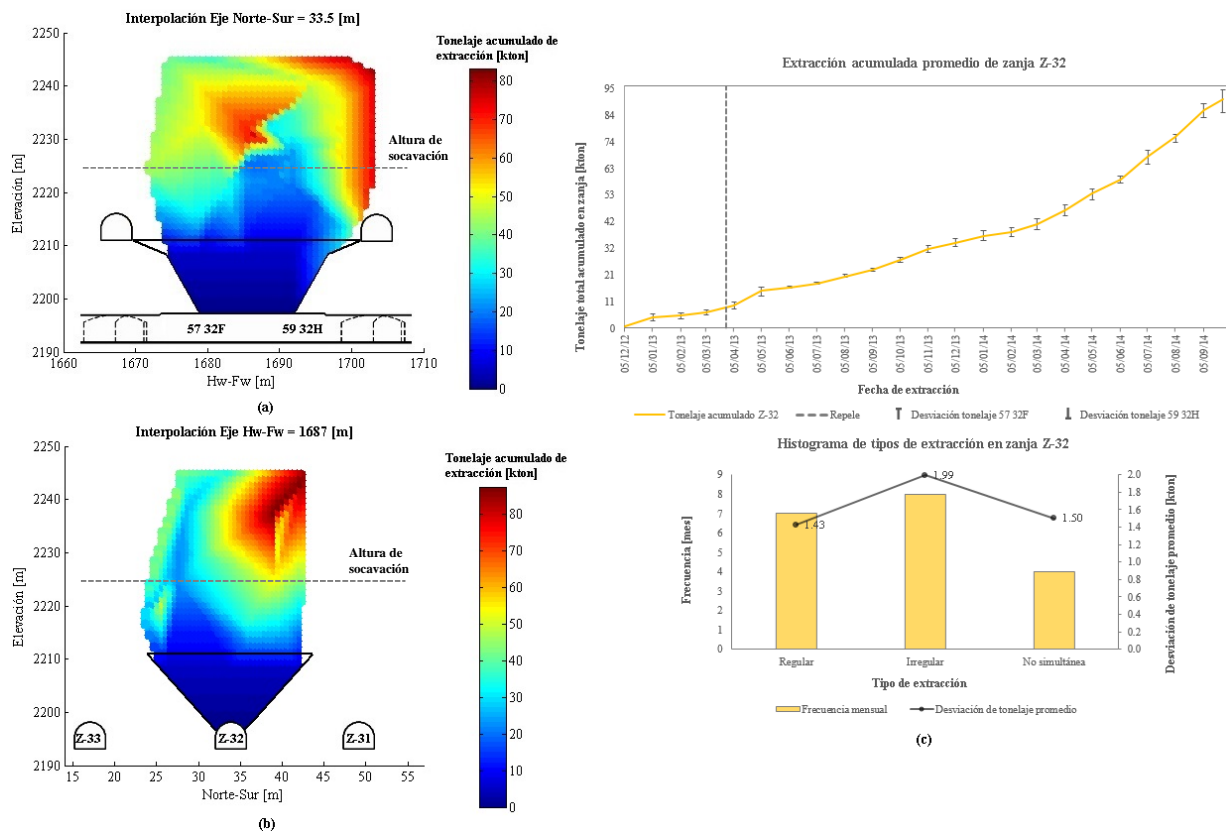
1. **Período 1** (05/05/13 – 15 [kton]): Se observa extracción irregular desde el punto 57 32F.
2. **Período 2** (05/08/13 – 20 [kton]): Hasta este período existe un tiraje regular desde los puntos de extracción de la zanja.
3. **Período 3** (11/05/14 – 55 [kton]): Se aprecia extracción irregular hasta este período (punto 52 32F).



4. **Período 4** (15/06/14 – 60 [kton]): Es posible observar una extracción no simultánea en la zanja.
5. **Período 5** (10/07/14 – 68 [kton]): Se presenta una extracción regular desde ambos puntos.
6. **Período 6** (17/08/14 – 79 [kton]): Hasta este período se aprecia no simultaneidad en la extracción. Posteriormente, se desarrolla una extracción irregular desde la zanja.

**5.2.3.2. Interpolación de la zona de extracción en zanja Z-32**

La interpolación lineal en esta zanja cuenta con 36 trazadores recuperados durante el período de prueba. La evolución de la zona de extracción se presenta en la **Ilustración 5-13**. La zona de extracción alcanza una altura de 34 [m] aproximadamente. Adicionalmente, se observa que el flujo de extracción, para ambos perfiles, muestra sectores regulares y definidos de material recuperado.



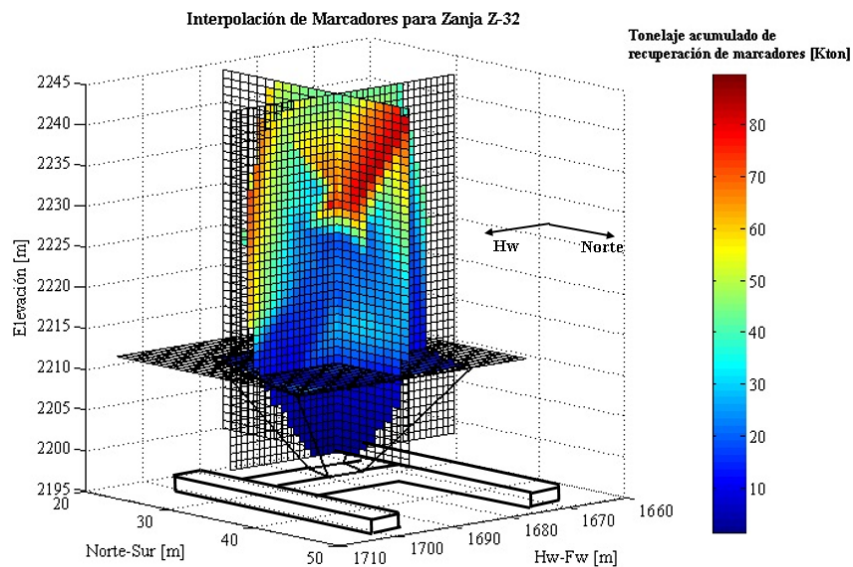
**Ilustración 5-13** Interpolación de la zona de extracción para la zanja Z-32. (a) Perfil longitudinal a la batea. (b) Perfil transversal a la batea. (c) Estadísticas mensuales para la extracción en zanja Z-32.

La recuperación de material a través del perfil longitudinal (**Ilustración 5-13a**) comienza en la región sobre el pilar mayor, con menor preponderancia, en términos de altura y velocidad relativa, para la zona central de la zanja. Mientras aumenta la extracción acumulada, la recuperación se desplaza hacia el centro de la zanja. Finalmente, se recupera material remanente en el centro de la batea y en la región superior de la zona de extracción. En cambio, la recuperación de material a través del perfil transversal (**Ilustración 5-13b**) comienza sobre el pilar menor en el lado Sur, y termina con la extracción por sobre el pilar menor del lado Norte.

Considerando el análisis de extracción (**Ilustración 5-13c**), es posible observar que la regularidad del flujo depende de la forma en que se extrae el material desde los puntos de la zanja. Así, la desviación en la extracción promedio mensual tiene diferentes efectos, señalados a continuación:

- Mientras la extracción sea regular, una desviación promedio acumulada de 1.43 [kton] no afecta el comportamiento regular del flujo.
- Cuando la extracción es irregular o no simultánea, una desviación promedio acumulada de 1.99 y 1.50 [kton], respectivamente, provoca movimientos preferente de partículas sobre el pilar mayor y recuperación de material ubicado en la región central de la zona de extracción.

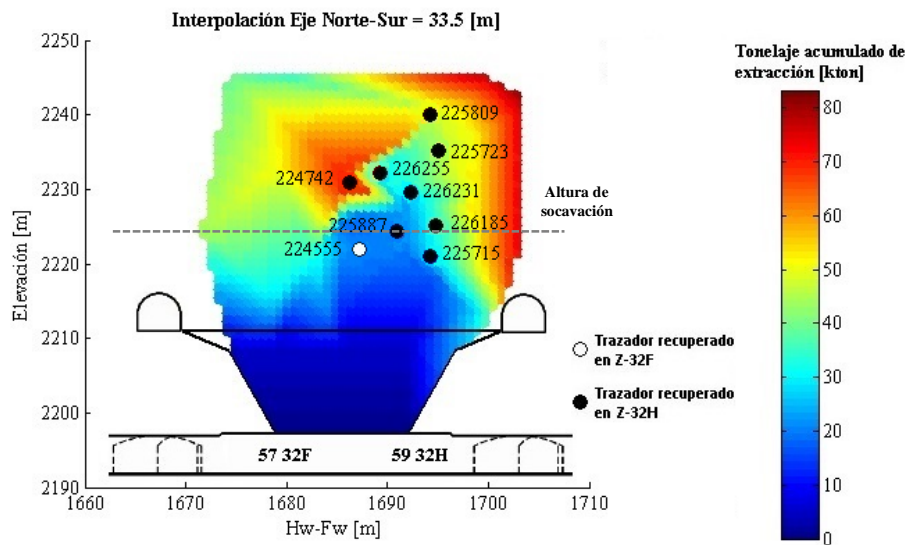
Combinando los perfiles longitudinal y transversal, se entrega una representación tridimensional de la interpolación de trazadores recuperados (**Ilustración 5-14**), con el fin de complementar el análisis del comportamiento del flujo.



**Ilustración 5-14** Representación tridimensional de los perfiles longitudinal y transversal de la interpolación lineal en la zanja Z-32. Cortes en Hw-Fw=1687 m, N-S=33.5 m, Z=2211 m.

El desplazamiento de trazadores dentro de la zona de extracción se presenta por medio de la **Ilustración 5-15**. A grandes rasgos, se infieren dos efectos importantes; la mayor extracción desde el punto 57 32F (irregularidad en la extracción) permite recuperar el trazador 224555, mediante un desplazamiento horizontal considerable. En tanto, la detención en la extracción del punto 57 32F (no simultaneidad en la extracción) origina la recuperación del trazador 224742 en el punto 59 32H, asociado a un elevado movimiento lateral.

De esta manera, se deduce que una condición de irregularidad y no simultaneidad en la extracción, para este análisis, tiene una importante influencia en la probabilidad de presenciar desplazamientos laterales de material.



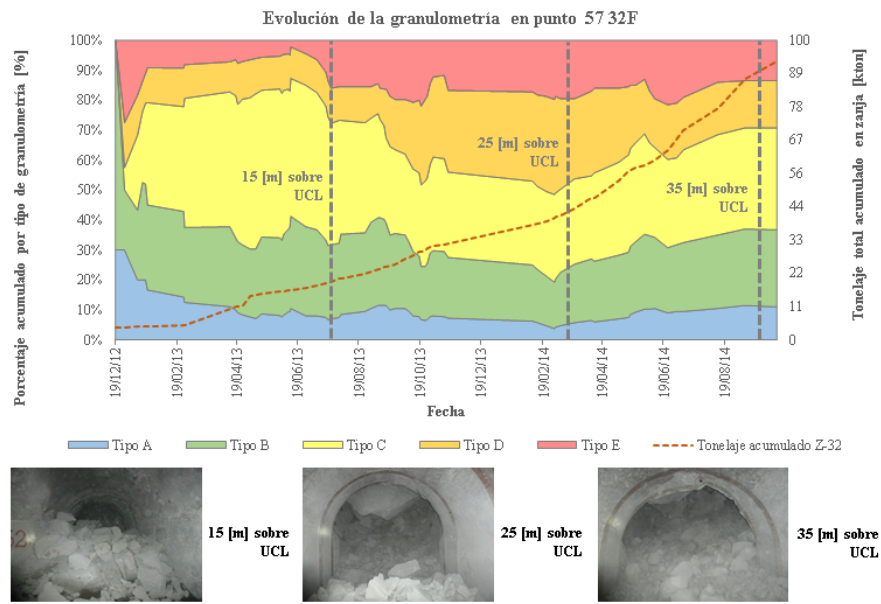
**Ilustración 5-15** Movimiento de trazadores dentro de la zona de extracción hacia los puntos de extracción de la zanja Z-32.

**5.2.3.3. Granulometría observada en zanja Z-32**

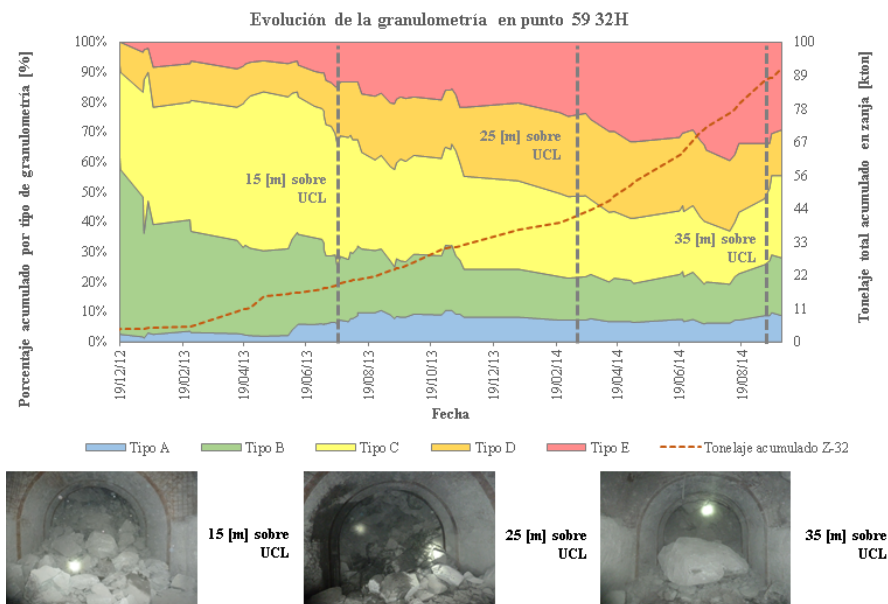
La **Ilustración 5-16** entrega el cambio de la granulometría observada en la zanja Z-32. Es posible notar que, para ambos puntos de extracción, la evolución en el tamaño de roca es diferente a lo largo del tiempo y de la altura extraída.

Considerando el análisis de extracción de material y comportamiento de la zona de extracción, es posible advertir tres efectos sobre el tamaño de partícula observado en la zanja:

- En general, durante la regularidad e irregularidad inicial en la extracción –asociada a un flujo regular para el primer caso, y un movimiento preferente sobre el pilar mayor para el segundo caso– existe una baja presencia de roca gruesa en ambos puntos.
- Durante la extracción irregular, asociada a flujo preferente sobre el pilar mayor, se aprecia un porcentaje considerable de roca gruesa (cercano al 20% de granulometría tipo E) en el punto 57 32F.
- Cuando la extracción es no simultánea en la zanja, se observa una importante presencia de partículas de gran tamaño en los puntos de extracción (20% para el punto 57 32F y 35% para el punto 59 32H), ubicadas inicialmente sobre el pilar mayor y la región central de la zona de extracción.



(a)



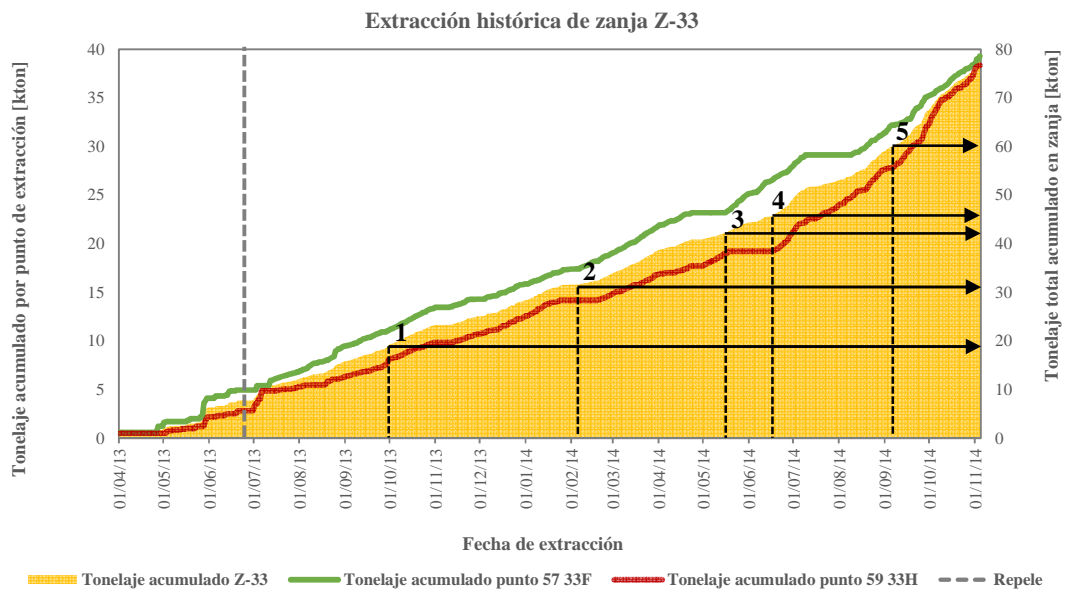
(b)

**Ilustración 5-16** Evolución de la granulometría observada en la zanja Z-32 y altura de columna extraída. (a) Punto de extracción 57 32F. (b) Punto de extracción 59 32H.

## 5.2.4. Análisis de zanja Z-33

### 5.2.4.1. Extracción de material en zanja Z-33

La extracción comienza desde abril de 2013 hasta noviembre de 2014. La **Ilustración 5-17** presenta el perfil de tonelaje extraído acumulado en la zanja Z-33 y sus respectivos puntos de extracción.



**Ilustración 5-17** Perfil de extracción acumulada para zanja Z-33 (área) y los puntos 57 33F/59 33H (línea continua).

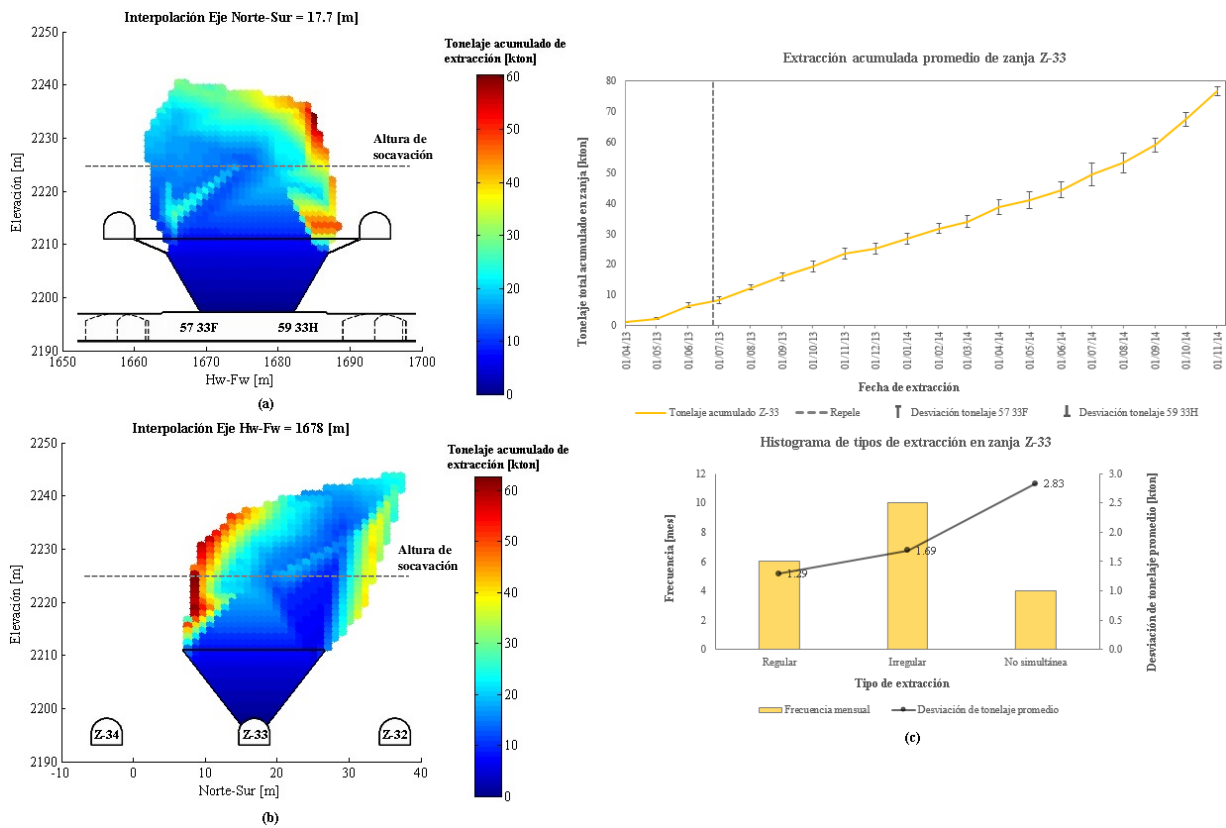
La **Ilustración 5-17** indica cinco períodos con diferentes tipos de extracción, mencionados a continuación:

1. **Período 1** (10/07/13 – 10 [kton]): Hasta este período se observa una extracción irregular desde el punto 57 33F.
2. **Período 2** (05/02/14 – 30 [kton]): Se percibe un tiraje regular de material en la zanja.
3. **Período 3** (16/05/14 – 41 [kton]): Se aprecia una extracción irregular en la zanja, con un intervalo de extracción no simultánea desde el punto 57 33F.
4. **Período 4** (17/06/14 – 45 [kton]): Hasta este período, se advierte extracción no simultánea en el punto 59 33F.
5. **Período 5** (05/09/14 – 60 [kton]): Al finalizar este período, es posible observar una extracción irregular, junto con una no simultaneidad en el tiraje del punto 57 33F.

**5.2.4.2. Interpolación de la zona de extracción en zanja Z-33**

La interpolación lineal en esta zanja emplea 26 trazadores recuperados. El crecimiento de la zona de extracción se entrega en la **Ilustración 5-18**. La zona de extracción alcanza una altura de 31 [m] aproximadamente. Asimismo, se observa que el flujo de extracción, para ambos perfiles, exhibe sectores regulares y definidos de material recuperado.

La recuperación de material a través del perfil longitudinal (**Ilustración 5-18a**) se inicia en la región sobre el pilar mayor, y en menor medida en la zona central de la zanja. Mientras aumenta la extracción, la recuperación se desplaza hacia el centro de la zanja. Finalmente, se recupera material del sector Hw. Un comportamiento similar se aprecia en la recuperación de material a través del perfil transversal (**Ilustración 5-18b**).



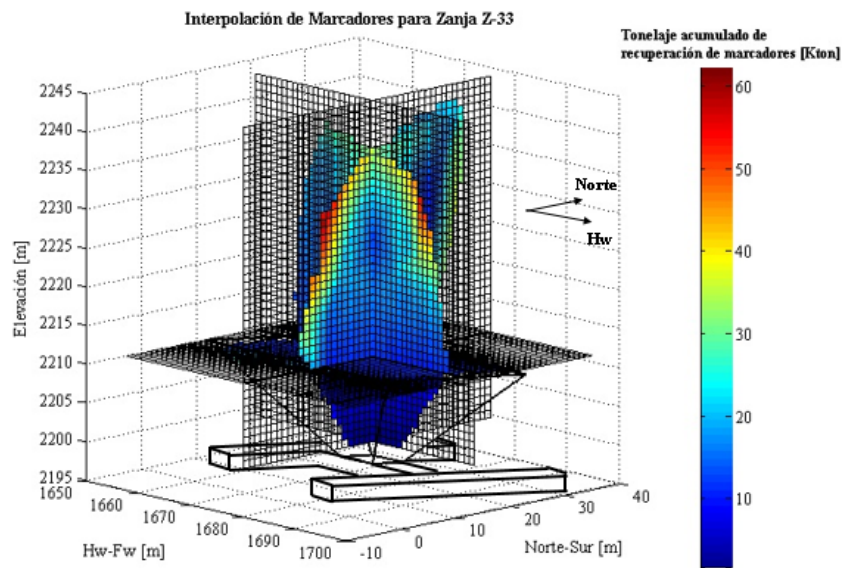
**Ilustración 5-18** Interpolación de la zona de extracción para la zanja Z-33. (a) Perfil longitudinal a la batea. (b) Perfil transversal a la batea. (c) Estadísticas mensuales para la extracción en zanja Z-33.

Considerando el análisis de extracción (**Ilustración 5-18c**), es posible inferir que la regularidad del flujo depende de la forma en que se extrae el material desde los puntos de la zanja. Por tanto, una desviación en la extracción promedio mensual tiene diferentes consecuencias:

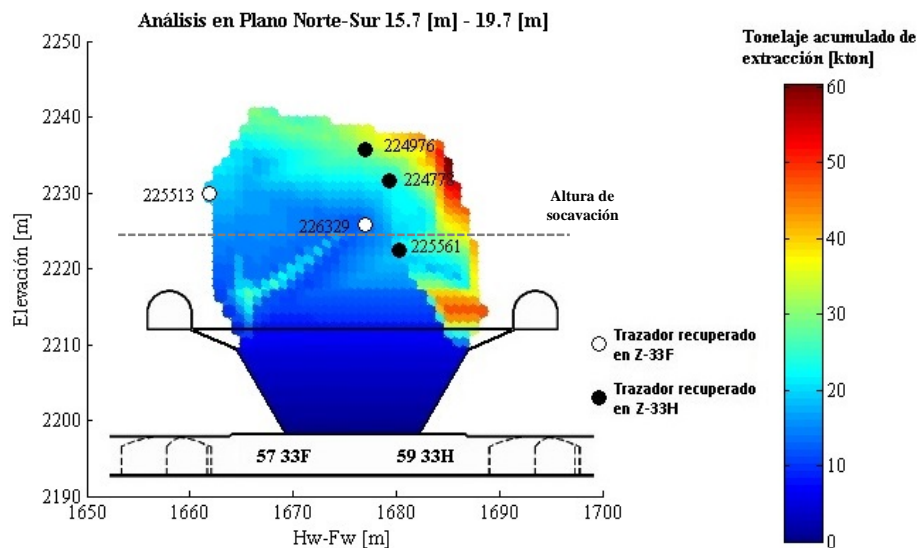
- Mientras la extracción sea regular, una desviación promedio acumulada de 1.29 [kton] no afecta el comportamiento regular del flujo.
- Cuando la extracción es irregular, una desviación promedio acumulada de 1.69 [kton] genera movimientos preferentes de material sobre el pilar mayor.
- Cuando la extracción es no simultánea, una desviación promedio acumulada de 2.83 [kton] retrasa la recuperación de material ubicado sobre la región del pilar mayor.

La **Ilustración 5-19** corresponde a una representación tridimensional de la interpolación de trazadores recuperados, con el fin de complementar el análisis del comportamiento del flujo.

El desplazamiento de trazadores dentro de la zona de extracción se incluye en la **Ilustración 5-20**. En esta figura se aprecian dos consecuencias; por una parte, se infiere que la extracción irregular en el punto 57 33F podría generar la migración del trazador 226329 hacia el mismo punto 57 33F. En tanto, al finalizar el período de no simultaneidad en la extracción del punto 59 33H, se observa que el trazador 224976 se desplaza al punto 59 33H. En ambos casos, se aprecia que el material recorre una considerable distancia horizontal hacia los puntos de extracción correspondientes.



**Ilustración 5-19** Representación tridimensional de los perfiles longitudinal y transversal de la interpolación lineal en la zanja Z-33. Cortes en Hw-Fw=1678 m, N-S=17.7 m, Z=2211 m.



**Ilustración 5-20** Movimiento de trazadores dentro de la zona de extracción hacia los puntos de extracción de la zanja Z-33.

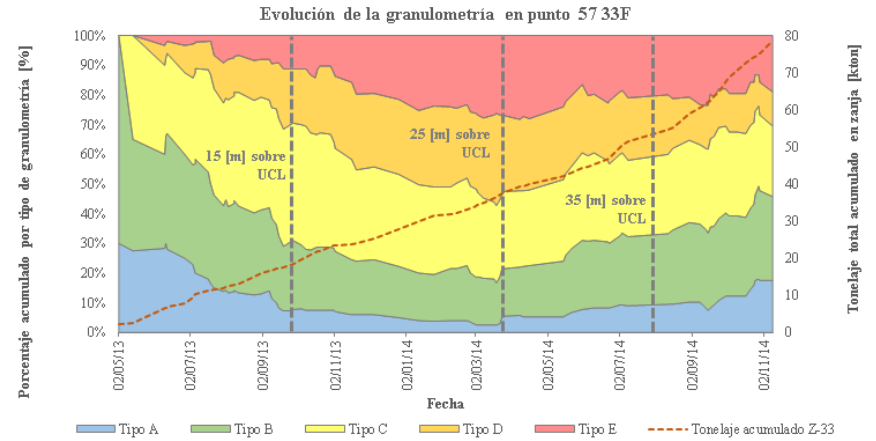
**5.2.4.3. Granulometría observada en zanja Z-33**

La **Ilustración 5-21** presenta el cambio de la granulometría observada en la zanja Z-33. Se puede notar que, para ambos puntos de extracción, la evolución en el tamaño de roca es similar a lo largo del tiempo y de la altura extraída.

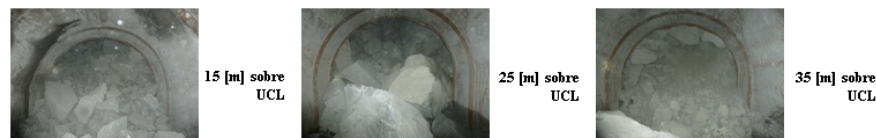
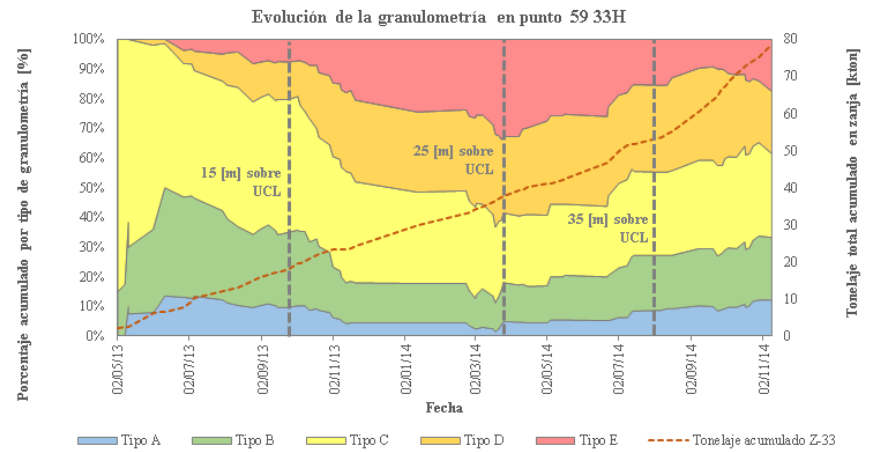
Empleando el análisis de extracción de material y comportamiento del flujo presentado en las secciones previas, se deducen tres efectos sobre el tamaño de partícula observado en la zanja:

- La irregularidad inicial en la extracción, que genera un flujo preferente sobre el pilar mayor, permite el transporte de bajo porcentaje de roca gruesa al punto 57 33F (menor al 10% de granulometría tipo E).

- La continua irregularidad en la extracción desde el punto 57 33F, que produce flujos preferentes y elevados movimientos laterales de material, tiene asociada una presencia considerable de roca gruesa en el punto 57 33F (20% a 30% de granulometría tipo E).
- La extracción no simultánea en la zanja, permite la recuperación de material con alta presencia de roca gruesa, ubicado en la región sobre el pilar mayor.



(a)



(b)

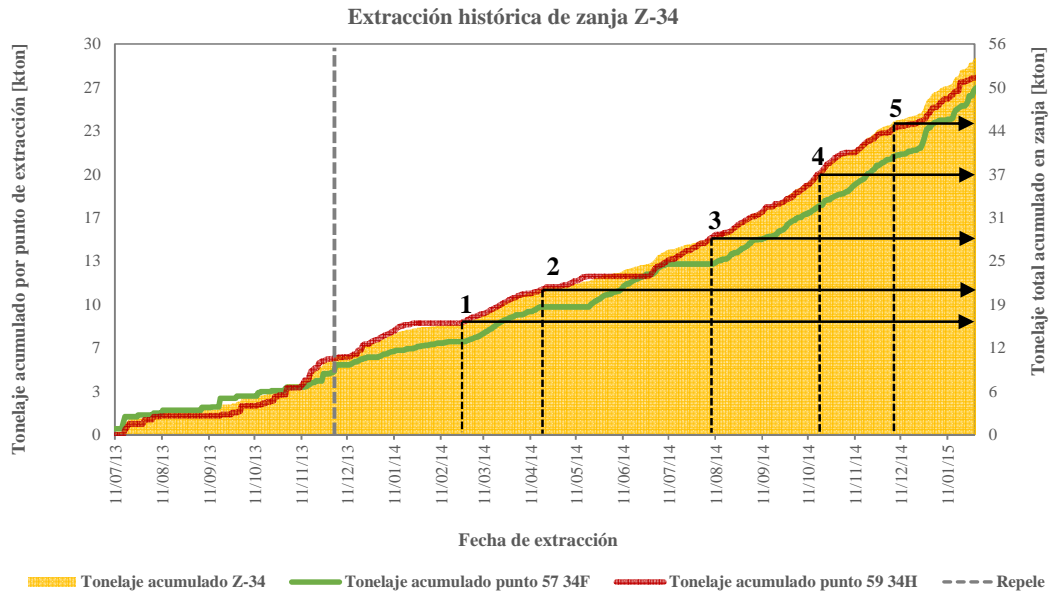
**Ilustración 5-21** Evolución de la granulometría observada en la zanja Z-33 y altura de columna extraída. (a) Punto de extracción 57 33F. (b) Punto de extracción 59 33H.



### 5.2.5. Análisis de zanja Z-34

#### 4.2.4.1. Extracción de material en zanja Z-34

La extracción durante el período de prueba comienza desde julio de 2013 hasta enero de 2015. La **Ilustración 5-22** muestra el perfil de tonelaje extraído acumulado en la zanja Z-34 y sus respectivos puntos de extracción.



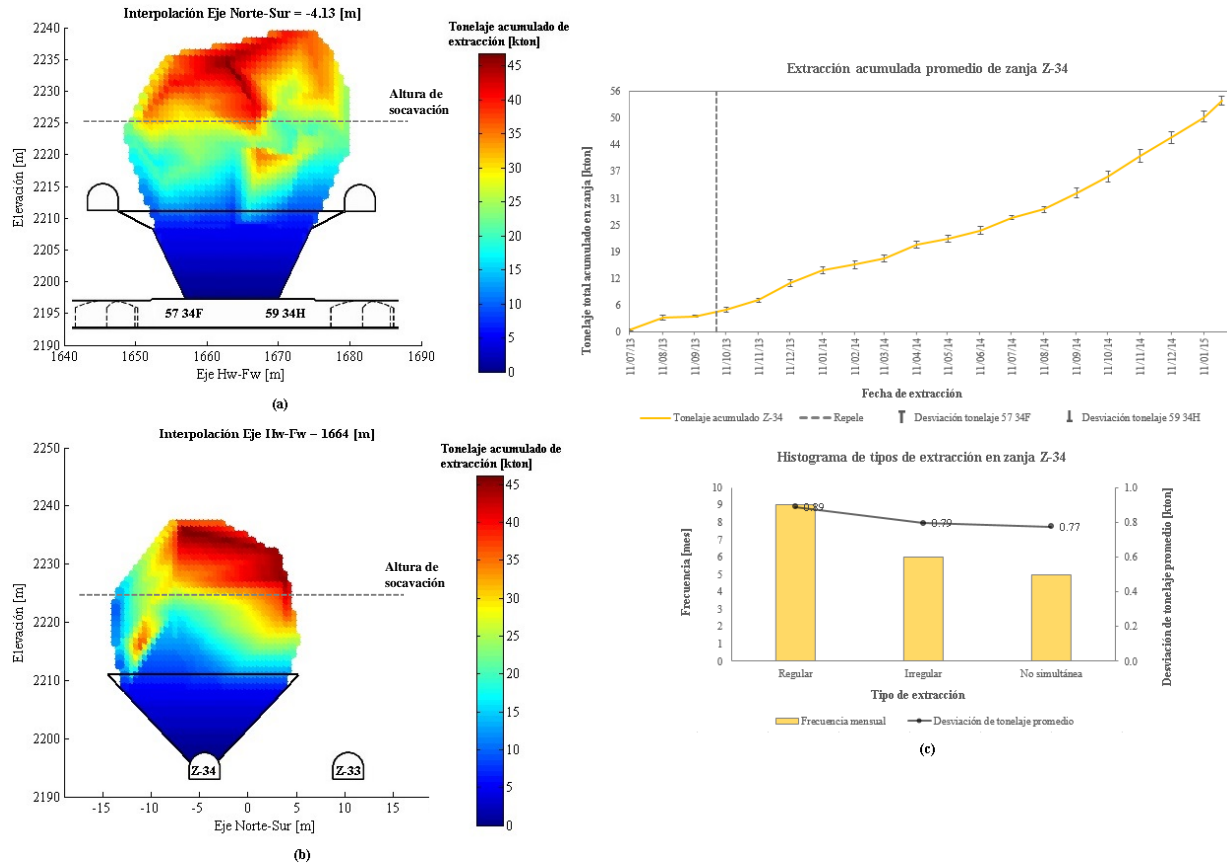
**Ilustración 5-22** Perfil de extracción acumulada para zanja Z-34 (área) y los puntos 57 34F/59 34H (línea continua).

La figura indica cinco períodos con diferentes tipos de extracción, detallados a continuación:

1. **Período 1** (26/02/14 – 16 [kton]): Desde el inicio de la extracción en la zanja, se observa una extracción irregular, hasta este período, desde el punto 59 34H.
2. **Período 2** (19/04/14 – 21 [kton]): Al finalizar este período, existe un tiraje regular desde los puntos de extracción de la zanja.
3. **Período 3** (11/05/14 – 55 [kton]): Se puede apreciar una serie de extracciones no simultáneas, alternadas en el tiempo, para cada punto de la zanja.
4. **Período 4** (15/06/14 – 60 [kton]): Es posible observar una extracción regular desde la zanja hasta este período.
5. **Período 5** (10/07/14 – 68 [kton]): Se presenta una extracción irregular desde ambos puntos al finalizar el período.

5.2.4.2. Interpolación de la zona de extracción en zanja Z-34

La interpolación lineal en esta zanja cuenta con 35 trazadores recuperados. La evolución de la zona de extracción se presenta en la **Ilustración 5-23**. La zona de extracción alcanza una altura aproximada de 28 [m]. Adicionalmente, se observa que el flujo de extracción, para ambos perfiles, muestra sectores regulares y definidos de material recuperado.



**Ilustración 5-23** Interpolación de la zona de extracción para la zanja Z-34. (a) Perfil longitudinal a la batea. (b) Perfil transversal a la batea. (c) Estadísticas mensuales para la extracción en zanja Z-34.

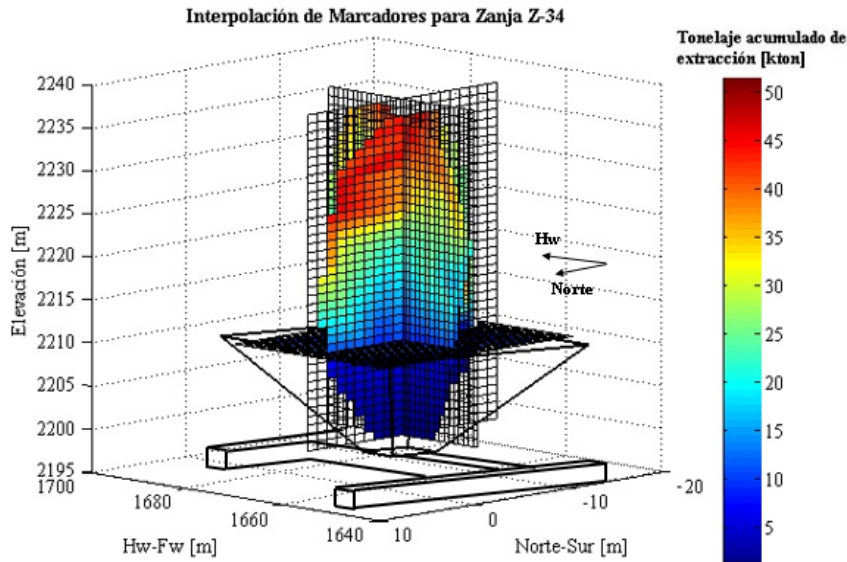
La recuperación de material a través del perfil longitudinal (**Ilustración 5-23a**) comienza en la región sobre el pilar mayor y sector central de la zanja. Mientras aumenta la extracción acumulada, la recuperación de material se mantiene medianamente vertical dentro de la zona de extracción. Un comportamiento similar se aprecia en la recuperación de material a través del perfil transversal (**Ilustración 5-23b**).

Considerando el análisis de extracción (**Ilustración 5-23c**), es posible observar que la regularidad del flujo depende de la forma en que se extrae el material desde los puntos de la zanja. Así, la desviación en la extracción promedio mensual tiene diferentes efectos, señalados a continuación:

- Mientras la extracción sea regular, una desviación promedio acumulada de 0.89 [kton] no afecta el comportamiento regular del flujo.
- Cuando la extracción es irregular, una desviación promedio acumulada de 0.79 [kton] genera perturbaciones en la naturaleza del flujo de material dentro de la zona de extracción.

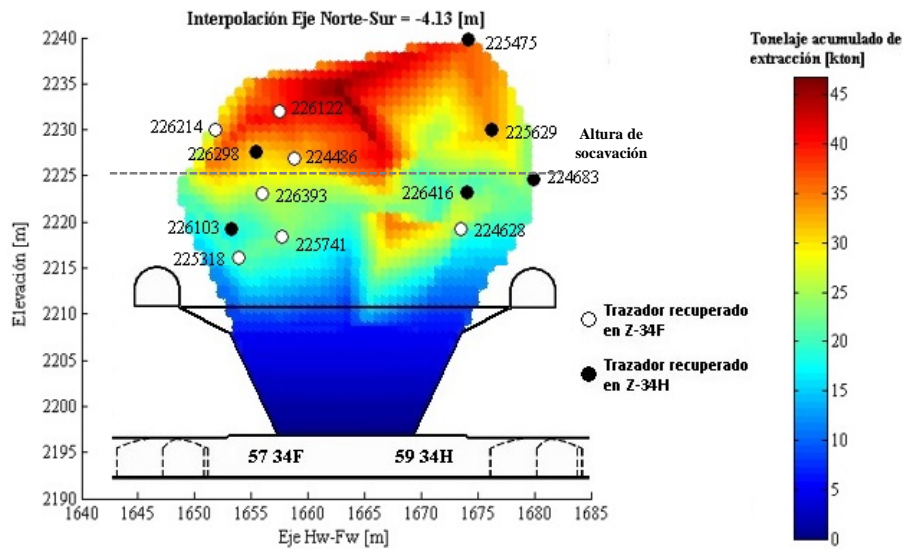
- Cuando la extracción es no simultánea, una desviación promedio acumulada de 0.77 [kton], afecta la regularidad en el movimiento del material.

Combinando ambos perfiles, se entrega una representación tridimensional de la interpolación de trazadores (**Ilustración 5-24**), con el fin de complementar el análisis del comportamiento del flujo.



**Ilustración 5-24** Representación tridimensional de los perfiles longitudinal y transversal de la interpolación lineal en la zanja Z-34. Cortes en Hw-Fw=1664 m, N-S=-4.13 m, Z=2211 m.

El desplazamiento de trazadores dentro de la zona de extracción se presenta por medio de la **Ilustración 5-25**.



**Ilustración 5-25** Movimiento de trazadores dentro de la zona de extracción hacia los puntos de extracción de la zanja Z-34.

A grandes rasgos, y similar al caso de la zanja Z-31, se infiere la existencia de importantes movimientos horizontales de material hacia ambos puntos de extracción de la zanja Z-34. Sin embargo, se debe agregar que, detenciones alternadas en la extracción que superan períodos de 30 días, tienen una importante influencia en el desplazamiento lateral de los trazadores.

5.2.4.3. Granulometría observada en zanja Z-34

La Ilustración 5-26 entrega el cambio de granulometría observada en la zanja Z-34. Es posible notar que la evolución en el tamaño de roca es similar a lo largo del tiempo y de la altura extraída.

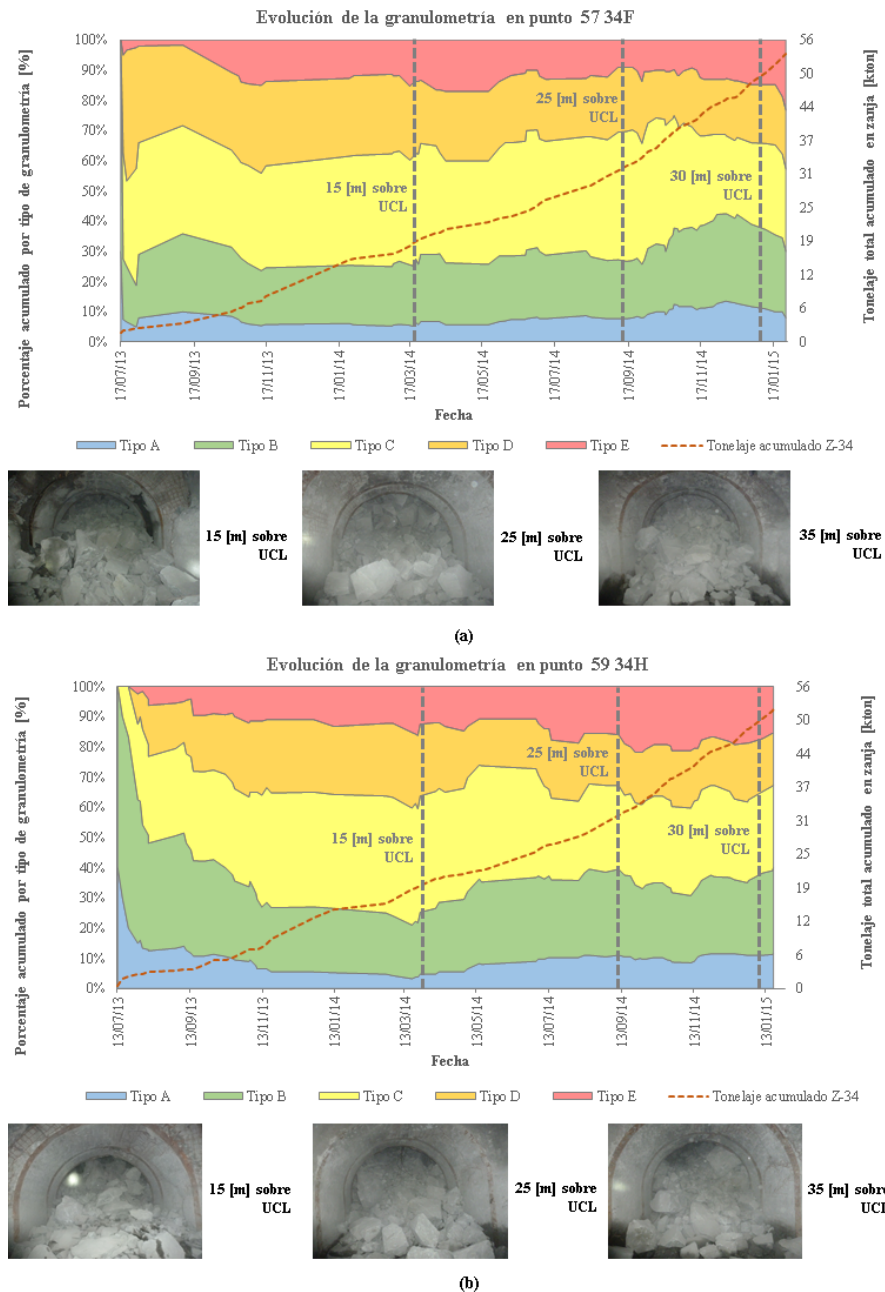


Ilustración 5-26 Evolución de la granulometría observada en la zanja Z-34 y altura de columna extraída. (a) Punto de extracción 57 34F. (b) Punto de extracción 59 34H.

Considerando el análisis de extracción de material y comportamiento de la zona de extracción, es posible advertir tres efectos sobre el tamaño de partícula observado en la zanja:

- En general, la irregularidad inicial en la extracción, que provoca un flujo preferente sobre el pilar mayor, tiene asociada una baja presencia de roca gruesa en el punto.

- Durante la extracción regular en la zanja, se observa una proporción media de roca gruesa en los puntos (alrededor de 10% de granulometría tipo E).
- En tanto, cuando la extracción es no simultánea en la zanja, es posible apreciar que para ambos puntos existe una considerable presencia de partículas de gran tamaño, que varía desde un 10% a 20% de granulometría tipo E.

### 5.2.6. Resumen de los resultados obtenidos

La **Tabla 5-1** resume, de forma general, los resultados obtenidos durante el análisis presentado en esta sección.

**Tabla 5-1** Resumen del procesamiento de información y análisis de variables operacionales para cada zanja en estudio.

Zanja	Tipo de extracción	Comportamiento del flujo	Granulometría observada
Z-30	58% Extracción regular. 23% Extracción irregular. 19% Extracción no simultánea.	Extracción inicial con movimientos preferentes sobre pilar mayor. Recuperación se desplaza hacia el centro de la batea.	Evolución similar de granulometría en ambos puntos. Presencia máxima de roca gruesa entre 30% a 40% en los puntos.
Z-31	44% Extracción regular. 33% Extracción irregular. 22% Extracción no simultánea.	Extracción desde pilar mayor a centro de la batea. Comportamiento regular, pero presentando mezcla lateral.	Evolución similar de granulometría en ambos puntos. Presencia máxima de roca gruesa entre 40% a 45%.
Z-32	37% Extracción regular. 42% Extracción irregular. 21% Extracción no simultánea.	Extracción inicial con movimientos preferentes sobre pilar mayor. Recuperación se desplaza hacia el centro de la batea. Indicios de movimientos horizontales.	Evolución de granulometría no similar en ambos puntos. Presencia máxima de roca gruesa entre 20% a 40%.
Z-33	30% Extracción regular. 50% Extracción irregular. 20% Extracción no simultánea.	Extracción con movimientos preferentes sobre el pilar mayor y región central. Recuperación se desplaza hacia zonas superiores del pilar mayor. Indicios de mezcla lateral.	Evolución similar de granulometría en ambos puntos. Presencia máxima de roca gruesa cercana a 30%.
Z-34	45% Extracción regular. 30% Extracción irregular. 35% Extracción no simultánea.	Extracción con movimientos preferentes sobre pilar mayor. Recuperación se desplaza regularmente hacia el centro de la batea. Alta presencia de mezcla horizontal.	Evolución similar de granulometría en ambos puntos de extracción. Presencia máxima de roca gruesa entre 20% a 25%.

## 5.3. ANÁLISIS DE LA ZONA DE EXTRACCIÓN

A través de los trazadores recuperados y la zona de extracción interpolada, es posible determinar el grado de interacción entre zonas de flujo y analizar el desempeño del diseño minero actual de Bloque-2.

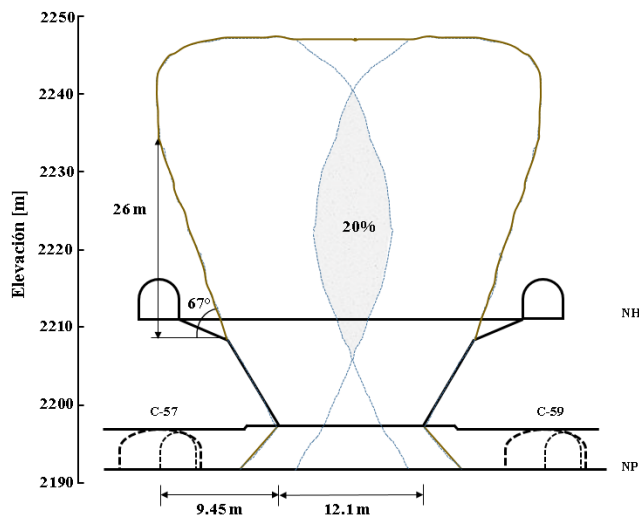
### 5.3.1. Interacción de la zona de extracción

El análisis de interacción sobre el pilar mayor se basa en los trazadores recuperados, sin embargo, en el análisis de interacción sobre el pilar menor se utilizan los resultados de la interpolación lineal, visualizados en diferentes planos utilizando el software *Vulcan*. Para mayor detalle sobre la estimación del ángulo de flujo e interacción entre zonas de extracción, revisar el Anexo D.

**5.3.1.1. Análisis de interacción sobre el pilar mayor**

La **Ilustración 5-27** entrega una representación general de la zona de extracción, junto con la estimación de la altura de interacción, ángulo de flujo y traslape del flujo en los puntos de extracción.

La metodología para evaluar la altura de interacción considera la aparición del trazador más cercano a la galería del nivel de hundimiento (desde las perforaciones verticales de instalación), con lo cual es posible establecer el límite de interacción con las zonas de extracción vecinas a las zanjas en estudio. Para efectos del análisis, la altura de interacción se mide desde la tolva de la batea, determinado por el vértice que une el cajón de la zanja y los tiros negativos de la socavación (ver figura adjunta).



**Ilustración 5-27** Análisis de la zona de extracción sobre el pilar mayor. Vista longitudinal a través de la zanja.

Dados los antecedentes previos, la **Tabla 5-2** entrega el detalle de las estimaciones para el análisis a la zona de extracción sobre el pilar mayor.

**Tabla 5-2** Resumen del análisis a la zona de extracción sobre el pilar mayor.

Estimación	Valor	Desviación estándar
Altura de interacción [m]	26.0	6.0
Ángulo de flujo [°]	67.0	5.0
Área de la zona de extracción [m <sup>2</sup> ]	1,256.0	—
Área de material remanente bajo el traslape [m <sup>2</sup> ]	40.7	9.3
Área de traslape de flujo desde puntos de extracción [m <sup>2</sup> ]	243.9	61.0
Porcentaje de traslape entre flujos desde puntos de extracción [%]	20.0	5.0

**5.3.1.2. Análisis de interacción sobre el pilar menor**

En este análisis se utilizaron los resultados generados por la interpolación lineal de trazadores recuperados. Como se muestra en la **Ilustración 5-28**, se presenta un perfil transversal a todas las

zanjas, para representar la interacción de las diferentes zonas de extracción dentro del sector de estudio.

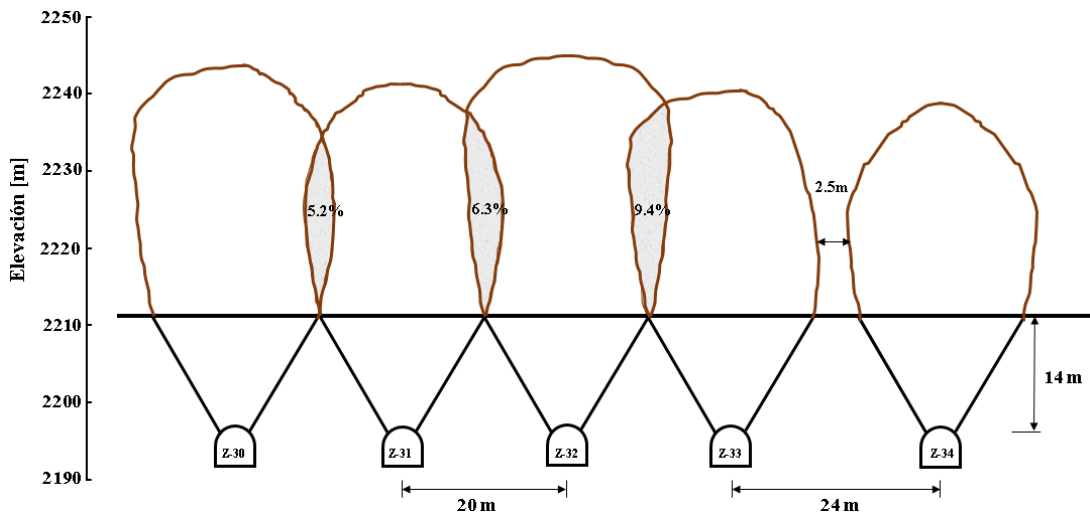


Ilustración 5-28 Análisis de la zona de extracción sobre el pilar menor. Vista transversal a todas las zanjas bajo estudio.

A partir de lo anterior, se desprende que el traslape promedio entre las zonas de extracción corresponde a 7%, con una variación de 2%, respecto al área total que comparten las zonas de extracción.

Es posible advertir interacción entre las zonas de extracción para un espaciamiento de 20 [m] entre puntos (zanja Z-30 a zanja Z-33). Sin embargo, para el espaciamiento de 24 [m] (entre zanja Z-33 y Z-34), no es posible concluir interacción entre las zonas de extracción. Esto se debe a que la zanja Z-34 fue la última zanja que se incorporó a producción, según el plan minero y la secuencia del Bloque-2. La **Tabla 5-3** muestra detalladamente las estimaciones del análisis.

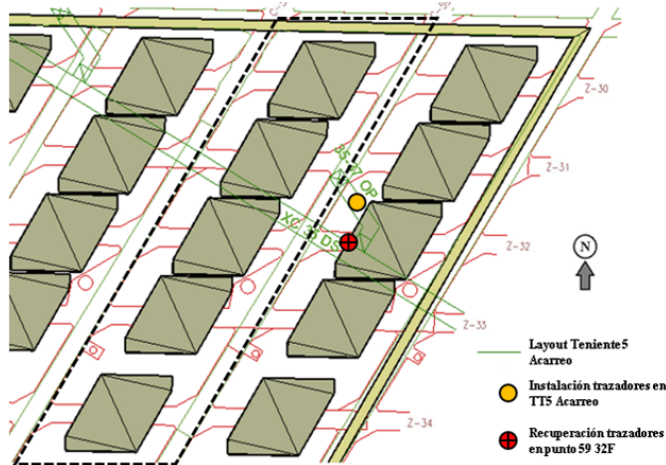
Tabla 5-3 Resumen del análisis a la zona de extracción sobre el pilar menor.

Estimación tonelaje	Zanja Z-30	Zanja Z-31	Zanja Z-32	Zanja Z-33	Zanja Z-34
Tonelaje real de zanja [kton]	119.8	96.1	90.9	77.6	53.8
Tonelaje de zanja interpolado [kton]	85.5	82.3	71.1	67.8	51.5
Diferencia tonelaje (respecto a tonelaje real) [%]	28.6	14.4	21.1	12.6	4.3
Estimación área	Zanja Z-30/Zanja Z-31	Zanja Z-31/Zanja Z-32	Zanja Z-32/Zanja Z-33		
Área entre zonas de flujo [m <sup>2</sup> ]	1016	1196	1207		
Área traslapada entre zonas de flujo [m <sup>2</sup> ]	50.3	75.8	113.6		
Traslape entre zonas de flujo [%]	5.2	6.3	9.4		

### 5.3.2. Recuperación de trazadores desde nivel Teniente 5 Acarreo

En relación con los trazadores ubicados en el nivel de FFCC Teniente 5, se recuperó un 100% de los marcadores instalados, lo que corresponde a 7 trazadores ubicados a 71 [m] sobre el nivel de

hundimiento. Todos los marcadores aparecen en el punto de extracción 59 32F (**Ilustración 5-29**), lo que permite suponer un reducido desplazamiento horizontal durante el transporte de material dentro de la columna de material. La **Tabla 5-4** resume esta información.



**Ilustración 5-29** Vista en planta entre la ubicación de trazadores en nivel TT5 y recuperación en punto 59 32F.

**Tabla 5-4** Resumen del movimiento vertical y horizontal de trazadores instalados en Teniente 5 Acarreo.

Punto extracción de salida	Altura de columna equivalente extraída [m]	Distancia horizontal máxima estimada hasta punto de extracción [m]
59 32F	51 ± 3	7.46

La recuperación de marcadores en el punto 59 32F se complementa con la aparición de trazadores naturales provenientes del nivel Teniente 5, los que corresponden a rieles, maderas, y otros elementos. La **Ilustración 5-30** permite visualizar algunos elementos en el punto de extracción.



**Ilustración 5-30** Punto 59 32F presentando trazadores artificiales. Madera (izquierda). Riel (derecha).

Con todo lo anterior, es posible deducir que el movimiento de material, sobre la zona de extracción, presenta un carácter principalmente vertical, con poca influencia de movimientos horizontales en el transporte de la roca fragmentada.

Sin embargo, la diferencia entre la altura real de instalación (71 [m]) y la altura extraída equivalente (51 [m] en promedio) no es posible precizarla con el análisis. La hipótesis propuesta para explicar este fenómeno, basada en los resultados de esta investigación, corresponde a la presencia de flujos preferentes de material en la región sobre el pilar mayor, al momento de ingresar a la zona de extracción del punto 59 32F, generando diferencias en el desplazamiento vertical de los trazadores.



## 5.4. DISCUSIÓN GENERAL DEL CAPÍTULO

Esta sección discute los resultados asociados al análisis del flujo gravitacional dentro de la zona de extracción y su impacto en el diseño minero durante la operación de Bloque-2.

### 5.4.1. Influencia de la extracción en el comportamiento del flujo gravitacional

El efecto de la extracción en el comportamiento del flujo gravitacional ha sido abordado por algunos autores en experimentos a escala de laboratorio (Marano, 1980; Heslop & Laubscher, 1981; Heslop, 1983; Susaeta, 2004).

Estos autores han basado sus supuestos en observaciones de experimentos físicos de arena. Por un lado, Marano (1980), Heslop & Laubscher (1981) y Heslop (1983) establecieron que, cuando la extracción de material se realiza de manera *no simultánea*, el flujo de material presenta un comportamiento *irregular*. Por su parte, Susaeta (2004) propone que el flujo gravitacional está afectado por dos estados superpuestos: movimiento vertical en la columna de extracción, acompañado de movimiento lateral en la parte baja de la columna (punto de extracción abierto), y movimiento vertical y lateral hacia zonas de menor densidad en el entorno del punto de extracción, alcanzando un *equilibrio estático* (punto de extracción cerrado).

El análisis de extracción permite deducir cuatro efectos sobre el comportamiento del flujo dentro de la zona de extracción, para el campo cercano:

- Mientras mayor sea la extracción desde un punto (*irregularidad en la extracción*), existe mayor posibilidad de generar un movimiento vertical preferente de material sobre este punto, o sobre el pilar mayor asociado al punto. Asimismo, en términos generales, cuando la extracción de un punto aumenta en períodos breves de tiempo (entre uno o dos meses), se tiene un efecto similar en el caso que la extracción, del mismo punto, se incremente progresivamente en intervalos mayores de tiempo (mayores a cuatro meses).
- Cuando se produce una detención en la extracción de un punto (*no simultaneidad en la extracción*), existe una alta probabilidad de inducir la recuperación de material ubicado en la región central de la zona de extracción, hacia el punto que se encuentra en producción.
- En caso de que la remoción de material, desde un punto de extracción, se realice de forma similar a lo largo del tiempo (*regularidad en la extracción*), existe una alta posibilidad de que el flujo de roca, alrededor de dicho punto, describa un comportamiento regular.
- En términos de mezcla lateral, cuando se produce una alta irregularidad y no simultaneidad en la extracción desde un punto, el análisis sugiere que existe una elevada probabilidad de presenciar movimiento horizontal dentro de la zona de extracción. Se observan tres efectos:
  1. Existe evidencia empírica indicando que una temprana extracción irregular desde un punto, puede provocar una alta posibilidad de mezcla lateral de material en el entorno cercano a dicho punto.

2. El análisis sugiere que un estado de irregularidad y no simultaneidad en la extracción de un punto, reiterado en el tiempo, puede generar mayores probabilidades de originar mezcla horizontal dentro de la zona de extracción.
3. En caso contrario, cuando la irregularidad y no simultaneidad en la extracción desde un punto, se realiza de manera esporádica y sin reiteraciones a lo largo del tiempo, entonces es posible inferir la existencia de movimiento horizontal de material hasta la región central de la zona de extracción, abarcando el área de influencia de dicho punto.

De esta forma, es posible advertir que las hipótesis de Marano (1980), Heslop & Laubscher (1981) y Heslop (1983) no se adaptan a los resultados obtenidos en este estudio, pues se ha evidenciado que el efecto de la no simultaneidad en la extracción produce movimientos laterales de material, desde la región central hacia el punto en producción. En tanto, los supuestos de Susaeta (2004) se adecuan a las deducciones establecidas en esta sección. Sin embargo, no es finalidad del estudio avalar resultados ni teorías expuestas por medio de experimentos de laboratorio.

#### 5.4.2. Comportamiento de la zona de extracción en campo cercano

El comportamiento del flujo gravitacional ha sido estudiado ampliamente a lo largo del tiempo (Kvapil, 1965a, 1965b, 1992; Janelid & Kvapil, 1966; McCormick, 1968; Marano, 1980; Heslop & Laubscher, 1981; Heslop, 1983; Laubscher, 1994, 2000; Peters, 1984; Power, 2004; Susaeta, 2004; Castro, 2006, Brunton *et al.*, 2012, entre otros).

Sobre este escenario, existen diferentes supuestos sobre el comportamiento de la zona de extracción, a partir de pruebas en laboratorio y a escala mina. Por una parte, Laubscher (2000) indica que existe un mecanismo de difusión de vacíos durante tiraje interactivo, originando mezcla vertical y horizontal. Adicionalmente, postula la presencia del mecanismo *mass flow* sobre la altura de interacción. En tanto, Laubscher (2000) y Brunton *et al.* (2012) señalan que la geometría del flujo gravitacional de extracción es irregular por naturaleza y no puede ser descrita por la teoría general de flujo elipsoidal.

Durante esta investigación, se evidencia que el comportamiento de la zona de extracción en el campo cercano tiene una geometría sectorizada y definida por la extracción de material, exhibiendo dos tipos de movimientos: regulares y preferentes. La regularidad observada sigue los lineamientos principales de la teoría de flujo. Los movimientos preferentes en las regiones sobre el pilar mayor y sobre los puntos de extracción, sugiere la presencia de diferencias en el desplazamiento del material para alcanzar un equilibrio másico durante la extracción. De esta forma, es posible especular que las hipótesis de Laubscher (2000) y Brunton *et al.* (2012) no se relacionan con los resultados presentados en el estudio. Resultados similares a los generados en esta investigación se han registrado en modelos de arena (Heslop, 1983; Susaeta, 2004). Sin embargo, no es objetivo del estudio respaldar resultados obtenidos desde experimentos de laboratorio.

Respecto al movimiento vertical y horizontal de trazadores, se han obtenido tres evidencias experimentales.

1. Puede existir solo influencia de mezcla vertical de material dentro de la zona de extracción.

2. Es posible suponer que cada punto de extracción presenta un límite de influencia sobre el movimiento horizontal, donde la frontera está ubicada en la región central de la zanja.
3. Puede desarrollarse una alta probabilidad de observar mezcla lateral de material dentro de la columna de extracción.

Estas inferencias dan paso a deducir que la mezcla horizontal de material no ocurre, ni por la naturaleza del flujo de roca, ni por la interacción con otros puntos de extracción activos, sino que puede ser un estado manejable durante la operación. Lo anterior no resulta consistente con el modelo de Laubscher (2000) asociado a la *zona de intermezcla*.

Hasta el momento, los resultados obtenidos en el estudio difieren de aquellos observados en pruebas a escala mina (Brunton *et al.*, 2012) y modelos físicos de laboratorio (Laubscher, 2000). Las posibles causas se discuten a continuación:

- La definición de la zona de extracción en el estudio de *Ridgeway Deeps* se realizó mediante polígonos basados en el tonelaje de recuperación de trazadores (Brunton *et al.*, 2012). Por lo tanto, no se obtuvo un análisis de la evolución del flujo de roca, considerando una estimación que permitiera definir un medio continuo para la extracción de tonelaje, por lo que no existe certeza sobre lo que ocurre en sectores donde no existen polígonos.
- El modelo conceptual de Laubscher (2000) se basa en observaciones realizadas sobre modelos físicos de arena. Asimismo, no se tienen antecedentes que permitan caracterizar la forma en que se extrajo el material desde los puntos de extracción. En consecuencia, considerando la actual prueba a escala mina, puede no ser realista comparar y concluir sobre la geometría de la zona de extracción en el campo cercano utilizando esta teoría. Sin embargo, este hecho sugiere la incorporación de nuevos lineamientos que permiten plantear otro modelo conceptual de flujo gravitacional.
- Los resultados generados en esta investigación permiten caracterizar, de manera más coherente, el comportamiento del flujo de roca en el campo cercano, significativamente más representativo que considerar la recuperación de trazadores como eventos puntuales. Estos resultados permiten inferir que la zona de extracción posee sectores regulares y definidos durante la recuperación de material desde la zanja, bajo las condiciones operacionales y geomecánicas del caso de estudio.

Por otro lado, con la recuperación de trazadores desde el nivel Teniente 5 Acarreo, se puede inferir que, sobre la altura de interacción (en este caso, 48 [m] sobre la altura de interacción), se produce eventualmente un mecanismo de flujo caracterizado por movimientos principalmente verticales, donde todas las partículas se desplazan con velocidades relativamente similares y no presentan desplazamientos horizontales significativos. Esta observación comparte la hipótesis de Laubscher (2000) y los resultados obtenidos por Castro (2006) sobre la presencia de *mass flow* en una región superior a la altura de interacción. Esta evidencia está complementada con la aparición de *trazadores naturales* (rieles de ferrocarril y madera, entre otros elementos) en el punto de extracción 59 32F durante el mismo período de aparición de trazadores inteligentes.

Finalmente, resulta interesante reflexionar, a partir del análisis de la zona de extracción, un cambio de paradigma que considere la batea como unidad mínima de explotación.

### 5.4.3. Influencia de la granulometría en el comportamiento del flujo gravitacional

Diversos autores han estudiado el efecto del tamaño de partícula en experimentos físicos a escala de laboratorio (Kvapil, 1965; Peters, 1984; Laubscher, 1994; Power, 2004; Castro, 2006). Sin embargo, en la literatura se presentan evidencias contradictorias sobre cómo influye el tamaño de partícula en la geometría y comportamiento del flujo de roca.

No obstante lo anterior, se establece que dos supuestos son adecuados para efectos de esta investigación. Laubscher (1994) asume, a partir de su experiencia y observaciones en modelos de arena, que el diámetro del elipsoide de extracción aislada (IEZ) es controlado por el tamaño de roca, aumentando su valor en la medida que se incrementa el tamaño del material. En tanto, Castro (2006) postula, desde una prueba de laboratorio a gran escala utilizando grava, que la velocidad del flujo depende del tamaño de los fragmentos. Así, las partículas finas tienden a desplazarse más rápido que partículas gruesas dentro del flujo granular, pero la segregación de fino no es un factor importante en el flujo gravitacional.

El análisis de la fragmentación observada en los puntos, proporciona tres deducciones sobre el comportamiento de la zona de extracción para el campo cercano:

1. Durante el movimiento preferente de material, ya sea sobre el pilar mayor o sobre un punto de extracción, no existe una presencia exclusiva de roca con bajo tamaño, sino que se observa la aparición, en algunos puntos, de un importante porcentaje de partículas gruesas (entre 10% a 15% de granulometría tipo E).
2. Cuando existe un movimiento regular de material, similar a los lineamientos de la teoría de flujo, se percibe que el desplazamiento va acompañado de material con granulometría mixta, esto es, similar proporción de roca gruesa y bajos tamaños. Este hecho provoca que el punto de extracción esté abocado (el cono de mineral cubre completamente la superficie del punto) o semiabocado (existe un espacio menor sin mineral, entre el techo de la galería en el último marco de seguridad y el cono de mineral).
3. Finalmente, existe evidencia empírica indicando que, en la mayor parte de los casos, durante la generación de movimientos horizontales, desde la región central de la zona de extracción se advierte un importante movimiento de roca gruesa hacia los puntos de extracción (entre 15% a 30% de presencia de granulometría tipo E).

Otro aspecto relevante dice relación con el comportamiento de la fragmentación observada en los puntos de extracción. Es posible verificar que la evolución de la granulometría presenta un comportamiento similar a lo observado en el estudio de Viera & Diez (2014), donde el porcentaje de rocas gruesas (granulometría tipo E) alcanza valores máximos entorno al 60%, y posteriormente, se mantiene en el rango entre 25% a 60%. En consecuencia, se puede notar que siempre aparecen los cinco rangos de granulometría en los puntos de extracción estudiados.

Asimismo, considerando el diseño de perforación y tronadura, junto con las litologías presentes en Bloque-2 de mina Esmeralda (entregado en el Capítulo 3), se desprende que la granulometría observada en los puntos de extracción está ligada a la forma en que se realice la socavación del hundimiento y a la fragmentación primaria y secundaria que experimentan los diferentes tipos de materiales. Por lo tanto, la granulometría utilizada en el análisis corresponde a un proceso sinérgico particular de este caso de estudio.

En términos del análisis, es posible deducir que la presencia de fragmentos gruesos, dentro de la zona de extracción, podría inducir una mayor influencia en el movimiento lateral del material hacia los puntos de extracción, respecto a tamaños menores. Esta situación se asemeja a las observaciones planteadas por Laubscher (1994). En contraparte, no existe evidencia empírica revelando que las partículas de menores tamaños tengan predisposición a desplazarse con mayor velocidad respecto al material más grueso, por lo que no es posible constatar, en parte, la hipótesis planteada por Castro (2006). Sin embargo, se observa que la segregación de partículas no es un factor relevante en el comportamiento del flujo gravitacional.

Por último, como la fragmentación es un proceso complejo, que depende de múltiples variables, no se entrega un análisis más acabado del tema, motivo por el cual solo se abordaron los antecedentes cualitativos de este fenómeno. Más aún, no se establece una relación de las diferentes formas de extracción y el proceso de fragmentación de la roca. Resulta interesante proponer futuros estudios que involucren, con mayor detalle, la relación que podrían tener la extracción, competencia y litología de la roca, esfuerzos del entorno y otras variables de importancia, en el comportamiento de la fragmentación y en la generación de colgaduras y/o sobretamaños, sucesos que impactan de sobremanera los planes de producción durante la operación de una mina.

#### **5.4.4. Relación entre la extracción y granulometría del material**

Considerando los resultados del Capítulo, se aprecia que la extracción y fragmentación no permiten explicar, de manera independiente, el comportamiento de la zona de extracción en el campo cercano. Por este motivo, una discusión sobre cómo es la influencia conjunta de estos dos factores se considera necesaria.

Dadas las evidencias empíricas sobre el efecto de la extracción en el movimiento del flujo, se puede pensar que este factor es el que tiene mayor incidencia en el comportamiento dentro de la zona de extracción, corroborando una de las observaciones de Castro (2006). Sin embargo, el aporte de esta investigación es sugerir que la remoción de material desde el punto de extracción tiene, a su vez, una influencia sobre qué tipo de tamaño de roca puede moverse bajo ciertas condiciones de tiraje. Lo anterior se plantea por medio de las siguientes experiencias:

- Durante la extracción irregular de un punto de extracción, se observa en gran parte de los casos, un movimiento preferente de material sobre el pilar mayor del punto o sobre el punto mismo. Sin embargo, dependiendo de la temporalidad de este evento, el tipo de material desplazado puede variar:
  - (a) Si el período de tiempo es breve (menor a un mes), por lo general, se desplaza un conjunto de partículas con baja presencia de rocas gruesas (granulometría tipo E).
  - (b) Si el período de tiempo es prolongado (entre un mes a seis meses), por lo general, el material removido tiene una considerable presencia de rocas gruesas (entre 15% a 35% de granulometría tipo E).
- Durante una extracción relativamente regular, el comportamiento del flujo es similar a lo presentado en la teoría. A pesar de esto, se observa que la granulometría del material es mixta, presentando un porcentaje máximo de granulometría tipo E cercano a 15%. No obstante, generalmente el estado de los puntos es abocado o semiabocado.

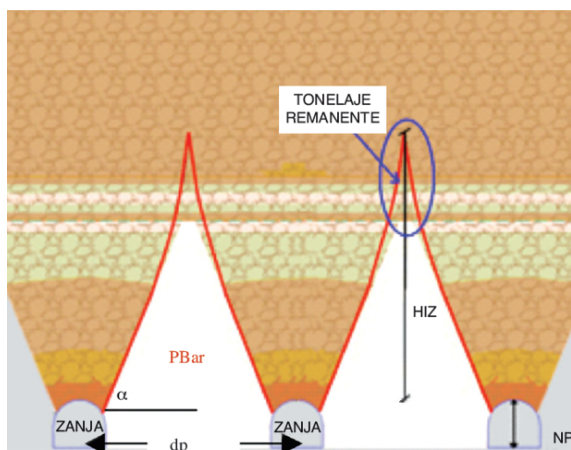
- Durante la no simultaneidad en la extracción, existe una alta probabilidad de presenciar mezcla horizontal hacia el punto en producción. Cuando se prolonga el estado de no simultaneidad, el flujo de roca lateral se propaga por sobre la región central de la zona de extracción, desplazando material con una alta proporción de partículas gruesas.

A pesar de que el comportamiento del flujo gravitacional depende de múltiples factores, las variables que se pueden controlar operacionalmente (extracción y granulometría) tienen un impacto fundamental sobre el flujo de roca fragmentada.

### 5.4.5. Desempeño del diseño minero para el caso de estudio

Para evaluar el desempeño del diseño minero actual en Bloque-2, se utilizarán la altura de interacción y ángulo de flujo obtenidos experimentalmente a través de esta investigación. Para complementar el análisis, se emplearán las metodologías propuestas por Laubscher (1994) y Vargas & Castro (2012).

Vargas & Castro (2012) entregan una relación que permite calcular la altura de interacción (1) y el ángulo de flujo (2) para zonas de extracción espaciadas de tal forma que puedan alcanzar la interacción. La **Ilustración 5-31** esquematiza este método.



$$HIZ = \left[ \frac{d_p - w_p}{2} \right] \tan(\alpha) \quad (1)$$

$$\alpha = 45 + \frac{\phi}{2} \quad (2)$$

**Ilustración 5-31** Extracción en la base del hundimiento. El mineral remanente sobre la HIZ se representa en azul (Vargas & Castro, 2012).

Donde *HIZ* corresponde a la altura de interacción,  $d_p$  es la distancia entre puntos de extracción,  $w_p$  representa el ancho de la galería de extracción,  $\alpha$  es el ángulo de flujo, y  $\phi$  es el ángulo de fricción del material fragmentado. En este caso, se utiliza un ángulo de fricción  $\phi$  de  $42^\circ$ , ligado al conjunto Brechas Fw, que concierne a la litología con mayor presencia en el sector de estudio (ver Capítulo 3).

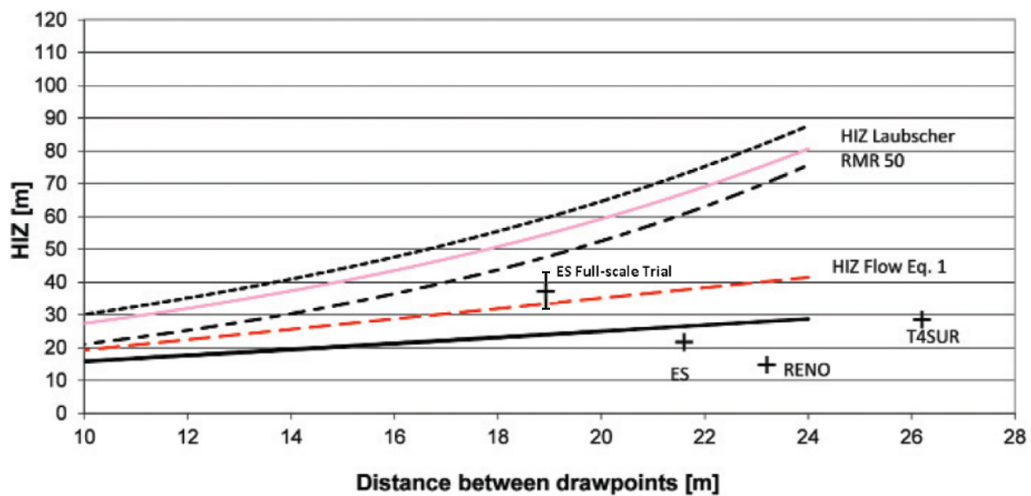
La **Tabla 5-5** muestra el resumen de las estimaciones de los diferentes parámetros analizados, para la interacción a través del pilar mayor. Debido a la falta de evidencia acerca de la interacción en el espaciamiento de puntos a 24 [m], no es posible confirmar una estimación de tonelaje remanente sobre el pilar menor.

**Tabla 5-5** Comparación de parámetros de diseño para estimaciones con trazadores recuperados y metodologías de cálculo por punto de extracción.

Método de estimación	Altura de interacción (desde techo NP) [m]	Ángulo de flujo [°]	Ancho de la zona de extracción [m]	Material remanente sobre pilar mayor [kton]	Recuperación minera por PE [%]
Trazadores recuperados	37 ± 6	67 ± 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interacción a 20 [m]</li> <li>• Interacción a 24 [m] aún no comprobada</li> </ul>	8.4 ± 3	96 ± 1.5
Laubscher (1994)	41	75	Interacción a 26 [m]	16.0	92.2
Vargas & Castro (2012)	32.2*	66	—	8.7	95.7

\* Método aplicado desde la tolva de batea.

Desde la **Tabla 5-5** es posible observar que las estimaciones de los parámetros de diseño son significativamente diferentes entre los métodos. A pesar de lo anterior, se destaca que la metodología propuesta por Vargas & Castro (2012) alcanza cifras similares al valor obtenido empíricamente, siempre que la relación (1) sea aplicada desde la tolva de batea, pues corresponde a la zona donde el diseño de perforación y tronadura busca generar apex cero entre las bateas adyacentes por el pilar mayor. Para complementar este método, se incorpora la altura de interacción estimada a la evaluación gráfica (**Ilustración 5-32**).



**Ilustración 5-32** Estimación de HIZ como función del espaciamiento entre puntos de extracción (Vargas & Castro, 2012).

Finalmente, se destaca que la recuperación minera real, por punto de extracción, alcance cifras superiores al 95%, lo que indica un destacado desempeño del diseño minero actual en Bloque-2.

## 5.5. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En el presente Capítulo se entregaron los resultados experimentales y empíricos de la prueba de trazabilidad en Bloque-2 de mina Esmeralda. En consecuencia, las conclusiones generadas proponen lo siguiente:

- ✓ Existe evidencia experimental indicando que el comportamiento de la zona de extracción tiene una sectorización regular, con regiones de recuperación definidos por la extracción, y manteniendo los rasgos característicos de la teoría de flujo, bajo las condiciones en las cuales se desarrolla esta prueba en Bloque-2.
- ✓ Dentro de los resultados obtenidos, se infiere la existencia de dos tipos de comportamiento del flujo de roca. El primero indica la presencia de movimientos preferentes inicialmente sobre el pilar mayor y pilar menor, extendiendo la recuperación hacia la región central de la zona de extracción. El segundo comportamiento muestra que el flujo puede ser descrito por la teoría de flujo gravitacional, donde el material en la región central de la zona de extracción posee mayores velocidades relativas respecto al material ubicado sobre los pilares mayor y menor.
- ✓ Analizando el efecto conjunto de la extracción y granulometría del material en el comportamiento del flujo, se percibe que existe una influencia combinada de estos factores en el movimiento de roca durante la recuperación de material. Sin embargo, se desprende que la extracción es la variable más importante en el movimiento de la roca fragmentada.
- ✓ Se deduce que no existe relación directa entre flujo preferente (o de mayor velocidad relativa) y material de bajo tamaño. Adicionalmente, es posible evidenciar que la mezcla horizontal de roca dentro del flujo está ligada, preferentemente, a partículas gruesas, lo que parece estar apoyado por las deducciones de Laubscher (1994).
- ✓ Los resultados del análisis indican que el modo de extracción de material tiene una influencia directa en el tamaño de fragmentos que se moverán desde la zona de extracción hacia los puntos de extracción. Así, el comportamiento del flujo, en el campo cercano, puede ser explicado por medio de la definición de tres estados que dependen de la extracción y la granulometría del material:
  - i. El movimiento preferente está asociado, por lo general, con baja presencia de material grueso cuando hay un tiraje irregular por un período reducido de tiempo (menor a un mes). Si la extracción irregular se prolonga en el tiempo, el material removido tiene una mayor proporción de roca gruesa. Una variación promedio máxima de 2.84 [kton] del tonelaje promedio mensual tiene un efecto importante en el movimiento preferencial del flujo.
  - ii. La extracción regular de material está acompañada por el movimiento regular de roca fragmentada, junto con una proporción similar entre partículas gruesas y de bajo tamaño en el punto. Esto permite que, en gran parte de los casos, el punto esté en estado abocado o semiabocado. Una variación máxima de 2.46 [kton] no afecta el comportamiento regular del flujo.



En los dos casos anteriores, la evidencia observada indica que los puntos de extracción se encuentran, mayoritariamente, bajo condiciones favorables para realizar las labores de extracción durante la operación.

- iii. La extracción no simultánea de material provoca una alta posibilidad de originar mezcla lateral, vinculada generalmente con el movimiento de roca gruesa desde la región central de la zona de extracción hasta los puntos de extracción. Una variación máxima de 2.83 [kton] en el promedio mensual afecta el comportamiento del flujo.
- ✓ La serie de análisis realizados en este Capítulo permitió estudiar el efecto de la extracción y fragmentación. Si bien se reconoce la alta complejidad que existe para establecer una relación única de estas variables operacionales en el flujo a escala mina, los resultados entregados permiten complementar el entendimiento actual. Sin embargo, existe una gran oportunidad para generar investigación sobre la caracterización del proceso de fragmentación durante la extracción y su influencia en el comportamiento del flujo de roca.
- ✓ La altura de interacción estimada (con trazadores recuperados), a través del pilar mayor, corresponde a  $26 \pm 5$  [m], con un ángulo de flujo de  $67 \pm 6^\circ$ . La altura de interacción estimada, a través del pilar menor, alcanza 14 [m] (medida desde techo de galería de producción) para el espaciamiento entre puntos de 20 [m]. Para la nueva malla, con espaciamiento de 24 [m], aún no existe evidencia experimental de interacción entre las zonas de flujo.
- ✓ El traslape observado en la zona de extracción a través del pilar mayor (20% aproximadamente), entrega antecedentes empíricos para decidir aumentar el largo de zanja, y así, incrementar el espaciamiento entre calles de producción, respecto al diseño actual de Bloque-2.
- ✓ Se observa empíricamente que puede existir un mecanismo tipo *mass flow* sobre la zona de extracción, definida a una elevación mayor que la altura de interacción estimada.
- ✓ Dentro del análisis de desempeño del diseño minero, se espera que, a partir de las estimaciones experimentales, la recuperación minera por punto de extracción alcance un rango de  $96 \pm 1.5\%$ . Asimismo, se destaca que este tipo de información permite tomar decisiones con menor grado de incertidumbre.

Los resultados de esta investigación contradicen, hasta el momento, las conclusiones obtenidas en la prueba a escala mina de *Ridgeway Deeps*, en relación al comportamiento del flujo de roca en el campo cercano. Además, se desprende que los hallazgos inferidos se alinean con algunas hipótesis entregadas por diferentes autores. Sin embargo, para complementar las deducciones sobre flujo gravitacional registradas en la literatura, se propone utilizar los resultados para generar un modelo conceptual de flujo para el campo cercano, presentado en el Capítulo 6.

## CAPÍTULO 6

### MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO GRAVITACIONAL PARA LA ZONA DE EXTRACCIÓN EN EL CAMPO CERCANO

*Los modelos conceptuales de flujo gravitacional, postulados por diversos autores, entregan lineamientos simplificados, basados en observaciones, sobre cómo es el comportamiento del flujo durante la remoción de material. Para complementar el conocimiento, este Capítulo plantea un nuevo modelo de flujo de roca, utilizando las hipótesis y resultados presentados a lo largo de la investigación. El modelo conceptual propuesto permite explicar, de manera directa, la relación evidenciada entre la extracción y el movimiento de los fragmentos en el campo cercano, mostrando evidentes diferencias respecto a los postulados de Laubscher (2000) y Brunton et al. (2012).*

#### 6.1. INTRODUCCIÓN

En la literatura es posible encontrar múltiples modelos conceptuales para explicar las características del flujo gravitacional. Algunas de estas teorías se fundamentan en observaciones sobre modelos físicos de arena (Laubscher, 2000; Susaeta, 2004) y en deducciones inferidas desde una prueba a escala mina (Brunton et al., 2012). Considerando este limitado escenario, resulta importante idealizar, de forma conjunta, la información generada durante esta investigación, para complementar el entendimiento del flujo gravitacional de roca fragmentada.

La finalidad del Capítulo es emplear los resultados de este estudio en la generación de un nuevo modelo conceptual, aplicado al caso particular de Bloque-2, enfocada en mejorar el conocimiento sobre el fenómeno del flujo gravitacional. Para ello, se consideran las siguientes limitaciones:

- i. El modelo conceptual se basa en los antecedentes obtenidos desde la prueba de trazabilidad, información operacional de extracción de material, datos de fragmentación cualitativa en puntos de extracción e información derivada de inspecciones en terreno.
- ii. Para la visualización del modelo se utilizará un perfil longitudinal a lo largo de la zanja (plano Hw – Fw) para describir el comportamiento del flujo.
- iii. La elaboración del modelo considera el comportamiento esperado del flujo de una zanja para una operación compuesta de extracción regular, irregular y no simultánea, incorporando de manera generalizada los resultados adquiridos en este estudio, que corresponde a lo observado en la operación real de Bloque-2.
- iv. Se asumirá que la tronadura de socavación y las diferentes litologías del entorno en el Bloque-2 no generan mayores diferencias en la fragmentación inicial del material.
- v. Se considera que la granulometría entregada en el modelo es sólo una esquematización para representar el comportamiento del flujo. Se incluye además, efectos cualitativos de fragmentación secundaria, debido al movimiento de roca. Por ningún motivo se pretende interpretar el proceso de fragmentación de la roca dentro de la columna extraída.

## 6.2. ANTECEDENTES GENERALES

Las etapas del modelo se definen a continuación:

- (a) **Etapa 1:** Extracción de material fragmentado por la tronadura de la batea (repele).
- (b) **Etapa 2:** Extracción hasta la altura de socavación (15 [m] sobre el UCL).
- (c) **Etapa 3:** Extracción hasta 25 [m] sobre el UCL.
- (d) **Etapa 4:** Extracción hasta 35 [m] sobre el UCL (límite superior del campo cercano).

A partir de los resultados generados en el Capítulo 5, no existe una evidencia generalizada que permita suponer una percolación excesiva de partículas con bajo tamaño, ni tampoco se revela la existencia de perturbaciones relevantes en el flujo por efecto de rocas gruesas.

Finalmente, el modelo conceptual incorpora la influencia de extracción del material sobre el movimiento vertical y horizontal, para los diferentes tamaños de roca en la columna.

## 6.3. MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO GRAVITACIONAL EN EL CAMPO CERCANO

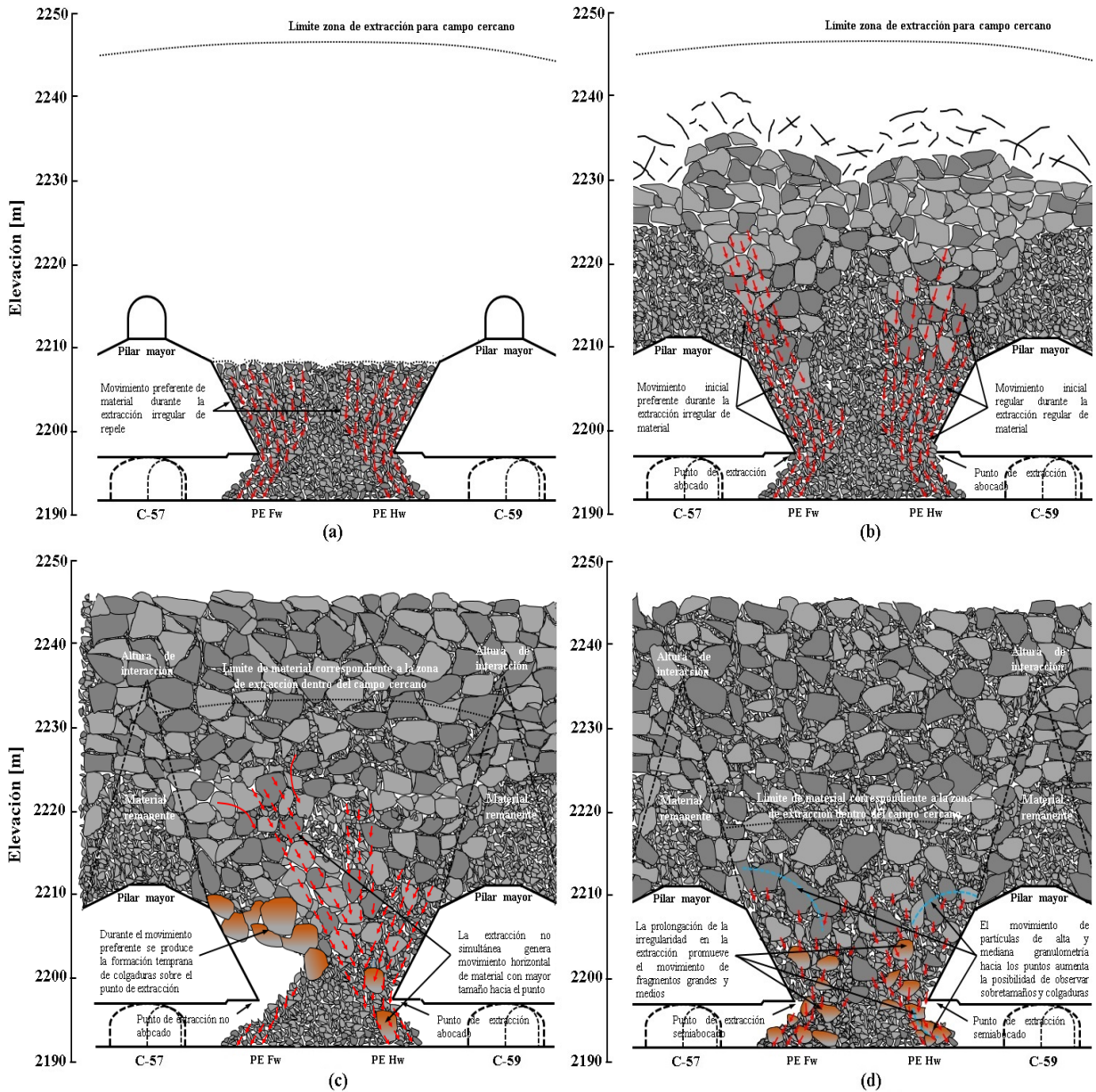
El modelo conceptual de flujo gravitacional dentro del campo cercano se compone de cuatro etapas, según lo presentado en la **Ilustración 6-1**. En todas las fases planteadas, se observa que el flujo de roca tiene una sectorización regular y está determinado por la extracción, lo que a su vez impacta en el perfil de movimiento de las partículas dentro de la columna.

- La etapa 1 (**Ilustración 6-1a**) esquematiza la remoción inicial del material posterior a la tronadura del cajón de la batea (repele), caracterizado por una extracción irregular, debido a que no existen restricciones geomecánicas para definir velocidades en el tiraje. En este estado existe un movimiento preferente de material, a lo largo de la pared del pilar mayor, observándose material con bajo tamaño granulométrico en los puntos de extracción.
- Durante la etapa 2 (**Ilustración 6-1b**) se inicia la extracción de material proveniente de la socavación del nivel de hundimiento. Para representar el efecto del tiraje en el comportamiento del flujo de roca, se observa una extracción irregular a lo largo del tiempo (con mayor tonelaje removido respecto a su par) en el punto PE Fw, mientras que para el punto PE Hw se presenta un tiraje regular en este período. Así, la forma en la extracción de material tiene dos efectos visibles en el movimiento de las partículas.

Por una parte, mientras se realiza un tiraje irregular, se promueve el movimiento preferente de material tronado, con alta presencia de roca con baja granulometría, desde la región superior del pilar mayor. Como consecuencia de este proceso, se transportan fragmentos de roca gruesos, provenientes de la propagación inicial del hundimiento, con mayor velocidad relativa que el material circundante. En tanto, cuando se prolonga un tiraje regular, se favorece el desplazamiento regular del material socavado, siguiendo los lineamientos generales de la teoría de flujo, lo que conlleva a su vez, a postergar la aparición de roca gruesa. En consecuencia, este modo de extracción produce movimientos de menor velocidad relativa respecto al caso previo.

El proceso de incorporación de material grueso entre fragmentos de reducido tamaño durante la extracción, puede ser explicado si se considera la inercia que las partículas más grandes adquieren debido a elevadas velocidades del medio granular. Este comportamiento generalizado en el flujo, provoca que el material ubicado en la región central, con fragmentos gruesos, presente reducido movimiento, ocasionando una acumulación de partículas, retrasando la entrada de material desde el sector central hacia los puntos de extracción.

El crecimiento de la zona de extracción se extiende primordialmente sobre las paredes del pilar mayor.



**Ilustración 6-1** Modelo conceptual de flujo gravitacional para campo cercano en Bloque-2 de mina Esmeralda. (a) Extracción de repele. (b) Extracción inicial de material hasta 15 m sobre el UCL. (c) Extracción de material hasta 25 m sobre el UCL. (d) Extracción de material hasta 35 m sobre el UCL.

- Cuando se alcanza la etapa 3 (**Ilustración 6-1c**) se ha removido la mayor parte del material socavado, con lo que se percibe la existencia de dos acontecimientos diferentes. Por un lado, el tiraje irregular en el punto PE Fw genera la formación anticipada de colgaduras, con respecto al punto vecino, observándose operacionalmente un estado no abocado del punto, deteniéndose la extracción.

Mientras el punto PE Hw se mantiene en producción, junto con la no simultaneidad en la extracción de la zanja, se origina una alta probabilidad de presenciar movimientos horizontales de material grueso desde el sector superior a la colgadura (mezcla lateral), junto con un desplazamiento vertical de roca de menor magnitud. En este aspecto, se observa un comportamiento de segregación similar al de la etapa 2, pues se adelanta la aparición de material grueso en el punto.

En esta etapa se advierte una elevada cantidad de colgaduras, formadas mayoritariamente por roca gruesa de gran tamaño (granulometría tipo E). No obstante, cabe mencionar que en todo momento hay presencia, en menor cantidad respecto a la etapa anterior, de fragmentos de bajo tamaño en los puntos de extracción, que puede corresponder a roca socavada que no ha sido removida o partículas provenientes de fragmentación secundaria parcial de material grueso.

- Durante la etapa 4 (**Ilustración 6-1d**) se mantiene una extracción irregular y un tiraje no simultáneo debido a dos condiciones. La primera de ellas corresponde a la formación de colgaduras de material grueso sobre los puntos de extracción. La segunda situación consiste en la presencia de sobretamaños en los puntos, compuestos por fragmentos gruesos, dificultando la remoción del material por parte de los equipos mecanizados.

Bajo estas circunstancias de extracción, se mantiene una influencia en el movimiento horizontal y vertical de partículas de gran tamaño dentro de la columna, por lo tanto, se mantiene la ocurrencia de estas interferencias operacionales. Sin embargo, aumenta la proporción de material de bajo tamaño, respecto a la etapa anterior, como resultado de la fragmentación secundaria de roca ubicada en la región superior a la zona de extracción.

A partir de este modelo conceptual de flujo, se espera que el material sobre la zona de extracción, con altura de extracción superior a 70 [m], experimente un mayor efecto de la fragmentación secundaria sobre las rocas gruesas, promoviendo una disminución en la frecuencia de colgaduras y sobretamaños en los puntos de extracción. Adicionalmente, se supone la generación de movimiento principalmente vertical, con menor influencia de transporte horizontal de material a los puntos de extracción (*mass flow*).

#### 6.4. DISCUSIÓN GENERAL DEL CAPÍTULO

En esta sección se aborda la discusión referente al nuevo modelo conceptual de flujo dentro de la zona de extracción para el campo cercano.

Se ha propuesto un modelo conceptual de flujo gravitacional, describiendo las características básicas asociadas al comportamiento observado durante la implementación de una prueba a escala mina en mina El Teniente, utilizando trazadores inteligentes.

En virtud del modelo conceptual planteado, se observa que las etapas señaladas permiten explicar, de manera directa, la interacción evidenciada entre la forma en que se realiza la extracción de material desde los puntos, y la influencia en el movimiento de los diferentes tamaños de roca. Adicionalmente, el modelo incorpora antecedentes recopilados en inspecciones a terreno, realizadas desde la implementación de la prueba de trazabilidad, proporcionando información autocontenida sobre el comportamiento del flujo gravitacional en el campo cercano, para las condiciones particulares en Bloque-2 de mina Esmeralda.

Sin duda, el modelo planteado por Brunton *et al.* (2012) puede representar la situación propia de *Ridgeway Deeps*, pero no permite explicar claramente cómo influye y cuál es el rol de la extracción en el comportamiento del flujo de roca. Más aún, el modelo de Brunton *et al.* (2012) parece apoyarse sobre la base de que la diferencia de tamaño entre las partículas es el factor clave en el control del movimiento del material. Por consiguiente, estas incertidumbres generadas por el modelo de *Ridgeway Deeps* pueden resolverse con el modelo elaborado para Bloque-2.

El modelo de este estudio no explica cómo se produce la fragmentación de la columna; no busca entregar ideas que permitan inferir el efecto que pueda tener la forma del tiraje con el proceso de fragmentación; finalmente, no entrega rasgos característicos sobre cómo afecta la extracción en la propagación del hundimiento.

## 6.5. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En el presente Capítulo se desarrolló un modelo conceptual de flujo gravitacional, para describir el comportamiento general de la roca fragmentada en el campo cercano observado en Bloque-2 de mina Esmeralda. En cuanto a las conclusiones más importantes, se destacan las siguientes:

- ✓ El modelo conceptual permite abarcar, de forma generalizada, el comportamiento del flujo de roca como consecuencia de los resultados de la interpolación lineal de trazadores, información operacional y observaciones en terreno durante inspecciones a los puntos de extracción.
- ✓ El modelo proporciona una relación directa entre la extracción y el movimiento de los fragmentos, como una condición natural que explica el fenómeno gravitacional del flujo de roca en el campo cercano.
- ✓ La evolución del flujo dentro de la zona de extracción facilita la interpretación sobre cómo se generan las diferentes interferencias operacionales (colgaduras y sobretamaños en el punto) y entrega una explicación relativa a la constante presencia de diferentes tamaños de roca durante la operación, hecho observado en las inspecciones realizadas durante la incorporación de zanjas a la producción.
- ✓ El modelo conceptual propuesto complementa el conocimiento y entrega nuevos lineamientos referentes al comportamiento gravitacional del fenómeno de flujo para el campo cercano, mostrando notorias diferencias a lo postulado por Laubscher (2000) y Brunton *et al.* (2012).

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

*Un estudio de flujo gravitacional de material fragmentado fue realizado por medio de una prueba de trazabilidad, utilizando la tecnología de trazadores inteligentes, que fue implementado en Bloque-2 de mina Esmeralda, División El Teniente, Codelco-Chile. En este trabajo se investigó el comportamiento del flujo de roca dentro del campo cercano, junto con la influencia de las variables operacionales extracción y granulometría en el movimiento del material; se analizó el desempeño del diseño minero para el caso de estudio; finalmente, se propone un nuevo modelo conceptual de flujo para complementar el conocimiento existente sobre el fenómeno gravitacional en la minería por hundimiento.*

#### 7.1. PREÁMBULO

Durante el presente estudio se realizó una revisión de la literatura para establecer el estado del arte acerca del comportamiento de la zona de extracción en el campo cercano, y sobre pruebas a escala mina que permitieron entender el flujo gravitacional de material fragmentado. Basándose en este análisis, los vacíos identificados dentro del conocimiento actual derivan en las siguientes conclusiones:

- ✓ El entendimiento actual relativo al comportamiento del flujo de material fragmentado en el campo cercano se ha fundado, en gran medida, a partir de modelos físicos escalados en laboratorio, con un reducido aporte de pruebas a escala mina. No se presentan estudios que involucren el efecto real de la extracción y la granulometría de la roca en la evolución de la zona de extracción.
- ✓ A partir de los trabajos realizados por diversos autores, aún existe incertidumbre respecto a la determinación de las variables operacionales más relevantes para entender el fenómeno del flujo gravitacional.
- ✓ Actualmente, se observa una escasa aplicación de pruebas a escala mina en minería de *panel caving*, y adicionalmente, un limitado procesamiento y análisis de la información obtenida en experiencias previas.
- ✓ Considerando lo anterior, la metodología propuesta en esta investigación permite estimar adecuadamente el desarrollo de la zona de extracción a partir de los trazadores recuperados, y además, proporciona un análisis de la influencia que existe entre la extracción de material y la granulometría de las partículas sobre el comportamiento del flujo en el campo cercano.

## 7.2. CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

### 7.2.1. Comportamiento del flujo gravitacional en el campo cercano

A pesar de que el comportamiento del flujo de roca fragmentada en el campo cercano es un fenómeno complejo, las simplificaciones y consideraciones abordadas en el estudio posibilitan concluir lo siguiente:

- ✓ Existe evidencia experimental para postular que el flujo de extracción de material fragmentado, dentro del campo cercano, se desarrolla de forma regular y su evolución depende de la forma en que se realice la extracción. Asimismo, no se observan indicios de un estado caótico o asimétrico en el movimiento de material. Todo lo anterior indica que la naturaleza del flujo, a escala mina, es regular y sigue los lineamientos de la teoría.
- ✓ El análisis entre la extracción y la granulometría en el comportamiento del flujo de roca, sugiere que existe una influencia considerable de estas variables operacionales en el movimiento de material dentro de la columna de mineral.
- ✓ A partir del análisis anterior, se infiere que la extracción de material es el factor operacional que controla el movimiento de diferentes granulometrías de roca dentro de la columna de mineral, lo que a su vez, influencia en la geometría de la zona de extracción. El comportamiento del flujo gravitacional en el campo cercano puede ser explicado a través de tres diferentes estados:
  - i. El movimiento preferente está asociado, por lo general, con una baja presencia de material grueso cuando existe un tiraje irregular por un período reducido de tiempo (menor a un mes). Si la extracción irregular se prolonga en el tiempo, el material removido tiene una mayor proporción de roca gruesa.
  - ii. La extracción regular de material está acompañada por el movimiento regular de roca fragmentada, junto con mezcla en el tamaño de partícula observado en el punto (proporción similar entre partículas gruesas y de bajo tamaño). Esto permite que, en la mayor parte de los casos, el punto esté en estado abocado o semiabocado.

En los dos casos previos, la evidencia observada indica que los puntos de extracción se encuentran, en la mayor parte del tiempo, bajo condiciones favorables para realizar las labores de extracción durante la operación.

- iii. La extracción no simultánea de material provoca una alta posibilidad de generar mezcla lateral, vinculada generalmente con el movimiento de roca gruesa desde la región central de la zona de extracción hacia los puntos de extracción.
- ✓ El nuevo modelo conceptual de flujo dentro del campo cercano proporciona una relación directa entre la extracción de material, el movimiento de los diferentes fragmentos de roca y la geometría que alcanza la zona de extracción, incorporando información operacional procedente de observaciones en terreno a lo largo de la prueba de trazabilidad. La aplicación del nuevo modelo de flujo permite entender el desarrollo cualitativo y la aparición de diferentes interferencias durante la minería de *caving* para el caso de estudio.



### 7.2.2. Desempeño del diseño minero en Bloque-2

El análisis de interacción desarrollado en esta investigación permite obtener las conclusiones detalladas a continuación:

- ✓ Los resultados experimentales y empíricos en la recuperación de trazadores sugieren la existencia de interacción entre las zonas de extracción a través del pilar mayor, alcanzando una altura de interacción (HIZ) promedio de  $26 \pm 6$  [m] y un ángulo de flujo promedio de  $67 \pm 5^\circ$ . Asimismo, para el diseño inicial del Bloque-2 (espaciamiento de 20 [m] entre puntos de extracción), se revela interacción entre las zonas de flujo sobre el pilar menor. Sin embargo, para el nuevo diseño (espaciamiento entre puntos de 24 [m]) no existe aún evidencia de interacción entre las zonas de extracción.
- ✓ El traslape obtenido dentro de la zona de extracción (en un perfil longitudinal a la zanja), proporciona antecedentes sustanciales para considerar un incremento en el largo de la batea, aplicado actualmente en Bloque-2. Como consecuencia, es posible aumentar el espaciamiento entre calles, y con ello, disminuir el desarrollo de túneles en el interior mina.

### 7.2.3. Prueba de trazabilidad en Bloque-2

Con respecto a la prueba de trazabilidad *per se*, se desprenden las siguientes conclusiones y aprendizajes:

- ✓ La implementación del sistema de trazadores inteligentes entrega resultados satisfactorios para estudiar el real impacto en el desempeño del diseño minero respecto a la recuperación de reservas.
- ✓ En el período experimental se recopiló información con alto grado de calidad y representatividad de una operación minera de *panel caving*, proporcionando antecedentes significativos para la toma de decisiones en el corto, mediano y largo plazo.
- ✓ Desde la perspectiva operacional, se destaca el exitoso cumplimiento de la etapa de instalación, logrando un elevado control y coordinación entre las diferentes áreas involucradas. Asimismo, se señala la aplicabilidad y operatividad de la tecnología bajo el ambiente agresivo de la operación minera, donde no se observaron mayor inconvenientes en el correcto funcionamiento del sistema.
- ✓ Finalmente, el funcionamiento del sistema de trazadores inteligentes en el Bloque-2 de mina Esmeralda y los resultados obtenidos en esta investigación, validan la utilización de esta tecnología en proyectos futuros de División El Teniente.

## 7.3. RECOMENDACIONES Y ENFOQUE A FUTURO

Los resultados y conclusiones de la presente investigación entregan una nueva perspectiva sobre el comportamiento del flujo gravitacional, a nivel operacional, dentro del campo cercano, complementando el conocimiento y mejorando el entendimiento de este fenómeno en la minería de hundimiento.

Sin embargo, debido a las limitaciones empleadas en el desarrollo del estudio, aún existen aspectos que se recomiendan abordar para profundizar este tema en trabajos futuros:

- ✓ *Interpolación de datos proveniente de trazadores:* Dado que el método de procesamiento y análisis de información se basó en un algoritmo lineal para la estimación de la zona de extracción, sería relevante y novedoso desarrollar un nuevo tipo de procedimiento para evaluar el comportamiento del flujo de material extraído.
- ✓ *Analizar un mayor número de factores operacionales:* Con la finalidad de incorporar mayor información durante la vida de una mina de hundimiento, resulta necesario estudiar la influencia que tienen diversas variables operacionales en el comportamiento y desempeño del flujo gravitacional en la producción. En este sentido, se destaca incluir el desarrollo de colgaduras en los puntos durante la extracción, analizar con más detalle el proceso de fragmentación primaria y secundaria dentro de la columna de material, y examinar las consecuencias que generan interferencias operacionales (detenciones en la extracción por reparación de puntos, calles o por planificación de corto plazo) en el comportamiento del flujo.
- ✓ *Estudio de interacción para espaciamiento entre puntos a 24 [m]:* Debido a la falta de información de trazadores recuperados, producto de una baja extracción de la zanja Z-34, se considera de vital importancia analizar la interacción entre las zonas de extracción, sobre el pilar menor, para la nueva malla de extracción del Bloque-2, con el fin de estimar la recuperación de reservas del nuevo diseño minero.
- ✓ *Futuros proyectos con tecnología de trazadores inteligentes:* Se recomienda aplicar la metodología presentada en esta investigación para futuros proyectos, dentro de División El Teniente, que incorporen la tecnología de trazadores inteligentes. Lo anterior se debe a la obtención de información de elevada calidad, y en segundo término, a la simpleza para el procesamiento y análisis de datos de entrada. Además, se sugiere efectuar otras pruebas en minas con condiciones (geomecánica, geología y diseño) similares a las de Bloque-2, para comparar resultados y efectuar conclusiones con mayor respaldo operacional. Finalmente, se recomienda realizar un lechado en las perforaciones de instalación de trazadores, para corroborar que la posición inicial de los trazadores no sea afectada por tronaduras.
- ✓ *Utilización de modelamiento numérico:* Para mejorar el entendimiento sobre los mecanismos de flujo, se recomienda emplear los modelos numéricos actuales, y calibrados con los datos obtenidos en la prueba a escala mina. Así, es posible estudiar y predecir, de forma representativa y con mayor detalle, el efecto de los esfuerzos (in situ e inducidos), la fragmentación, la extracción y la compactación sobre el flujo gravitacional durante la operación de una mina de hundimiento. Con lo cual, el modelamiento numérico se transformaría en una herramienta de gestión para tomar decisiones en el corto/largo plazo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvial, J.** (1992). *Analysis of Extraction at El Teniente 4 Sur LHD*. Proceedings of MassMin 1992, The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, South Africa.
- Brunton, I., Fraser, S., Hodgkinson, J., Stewart, P.** (2010). *Parameters influencing full scale sublevel caving material recovery at the Ridgeway gold mine*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol 47, pp 647-656.
- Brunton, I., Sharrock, G., Lett, J.** (2012). *Full Scale Near Field Flow Behaviour at the Ridgeway Deeps Block Cave Mine*. Proceedings of MassMin 2012, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Westmount, Canada.
- Castro, R.** (2006). *Study of the mechanisms of gravity flow for block caving*. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at The University of Queensland, Julius Kruttschnitt Minerals Research Centre, Brisbane, Australia.
- Castro, R. & Armijo, F.** (2012). *Diseño experimental para la prueba de trazabilidad de mineral en mina El Teniente*. Informe Final, Block Caving Laboratory, Departamento de Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Codelco-Chile**, División El Teniente, Gerencia de Minas, Superintendencia Ingeniería de Minas (2011). *Diseño barrenadura zanja estándar, nivel de producción Mina Esmeralda Bloque 2*. Número de plano IM8-34882-Rev0.
- Codelco-Chile**, División El Teniente, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (2010). *Esmeralda Sur –Definiciones de Crecimiento*. Dirección de Planificación Minerometalúrgica,
- Chitombo, G.** (2010). *Cave mining –16 years after Laubscher’s 1994 paper ‘Cave mining - state of the art’*. Proceeding of Second International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia.
- De Silva, S., Dyrøy, A., Enstad, G.** (1999). *Segregation mechanisms and their quantification using segregation testers*. Proceedings of the IUTAM Symposium, New Jersey, United State of America.
- Diez, E., Mejías, M.** (2015). *Levantamiento Geológico a Puntos en Quiebre*. Geología de Producción, Superintendencia de Gestión Producción, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, Codelco-Chile, División El Teniente.
- González, P., Pooni, L., Whiteman, D.** (2011). *Application of the Smart Marker System in a Large Scale Trial at BHP Billiton’s Perseverance SLC mine: Implications for Cave Monitoring and Management Practices*. Second International Future Mining Conference 2011, University of New South Wales, Sydney, Australia.

- 
- Gustafsson, P.** (1998). *Waste rock content variations during gravity flow in sublevel caving: Analysis of full scale experiments and numerical simulations*. PhD thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Halim, A.** (2010). *3D Large Scale Physical Modelling for Studying Interactive Drawing and Drawpoint Spacing in Block Caving Mines*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Hollins, B. & Tucker, J.** (2004). *Draw point analysis using a marker trial at the Perseverance Nickel Mine*. Proceeding of MassMin 2004, Instituto de Ingenieros de Chile, Santiago, Chile.
- Hustrulid, W. & Kvapil, R.** (2008). *Sublevel caving –past and future*. 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Luleå, Sweden.
- Jolley, D.** (1968). *Computer simulation of the movement of ore and waste in an underground mine*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy, Westmount, Canada.
- Kvapil, R.** (1965). *Gravity flow of Granular Materials in Hoppers and Bins, Part I and II*. International Journal of Rock Mech. & Mining Sciences. Vol 2, pp 35-41.
- Kvapil, R.** (1992). *Sublevel Caving*. SME Mining Engineering Handbook (2nd edition), Society for Mining Metallurgy and Exploration, Colorado, USA.
- Kvapil, R.** (2004). *Gravity Flow in Sublevel and Panel Caving: A Common Sense Approach*. Luleå University of Technology Press, Luleå, Sweden.
- Laubscher, D.** (1994). *Cave mining –the state of the art*. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol 94, pp 279-293.
- Laubscher, D.** (2000). *Block Cave Manual*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Marano, G.** (1980). *The interaction between adjacent draw points in free flowing materials and its application to mining*. Chamber of Mines Journal. pp 25-32.
- Mohd, M.** (2011). *Particle Percolation in Block Caving Mines*. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, School of Mining Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Montecino, N.** (2011). *Modelo de Mezcla de Fragmentación Secundaria en Minería de Block/Panel Caving*. Tesis para optar al grado de Magister en Minería. Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Moss, A., Russell, F., Jones, C.** (2004). *Caving and fragmentation at Palabora: Prediction to Production*. Proceedings of MassMin 2004. Instituto de Ingenieros de Chile, Santiago, Chile.

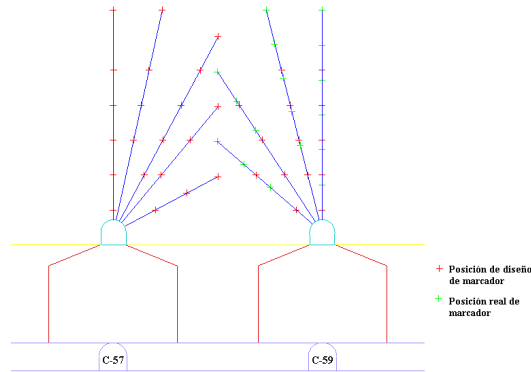
- 
- Ngidi, S. & Pretorius, D.** (2011). *Impact of poor fragmentation on cave management*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 6th Southern African Base Metals Conference 2011, Phalaborwa, South Africa.
- Peters, D.** (1984). *Physical Modeling of the Draw Behavior of Broken rock in Caving*. Quarterly of the Colorado School of Mines, Colorado, USA. pp 1-48.
- Pierce, M.** (2009). *A Model For Gravity Flow of Fragmented Rock in Block Caving Mines*. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Power, G.** (2003). *Modelling granular flow in caving mines: Large scale physical modelling and full scale experiments*. PhD Thesis, University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Rustan, A.** (2000). *Gravity Flow of Broken Rock –What is Known and Unknow*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Proceedings of MassMin 2000, Brisbane, Australia.
- Salter, G.** (1998). *Investigations into the Segregation of Heaps of Particulate Materials with Particular Reference to the Effects of Particle Size*. Ph.D Thesis, University of Greenwich, London, UK.
- Steffen, S. & Kuiper, P.** (2012). *Maximising Ore Recovery and the Implications for Cave Monitoring and Management Practices –Application of the Smart Marker System in Block and Sublevel Mines*. Proceedings of MassMin 2012, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Westmount, Canada.
- Susaeta, A.** (2004). *Theory of Gravity Flow (Part I)*. Proceedings of MassMin 2004, Instituto de Ingenieros de Chile, Santiago, Chile.
- Susaeta, A.** (2004). *Theory of Gravity Flow (Part II)*. Proceedings of MassMin 2004. Instituto de Ingenieros de Chile, Santiago, Chile.
- Trueman, R., Castro, R., Halim, A.** (2008). *Study of Multiple Draw-Zone Interaction in Block Caving Mines by means of a Large 3D Physical Model*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol 45, pp 1044-1051.
- Vargas, R.** (2010). *Metodología de diseño de malla de extracción en block y panel caving incorporando back-análisis*. Tesis para optar al grado de Magister en Minería. Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Vargas, R., Castro, R., De la Huerta, F.** (2012). *Determination of drawpoint spacing in panel caving: a case study at the El Teniente Mine*. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 112. pp 871- 876.
- Viera, E.** (2014). *Reporte de Instalación y Registro de Trazadores de Flujo Mina Esmeralda B-2*. Superintendencia de Gestión Producción, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, Codelco-Chile, División El Teniente.

- Viera, E. & Diez, E.** (2014). *Analysis of Hangup Frequency in Bloque 1-2, Esmeralda Sur Mine*. Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Viera, E., Montecino, M., Meléndez, M.** (2014). *First steps in monitoring gravity flow in el teniente mine: Installation stage in Block-2, Esmeralda mine*. Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Whiteman, D.** (2010). *Smart Marker system — A new tool for measuring underground ore body flow in block and sub-level mines*. Proceedings of the Second International Symposium on Block Caving and Sublevel Caving, Perth, Australia.
- Wimmer, M.** (2010). *Gravity flow of broken rock in sublevel caving (SLC) – State-of-the-art*. Swebrec - Swedish Blasting Research Centre, Luleå, Sweden.
- Whiteman, D.** (2011). *Smart Marker System – Reader User Manual*. Elexon Electronics Pty Ltd.
- Yenge, L.** (1981). *Analysis of Bulk Flow of Material Under Gravity Caving Process Part II*. Colorado School of Mines, Colorado, USA.

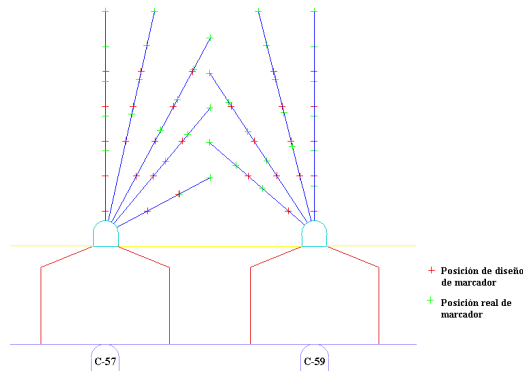
## **ANEXOS**

## ANEXO A

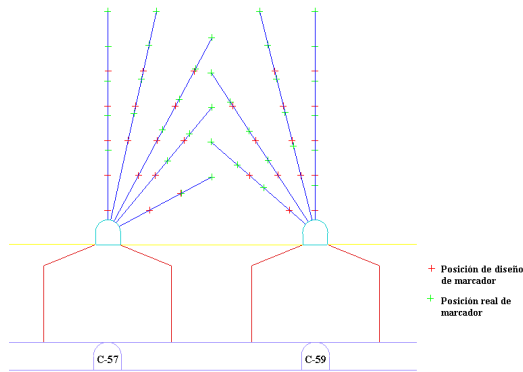
### DISEÑO EXPERIMENTAL Y OPERACIONAL DE LA PRUEBA DE TRAZABILIDAD



**Ilustración A-1** Diseño experimental (rojo) y operacional (verde) para la parada T1-C59.

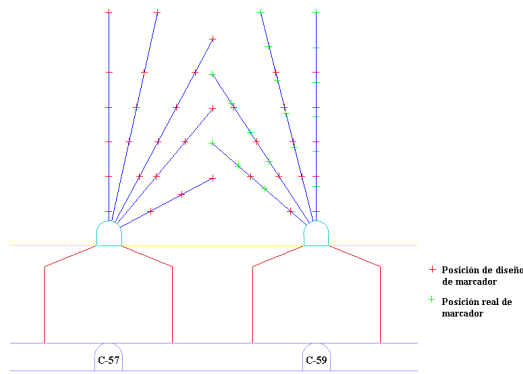


**Ilustración A-2** Diseño experimental (rojo) y operacional (verde) para la parada T1-C57 y parada T2-C59.

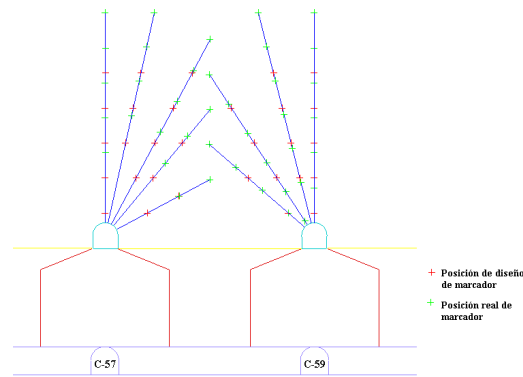


**Ilustración A-3** Diseño experimental (rojo) y operacional (verde) para la parada T2-C57 y parada T3-C59.

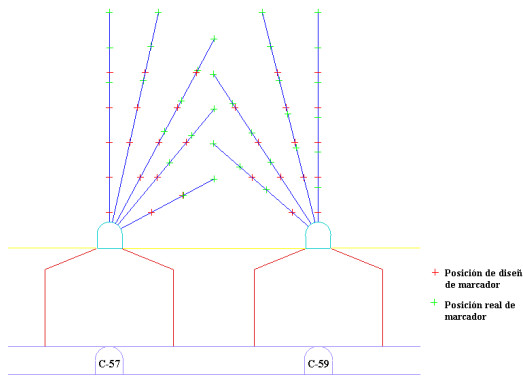




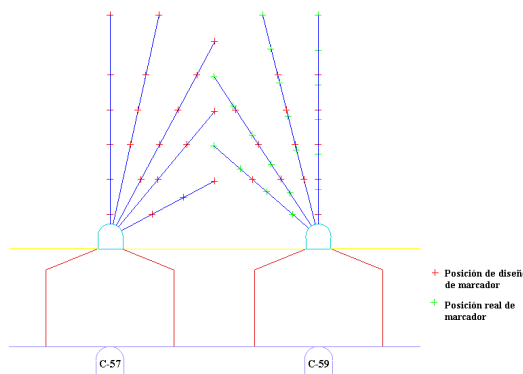
**Ilustración A-4** Diseño experimental (rojo) y operacional (verde) para la parada T4-C59.



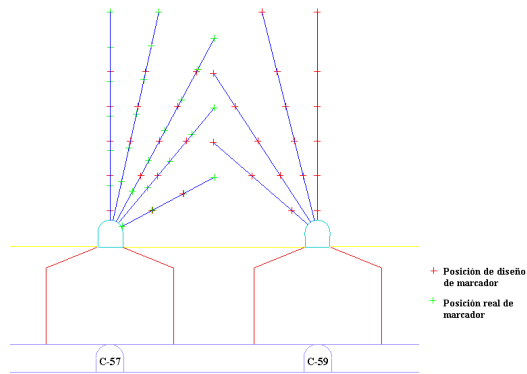
**Ilustración A-5** Diseño experimental (rojo) y operacional (verde) para la parada T4-C57 y parada T5-C59.



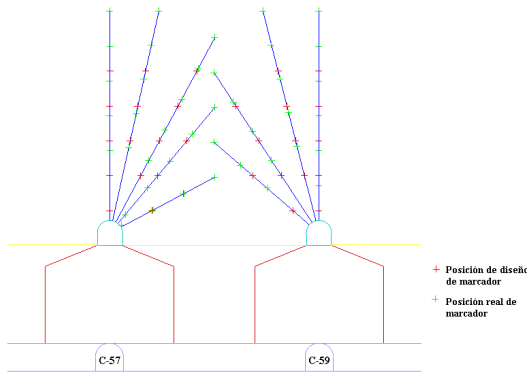
**Ilustración A-6** Diseño experimental (rojo) y operacional (verde) para la parada T5-C57 y parada T6-C59.



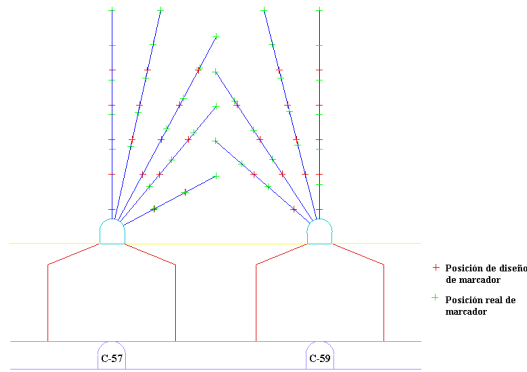
**Ilustración A-7** Diseño experimental (rojo) y operacional (verde) para la parada T7-C59.



**Ilustración A-8** Diseño experimental (rojo) y operacional (verde) para la parada T7-C57.



**Ilustración A-9** Diseño experimental (rojo) y operacional (verde) para la parada T8-C57 y parada T9-C59.



**Ilustración A-10** Diseño experimental (rojo) y operacional (verde) para la parada T9-C57 y parada T10-C59.

## **ANEXO B**

### **BASE DE DATOS PARA PROCESAMIENTO, ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LA ZONA DE EXTRACCIÓN EN CAMPO CERCANO**

Información contenida en el documento impreso.

## **ANEXO C**

### **RUTINA EN MATLAB PARA ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN MEDIANTE INTERPOLACIÓN LINEAL**

Información contenida en el documento impreso.

## ANEXO D

### ANÁLISIS DE INTERACCIÓN

#### C.1. ESTIMACIÓN ALTURA DE INTERACCIÓN Y ÁNGULO DE FLUJO DEL MATERIAL A TRAVÉS DEL PILAR MAYOR

La **Tabla D-1** entrega un resumen con los trazadores verticales recuperados, entregando la altura de interacción y ángulo de flujo estimado para la zona de extracción

**Tabla D-1** Trazadores recuperados desde perforaciones verticales de instalación sobre galerías de UCL.

Calle de Instalación	ID Marcador	Altura de interacción [m]	Ángulo de flujo [°]
C-59	225478	32	71
	226411	27	68
	224916	22	63
	225711	32	71
	224709	32	71
	224944	22	63
	224683	17	57
	225180	27	68
C-57	226113	22	63
	225302	32	71
	226101	37	74
	225790	17	57
	225299	22	63
<b>Promedio</b>		<b>26</b>	<b>67</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>6</b>	<b>5</b>

Asimismo, cabe mencionar que se recuperaron 5 trazadores por el punto 59 32F, y un trazador en el punto 59 31F (**Ilustración D-1**), complementando la hipótesis de interacción de la zona de extracción a través del pilar mayor.

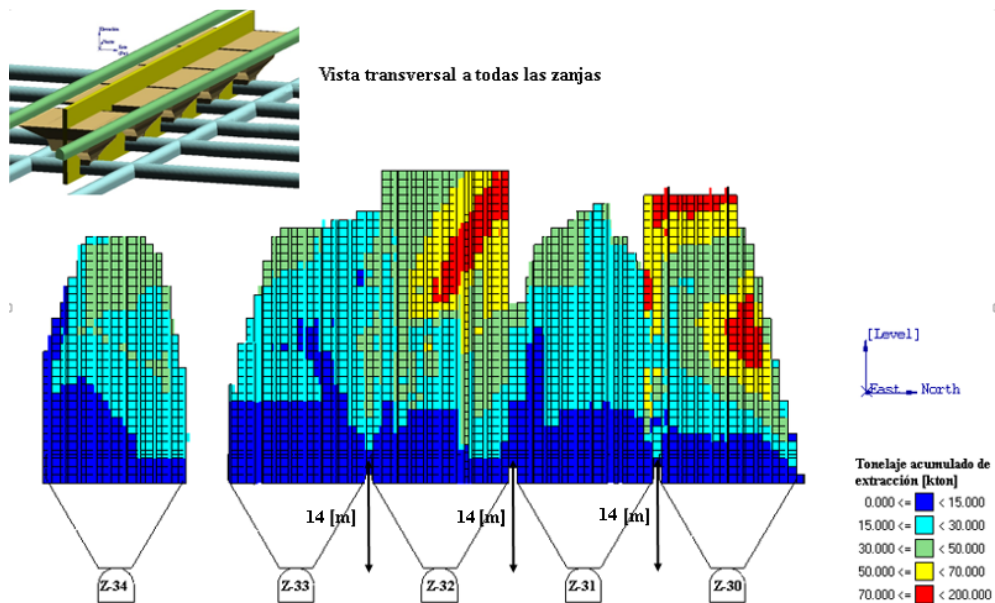


**Ilustración D-1** Recuperación de trazador en el punto de extracción 59 31F.

## D.2. ESTIMACIÓN ALTURA DE INTERACCIÓN A TRAVÉS DEL PILAR MENOR

Este análisis permite establecer la presencia de interacción sobre el pilar menor de todas las zanjas a través de un perfil transversal dentro de la zona de prueba, utilizando los resultados de la interpolación lineal de trazadores. Sobre esta base, la **Ilustración D-2** entrega la representación de la zona de extracción, visualizado por medio del software *Vulcan*.

Así, se puede observar que existen indicios experimentales de interacción entre las zonas de extracción de la zanja Z-30 a Z-33, alcanzando una altura de 14 [m] desde el techo del nivel de producción. Del mismo modo, se infiere que no es posible concluir aún sobre interacción entre la zanja Z-33 y zanja Z-34.



**Ilustración D-2** Análisis de la interacción sobre el pilar menor en el sector de prueba. Vista transversal a todas las zanja.