



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

# **ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DEL CAVING Y MODELAMIENTO MEDIANTE FLOWSIM BC**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

DIEGO ABDÓN GUZMÁN CARO

PROFESOR GUÍA:

ALVARO ALTAMIRANO CÓNDOR

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RAÚL CASTRO RUÍZ

MARIA ELENA VALENCIA VERA

SANTIAGO DE CHILE

2018

## Resumen

El éxito de una operación de Block/Panel Caving depende de las decisiones que se toman durante la planificación minera, durante la fase de ramp up se ponen a prueba los planes de extracción con desafíos asociados a mantener y gestionar la seguridad operacional, controlar la sismicidad, riesgos de air blast y estallidos de roca, todos los desafíos anteriores tienen en común el fenómeno de propagación de caving, cuya trayectoria de crecimiento define si el material disponible para ser extraído será dilución o mineral.

El estudio de la propagación de caving en este trabajo se dividió en tres etapas comenzando por el estado del arte y los antecedentes de los casos de estudio, luego el análisis de las variables operacionales que influyen en la manera de propagación del caving y finalmente la incorporación del cave back en FlowSim BC a través del mecanismo de Cave Shape el cual define la interfaz del cave back periodo a periodo.

Con respecto a los antecedentes de estudio se presentan los conceptos y fundamentos detrás del caving, identificando aquellas variables que son controlables a nivel operacional tal como la extracción y el pre-acondicionamiento (PA). Con respecto a los casos de estudio ambos corresponden a dos bloques adyacentes desfasados 194 m en cota, tienen en común ser yacimientos muy grandes y profundos llegando a alturas de columna extraíble de hasta 1000 m para el CASO 1 y una altura de columna de 750 m para el CASO 2, utilizando PA intensivo y PA con fracturamiento hidráulico (FH) respectivamente.

Una vez que la socavación inicial ha comenzado, la única variable operacional que controla la propagación del caving es la extracción. Se realizó un análisis comparando la altura de cave back (HCB) con la altura de extracción (HOD) en ambos casos de estudio. Como regla general para ambos casos se cumple que a mayor HCB la altura de extracción equivalente aumenta manteniendo la razón  $HCB : HOD = 8:1$ , lo que corresponde a una razón mayor a lo establecido de forma empírica por Codelco cuando existe aplicación de PA ( $HCB : HOD = 5 : 1$ ), dicha razón se debe a que existen puntos de extracción en donde el caving propaga mucho más rápido alcanzando razones de  $HCB : HOD = 12:1$ , esto se explica por la presencia de estructuras y fallas dominantes en el CASO 1, y producto de la interacción entre cavidad adyacente explotada previamente para el CASO 2. Por otro lado, existen puntos de extracción ubicados en el entorno del área de mayor propagación en donde es factible estimar la altura del cave back como un factor de 4.5 veces la altura de extracción. Se completa el estudio con un análisis de extracción en términos de leyes y trazadores para ambos casos a fin de comprender el comportamiento a nivel de flujo gravitacional.

La última fase fue incorporar un nuevo mecanismo que represente el cave back en el simulador FlowSim BC, se simulan ambos casos de estudios y se observa una mejora en las estimaciones en términos de leyes y trazadores gracias al cave back. Se finaliza esta etapa mencionando las nuevas capacidades que se podrían implementar a FlowSim BC gracias a la incorporación del Cave Shape, tales como el cambio de porosidad en función de la fragmentación, control del volumen de air gap y cambios de la topografía, proponiendo los algoritmos que se debiesen seguir para el desarrollo futuro.

## Abstract

The success of a Block / Panel Caving operation depends on the decisions that are made during the mining planning, during the ramp up phase the extraction plans are tested with challenges associated with maintaining and managing safety, controlling the seismicity, air blast risks and rock bursts, all the above challenges have in common the caving propagation phenomenon, whose growth trajectory defines if the material available to be extracted will be dilution or mineral.

The study of the caving propagation in this work was divided into three stages starting with the state of the art and the background of the case studies, then the analysis of the operational variables that influence the way of propagation of the caving and finally the incorporation of the cave back in FlowSim BC through the Cave Shape mechanism which defines the cave back interface period by period.

With respect to the background of the study, the concepts and fundamentals behind the caving are presented, identifying those variables that are controllable at the operational level, such as extraction and pre-conditioning (PA). With respect to the case studies both correspond to two adjacent blocks out of phase 194 m in height, they have in common to be very large and deep deposits reaching heights of extractable column of up to 1000 m for CASE 1 and a column height of 750 m for CASE 2, using intensive PA and PA with hydraulic fracturing (FH) respectively.

Once the initial undercut has begun, the only operational variable that controls the propagation of the caving is the draw. An analysis was made comparing the height of the cave back (HCB) with the height of draw (HOD) in both cases of study. As a general rule for both cases it is fulfilled that at higher HCB the equivalent draw height increases maintaining the ratio  $HCB: HOD = 8: 1$ , which corresponds to a higher reason than established empirically by Codelco when there is application of PA ( $HCB: HOD = 5: 1$ ), this reason is due to the existence of drawpoints where the caving propagates much faster reaching ratios such as  $HCB : HOD = 12: 1$ , this is explained by the presence of dominant structures and faults in CASE 1, and product of the interaction between adjacent cavity exploited previously for CASE 2. On the other hand, there are drawpoints located in the area of greatest propagation where it is feasible to estimate the height of the cave back as a factor of 4.5 times the height of draw. The study is completed with an extraction analysis in terms of laws and tracers for both cases in order to understand the behaviour at gravitational flow level.

The last phase was to incorporate a new mechanism that represents the cave back in the FlowSim BC simulator, both cases were simulated, and it was observed an improvement in the estimations in terms of laws and tracers due to cave back. This stage was completed mentioning the new capabilities that could be implemented to FlowSim BC thanks to the incorporation of the Cave Shape, such as the change of porosity according to the fragmentation, control of the air gap volume and changes of the topography, proposing the algorithms that should be followed for future development.

## Agradecimientos

*Si he llegado a escribir estas palabras ha sido gracias al apoyo incondicional que me han entregado mis padres Sergio Guzmán y Fabiola Caro. Incontables han sido las veces que sentí que no era capaz, que esto no era para mí, sin embargo, nunca me faltó esa sonrisa, ese abrazo, esas palabras que me decían, “Vamos Diego, tú puedes”, “Hijo, acá estaremos contigo, pase lo que pase te apoyaremos”, “Vamos hijo, inténtalo otra vez” ..... Mamá, Papá este logro es de ustedes.*

*Este trabajo va con dedicatoria a mis padres, y a mi hermana Renata, por ser una de mis inspiraciones de cada día, a mi Tata y Mama por todo el amor que me entregan cada vez que voy a visitarlos, a mis primos y tíos por todos los buenos momentos juntos. Los quiero mucho.*

*Agradezco a mi profesor guía Raúl Castro por confiarme el tema, por las oportunidades que me ha dado para crecer como profesional, por su escuela y exigencia que no hacen más que formar Ingenieros con mayores capacidades, a mi profesor Co-Guía Alvaro Altamirano por el apoyo en todo el trabajo realizado, a María Elena Valencia por aceptar ser mi profesora Integrante, leer esta memoria con paciencia y rigurosidad, y además por permitirme aprender de su conocimiento y experiencia, finalmente a Pablo Álvarez por su disposición en leer este trabajo y entregarme sus comentarios y recomendaciones.*

*Termina este largo camino y quiero dedicar tiempo en agradecer a todas las personas que de alguna u otra forma me acompañaron en este proceso, tanto en plan común como en minería, haciendo mención particular a Renan, Kike, Manu, Isidora, Javier, Tixi, Lucho, Fabián, Diego (Papu), Nachito, Chalo, Cere, Jupu, Sebita y todos los profesores de la carrera. Además, aquellas personas que entregaron su apoyo cuando sufría con algunos ramos haciendo mi vida universitaria más amena: Francisca, Carhú, Sunny y muchos amigos y amigas de Livinn.*

*Agradezco finalmente a mis compañeros de BCLAB y BCTEC que tanto me han enseñado: Mena, Lenin, Seba, Pancho, Fabián, Álvaro Pérez, D. Garcés, Yina, a Vanessa por su paciencia en enseñarme todo lo que sé de FlowSim, a Alvaro Altamirano por su rigurosidad y pasión al trabajar, Juan Pablo Henríquez por siempre estar disponible para ayudarme cuando lo necesitaba y a Pablo Álvarez por compartir su experiencia y recalcarme la importancia del trabajo en equipo y el desarrollo de la personalidad.*

*¡Muchas Gracias!*

# Tabla de Contenido

<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivos .....	1
1.1.1. Generales.....	1
1.1.2. Específicos .....	2
1.2. Alcances .....	2
1.3. Justificación del trabajo.....	3
1.4. Metodología .....	4
1.5. Contenido de la Tesis .....	6
<b>CAPÍTULO II</b> .....	7
2. ANTECEDENTES TEÓRICOS .....	7
2.1. Método de explotación por Block/Panel Caving.....	7
2.2. Mecánica del caving: Iniciación y Propagación.....	8
2.3. Relación entre tasa de quiebre y tasa de extracción .....	11
2.4. Preacondicionamiento (PA) .....	13
2.5. ¿Cómo se mide la posición del cave back? .....	17
2.6. FlowSim BC.....	19
2.6.1. Diámetro de la zona de extracción .....	21
2.6.2. Migración de finos .....	23
2.6.3. Flujo preferencial .....	24
2.6.4. Mezcla de finos y gruesos .....	25
2.7. Casos de estudio.....	27
2.8. Conclusiones .....	28
<b>CAPÍTULO III</b> .....	30
3. ANÁLISIS VARIABLES OPERACIONALES QUE INFLUYEN EN LA PROPAGACIÓN .....	30
3.1. Altura del cave back (HCB) vs altura de extracción (HOD).....	30
3.1.1. HCB vs HOD CASO 1 .....	31
3.1.2. HCB vs HOD CASO 2.....	35
3.2. Análisis de extracción casos de estudio .....	38
3.2.1. Trazadores de campo cercano CASO 1.....	38
3.2.2. Trazadores de campo lejano CASO 1 .....	40
3.2.3. Trazadores CASO 2 .....	42
3.2.4. Leyes in situ CASO 1 .....	43
3.2.5. Leyes in situ CASO 2.....	46
3.3. Conclusiones .....	49

<b>CAPÍTULO IV</b> .....	51
4. SIMULACIONES EN FLOWSIM BC .....	51
4.1. Implementación del mecanismo de cave shape.....	51
4.2. Simulación de Smart Markers en FlowSim BC v5.0 .....	53
4.2.1. Análisis de Smart markers CASO 1 .....	53
4.2.2. Análisis de Smart markers CASO 2.....	55
4.3. Comprobación desplazamiento de trazadores .....	56
4.3.1. Movimiento horizontal de trazadores CASO 1 .....	57
4.3.2. Movimiento horizontal de trazadores CASO 2 .....	57
4.4. Comparación con leyes medidas en los puntos de extracción.....	58
4.4.1. Comparación con REBOP.....	58
4.4.2. Simulación leyes CASO 1 .....	61
4.4.3. Simulación leyes CASO 2.....	62
4.5. Conclusiones .....	64
<b>CAPÍTULO V</b> .....	65
5. PROPUESTAS DE MEJORAS .....	65
5.1. Porosidad.....	65
5.2. Control de air gap.....	67
5.3. Cambios de topografía .....	68
5.4. Limitaciones del mecanismo Cave Back en FlowSim BC.....	70
5.5. Conclusiones .....	70
<b>CAPÍTULO VI</b> .....	71
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
6.1. Conclusiones .....	71
6.2. Recomendaciones.....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73

## Índice de Figuras

Figura N° 1. Esquema que resume la importancia de la propagación del caving .....	4
Figura N° 2. Esquema de la metodología implementada en esta trabajo. ....	5
Figura N° 3. Izquierda, representación del método de Panel Caving (Karzulovic 2001). Derecha, representación del método de Block caving (Atlas Copco 2007) .....	8
Figura N° 4. Gráfico de estabilidad presentado por Flores y Karzulovic (2003) para calcular el RH requerido en la iniciación del caving en función de la clasificación del macizo rocoso. ....	8
Figura N° 5. Distinción de las zonas generadas durante la propagación del caving Duplancic and Brady (1999). Brown (2003). ....	9
Figura N° 6. Evolución de la propagación del caving, desde el inicio de la socavación hasta la conexión en superficie y posterior subsidencia. (Vargas, 2017). ....	11
Figura N° 7. Sección vertical a través de una columna de extracción en la que se muestra (A) Pila llena de material quebrado, (B) Formación de un “air gap” por la extracción, (C) Relleno del air gap debido al esponjamiento del nuevo material quebrado. (Brown, 2003). ....	12
Figura N° 8. Velocidad de extracción en función de la tasa de quiebre del macizo rocoso para distintos factores de esponjamiento. (Guzmán, 2018) .....	13
Figura N° 9. Esquema de la técnica de FH, mostrando el plano preferencial de ruptura. (CODELCO, 2010). ....	14
Figura N° 10. Esquema de la técnica DDE y el efecto en el pozo de tronadura. (CODELCO, 2010). ....	14
Figura N° 11. Razón entre la altura de extracción versus la altura de quiebre. En la izquierda la dicha razón se estima en torno a 3 sin la aplicación del PA, por otro lado a la derecha se muestra que la altura de quiebre aumentaría hasta llegar a una razón de 5 producto del debilitamiento del macizo provocado por el PA. (CODELCO, 2010). ....	15
Figura N° 12. Recopilación de las tasas de propagación en minería subterránea en función de la calidad de la roca a partir de la curva de Laubscher (1994) sin PA. (Guzmán, 2018). ....	16
Figura N° 13. Esquema del monitoreo de cave back utilizando Smart Markers. ....	19
Figura N° 14. Una vista esquemática de los bloques del barrio y el movimiento ascendente de la celda vacía. (A) Antes de la extracción; (B) después de la extracción. ....	21
Figura N° 15. Configuración experimental construida para caracterizar material granular fino (Sánchez, 2017). ....	22
Figura N° 16. IEZ simulado en FlowSim variando el parámetro de flujo “n” .....	23
Figura N° 17. Montaje experimental para el estudio de la migración de finos (Arancibia, 2018). ....	23
Figura N° 18. Comparación entre el resultado experimental en el modelo físico y la simulación en FlowSim BC en términos de entrada porcentual de dilución y finos extraídos. ....	24
Figura N° 19. Vista de perfil que muestra la propagación inclinada del caving. ....	24
Figura N° 20. Calibración de FlowSim para el flujo preferencial, emulando la inclinación y el área donde ocurrió el hundimiento. ....	25
Figura N° 21. Efecto d la presencia de finos y carga vertical en condiciones de flujo. ....	25
Figura N° 22. Influencia de finos para cambiar el comportamiento del flujo. ....	26
Figura N° 23. Vista isométrica del CASO 1 Y CASO 2. (Lett et al, 2016). ....	27
Figura N° 24. Izquierdo, Layout del nivel de producción para CASO 1. Derecho, Layout del nivel de producción para el CASO 2. ....	28
Figura N° 25. (A) Cave shapes como input en formato dxf. (B) Vista isométrica del software Sketch Up para trazar las líneas de cada punto de extracción hasta su intersección con el cave back a modo de definir la HCB. ....	30
Figura N° 26. Relación entre HCB y HOD para todos los puntos del CASO 1. ....	31
Figura N° 27. Evolución de la propagación del cave back para 8 periodos donde se tienen mediciones de cave back para el CASO 1. ....	32

Figura N° 28. Evolución de la zona con los puntos de extracción cuya proyección de cave back propaga más rápido. ....	33
Figura N° 29. Izquierda, Razón HCB:HOD para aquellos puntos bajo la zona de mayor propagación. Derecha, muestra el comportamiento de la extracción a medida que aumenta la altura del cave back para el CASO 1.....	34
Figura N° 30. Izquierda, Razón HCB:HOD para aquellos puntos fuera de la zona de mayor propagación. Derecha, muestra el comportamiento de la extracción a medida que aumenta la altura del cave back para el CASO 1.....	34
Figura N° 31. Relación entre HCB y HOD para todos los puntos del CASO 2.....	35
Figura N° 32. Evolución de la propagación del cave back para 8 periodos donde se tienen mediciones de cave back para el CASO 2.....	36
Figura N° 33. Evolución de la zona con los puntos de extracción cuya proyección de cave back propaga más rápido. ....	37
Figura N° 34. Izquierda, Razón HCB:HOD para aquellos puntos bajo la zona de mayor propagación. Derecha, muestra el comportamiento de la extracción a medida que aumenta la altura del cave back para el CASO 2.....	37
Figura N° 35. Izquierda, Razón HCB:HOD para aquellos puntos fuera de la zona de mayor propagación. Derecha, muestra el comportamiento de la extracción a medida que aumenta la altura del cave back para el CASO 2.....	38
Figura N° 36. Vista isométrica de la instalación de trazadores de campo cercano CASO 1. ....	39
Figura N° 37. Gráfico de dispersión entre la altura de instalación de los trazadores vs la altura de extracción en la cual fueron extraídos para el campo cercano. ....	40
Figura N° 38. Instalación de marcadores de campo lejano para el CASO 1.....	40
Figura N° 39. Gráfico de dispersión entre la altura de instalación de los trazadores vs la altura de extracción en la cual fueron extraídos para el campo lejano. ....	41
Figura N° 40. Vista en planta de la posición de donde los trazadores de campo lejano fueron instalados y los puntos por donde fueron recuperados.....	41
Figura N° 41. Vista lateral con la instalación de los marcadores de campo lejano para del CASO 2.....	42
Figura N° 42. Gráfico de dispersión entre la altura de instalación de los trazadores vs la altura de extracción en la cual fueron extraídos para el campo lejano. ....	42
Figura N° 43. Vista en planta de la posición de donde los trazadores de campo lejano fueron instalados y los puntos por donde fueron recuperados.....	43
Figura N° 44. Vista de perfil Este-Oeste de las leyes de Au para el CASO 1. ....	44
Figura N° 45. Vista de perfil Norte-Sur de las leyes de Au para el CASO 1.....	44
Figura N° 46. Vista de perfil Este-Oeste de las leyes de Cu para el CASO 1.....	45
Figura N° 47. Vista de perfil Norte-Sur de las leyes de Cu para el CASO 1.....	45
Figura N° 48. Evolución de las leyes de Au y Cu en altura sobre el layout del CASO 1. ....	46
Figura N° 49. Vista de perfil Norte-Sur de las leyes de Cu para el CASO 2.....	47
Figura N° 50. Vista de perfil Este-Oeste de las leyes de Cu para el CASO 2.....	47
Figura N° 51. Vista de perfil Norte-Sur de las leyes de Au para el CASO 2.....	48
Figura N° 52. Vista de perfil Este-Oeste de las leyes de Au para el CASO 2. ....	48
Figura N° 53. Evolución de las leyes de Au y Cu en altura sobre el layout del CASO 2.....	49
Figura N° 54. Diagrama que explica el nuevo algoritmo de cave back. ....	52
Figura N° 55. Esquema conceptual de Rilling o derrame superficial. ....	52
Figura N° 56. Representación de los nuevos estados generados por FlowSim BC (Rojo son bloques granulares, verdes, bloques sólidos que no fluyen y azul son vacíos). ....	53
Figura N° 57. Gráfico de dispersión entre el tonelaje real al cual los trazadores de campo cercano son recuperados vs el tonelaje simulado por FlowSim. ....	53
Figura N° 58. Cambio de fragmentación para el CASO 1 una vez que el cave back conecta en superficie. ....	54



Figura N° 59. Gráfico de dispersión entre el tonelaje real al cual los trazadores de campo lejano son recuperados vs el tonelaje simulado por FlowSim. ....	55
Figura N° 60. Gráficos de dispersión entre el tonelaje real al cual los trazadores de campo lejano son recuperados vs el tonelaje simulado por FlowSim. ....	55
Figura N° 61. Estudio de la fragmentación para el CASO 2.....	56
Figura N° 62. Esquema para identificar el movimiento horizontal de los trazadores. ....	56
Figura N° 63. Comparación entre el desplazamiento de trazadores recuperados de campo lejano para el CASO 1 con/sin el mecanismo de Cave back y Rilling interno. ....	57
Figura N° 64. Comparación entre el desplazamiento de trazadores recuperados de campo lejano para el CASO 2 con/sin el mecanismo de Cave back y Rilling interno. ....	58
Figura N° 65. Puntos de extracción del CASO 1 donde se hicieron mediciones de las leyes de Cu y Au. ....	61
Figura N° 66. Comparación entre la ley simulada de Au en FlowSim, REBOP, y las leyes medidas. ....	61
Figura N° 67. Comparación entre la ley simulada de Cu en FlowSim, REBOP, y las leyes medidas. ....	62
Figura N° 68. Puntos de extracción del CASO 2-West donde se hicieron mediciones de las leyes de Cu y Au. ....	63
Figura N° 69. Comparación entre la ley simulada de Au en FlowSim, REBOP, y las leyes medidas. ....	63
Figura N° 70. Comparación entre la ley simulada de Cu en FlowSim, REBOP, y las leyes medidas. ....	64
Figura N° 71. Volumen de la pila de material en función de la porosidad, variable que está controlada por el parámetro Cv en FlowSim.....	66
Figura N° 72. Izquierda, Variación de la porosidad en función del parámetro Cv. Derecha, Variación de la densidad aparente en función de Cv. ....	66
Figura N° 73. Diagrama de la metodología para la calibración y estimación de la porosidad....	67
Figura N° 74. Variación del volumen de air gap en función del parámetro Cv. ....	68
Figura N° 75. Cambio en la topografía debido a la conexión del cave back en superficie. ....	69
Figura N° 76. Diagrama de metodología para estimar el cambio de topografía por periodo de extracción. ....	69

## Índice de Tablas

Tabla N° 1 Parámetros de la zona de flujo para rocas fragmentadas finas obtenidas a partir de datos experimentales (valores escalados).....	22
Tabla N° 2. Resumen de los parámetros principales para la calibración de FlowSim y su significado físico. ....	26
Tabla N° 3. Altura de cave back y relación HCB : HOD para cada periodo donde existe una medición para el CASO 1.....	32
Tabla N° 4. Altura de cave back y relación HCB : HOD para cada periodo donde existe una medición para el CASO 2.....	36
Tabla N° 5. Comparación entre el movimiento de trazadores entre FlowSim con y sin los nuevos mecanismos para el CASO 1. ....	57
Tabla N° 6. Comparación entre el movimiento de trazadores entre FlowSim con y sin los nuevos mecanismos para el CASO 2. ....	58
Tabla N° 7. Comparación entre FlowSim BC y REBOP.....	59
Tabla N° 8. Comparación en términos de error y tiempos de simulación.....	62
Tabla N° 9. Comparación en términos de error y tiempos de simulación.....	64

## Índice de Ecuaciones

Ecuación N° 1. Altura de la pila en función de la altura de cave back, altura extraída (HOD) y razón de vacíos. ....	12
Ecuación N° 2. Altura de extracción (HOD) en función del tonelaje acumulado extraído y área unitaria o bien en función de la velocidad de extracción, densidad sólida y el tiempo. ....	12
Ecuación N° 3. Altura de cave back en función de la tasa de quiebre vertical y el tiempo. ....	12
Ecuación N° 4. Relación entre la altura de cave back y altura de extracción asociada a la condición para la formación de air gap sobre la pila. ....	12
Ecuación N° 5. Función de probabilidad o transición. ....	20
Ecuación N° 6. Relación para calcular la porosidad de la pila de material quebrado. ....	66
Ecuación N° 7. Densidad aparente del material quebrado. ....	66

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

En minería de hundimiento la planificación cumple un rol fundamental en la toma de decisiones con el objetivo principal de recuperar las reservas y establecer la capacidad productiva de la mina. Durante la fase de ramp up una mayor producción afectará positivamente el valor del negocio (A. Ovalle, 2015), por lo tanto, la planificación debe estar apoyada en estrategias de extracción de modo que la tasa de quiebre sea mayor a la velocidad máxima de extracción.

Una de las variables que definen el éxito de la fase del ramp up en operaciones de block/panel caving es la propagación del cave back o etapa de quiebre, durante esta etapa se ponen a prueba los planes de extracción con desafíos asociados a mantener y gestionar la seguridad operacional, controlar la sismicidad, riesgos de air blast y estallidos de roca, además la trayectoria de la propagación definirá que material estará disponible para ser extraído, es decir, puede controlar la entrada de dilución.

La eficiencia del método de block/panel caving depende de la gravedad para quebrar y mover grandes cantidades de material hasta los puntos de extracción, dicho proceso se conoce como flujo gravitacional. Una vez que la socavación inicial ha comenzado, la única variable operacional que controla la propagación del cave back es la extracción. A medida que más de material es extraído el caving propaga hasta que todo el material se hunde generando subsidencia en superficie, así se concluye la etapa de quiebre pasando a la fase régimen en donde la extracción comienza a estar limitada por variables operacionales de manejo de materiales y sistemas de extracción.

En este trabajo se estudia la propagación del caving en dos casos explotados por Panel Caving, en ambos la altura de columna supera los 400 m, además se aplican distintas técnicas de PA (DDE + FH para el CASO 1 y FH para el CASO 2). A partir de este estudio es que surge la necesidad de medir, y simular el comportamiento del cave back para complementar la planificación minera. Se finaliza el estudio con la incorporación del mecanismo de cave shape a la herramienta FlowSim BC, en la cual se realiza un análisis de extracción para ambos casos validando así la importancia de representar la propagación de caving en simuladores de flujo gravitacional.

### 1.1. Objetivos

#### 1.1.1. Generales

Analizar las variables operacionales que influyen en el modo de propagación del caving y representarlas través de modelos estocásticos basados en el flujo gravitacional.

### 1.1.2. Específicos

- Comprender los mecanismos que explican el proceso de caving y flujo gravitacional.
- Analizar la relación entre la altura del cave back (HCB) y la altura extraída (HOD).
- Comprender la aplicación del pre-acondicionamiento (PA) en sus variantes de debilitamiento dinámico con explosivos (DDE) o fracturamiento hidráulico (FH).
- Concluir sobre la influencia del PA en la propagación del caving.
- Comprender los fundamentos y mecanismos del software FlowSim BC.
- Implementar los mecanismo de Cave shape y Rilling interno a la herramienta de flujo gravitacional FlowSim BC.
- Comprobar el funcionamiento del nuevo mecanismo implementado en base a los datos de los casos de estudio.
- Reconocer los nuevos potenciales de FlowSim BC generados por la implementación del cave back.

## 1.2. Alcances

Debido a las nuevas normas legales de la compañía minera a cargo de las operaciones que son analizadas en este trabajo, se omiten tanto los nombres de cada caso de estudio, nombres de puntos de extracción, así como los valores reales de leyes de Cu y Au.

La implementación del mecanismo Cave shape y Rilling interno en FlowSim BC fue realizada a nivel de propuesta y algoritmo por el autor de este trabajo y a nivel de desarrollo con el apoyo de un experto en computación del lenguaje C++.

El objetivo de esta memoria no es predecir el modo de propagación del caving, sino estudiar y analizar las variables que necesitan ser incorporadas en la herramienta de flujo gravitacional FlowSim BC para lograr predecir la forma y velocidad de propagación.

La simulación a escala mina de FlowSim BC se realiza utilizando la información de dos casos de estudio, el objetivo es probar que el simulador funciona de manera correcta con la implementación del Cave shape y Rilling interno con un volumen de datos real a nivel industrial, y que al incorporar dichos mecanismos se obtienen resultados más certeros y realistas que apoyan la planificación minera.

El nuevo mecanismo solo puede ser aplicado cuando existe información sobre la posición del cave back, es decir, en aquellas operaciones donde se ha buscado interpretar tanto la ubicación como la forma en la que propaga el caving en determinados periodos. Sin embargo, se deben considerar los errores asociado a dichas mediciones, ya que están basados en nuevos sistemas de instrumentación a partir de los cuales solo se obtiene una posición estimada del cave back.

Solo se ha estudiado la propagación en casos cuyas alturas de columnas superan los 400m y además en ambos casos se han aplicado distintas técnicas de pre-acondicionamiento. Quedando pendiente analizar y estudiar la propagación en operaciones con menores alturas de columna o bien en operaciones donde no se ha aplicado PA.

Debido al tamaño de las simulaciones no se realizaron un número significativo de réplicas por las limitaciones en términos de potencia de equipo (tiempos de simulación).

De todas las variables que influyen en la propagación del caving, este trabajo se enfoca en aquellas que son operacionales, es decir, la extracción y el grado de PA aplicado, dejando fuera del estudio influencia de las estructuras (fallas) presentes en el macizo rocoso.

Se busca modelar el caving utilizando modelos estocásticos de flujo gravitacional, no se consideran los esfuerzos actuando en el cave back, así como tampoco se requieren los parámetros elásticos de la roca, como el módulo de Young, coeficientes de Poisson, etc.

Se realiza una comparación de resultados con el software REBOP, el cual también tiene la capacidad de simular la propagación de caving, sin embargo, la comparación se realiza en términos de extracción solo a nivel de leyes de Cu y Au, dejando fuera de la comparación los trazadores/marcadores recuperados.

El algoritmo de porosidad, medición de air gap y topografía se presentan sólo como propuestas para una posterior implementación real en FlowSim BC. Por lo tanto, no se ha generado la escritura del código en C++.

### 1.3. Justificación del trabajo

La planificación en minería de hundimiento busca maximizar el valor del negocio y lo hace en función de reglas de mezclas basadas en la metodología de Laubscher, sin embargo, esta presenta ciertas limitaciones tales como no considerar cambios de fragmentación en la columna, no representar la mezcla o dilución lateral, solo considera mezcla vertical, no considerar la variación del PED en el tiempo, ni flujo gravitacional, sumado a lo anterior, la minería subterránea debe superar los desafíos que imponen yacimientos más profundos, con menores leyes, macizos más competentes y condiciones de esfuerzos altos. Por lo tanto, es cuestionable si la planificación actual considera las variables asociadas a los mecanismos de hundimiento.

Surge la necesidad de complementar la planificación con mecanismos de caving que permitan representar los fenómenos que ocurren en la realidad, uno de ellos es la propagación del caving. Estudiar las variables que definen la forma en la que propaga el caving durante la fase de quiebre es importante para establecer la producción que se puede alcanzar en la etapa de ramp up y gestionar aspectos de seguridad interior mina.

En términos de dilución, los modelos existentes han sido construidos sin la consideración de parámetros que definen la entrada y el comportamiento del material diluyente, tales como la propagación del caving o la disposición espacial de la dilución con respecto a un

bloque previo a ser explotado (P. Paredes, 2012). Esto hace, que hoy en día la principal herramienta de control de dilución en las minas explotadas por block o panel caving sea la medición de la uniformidad con que se lleva a cabo la extracción, la cual resulta insuficiente por sí sola cuando el control de tiraje es una de las variables que dominan la entrada de la dilución. Debido a esto, y a la importancia que tiene para el negocio minero el control de la dilución, resulta relevante tomar en cuenta la propagación de caving siendo una variable que no ha sido anteriormente considerada.

La Figura N° 1, muestra un esquema resumen de lo explicado anteriormente, destacando la importancia que tiene la propagación del caving en los primeros periodos de una operación por block/panel caving. Por esto, se hace fundamental incorporar la instrumentación necesaria para medir o interpretar la posición del cave back (ya sean, TDR; extensómetros o Smart Markers), con esta información es posible analizar aquellas variables que son críticas durante la propagación del caving, y posteriormente establecer relaciones para estimar o predecir la manera en que propagará el caving bajo las condiciones específicas de cada operación.

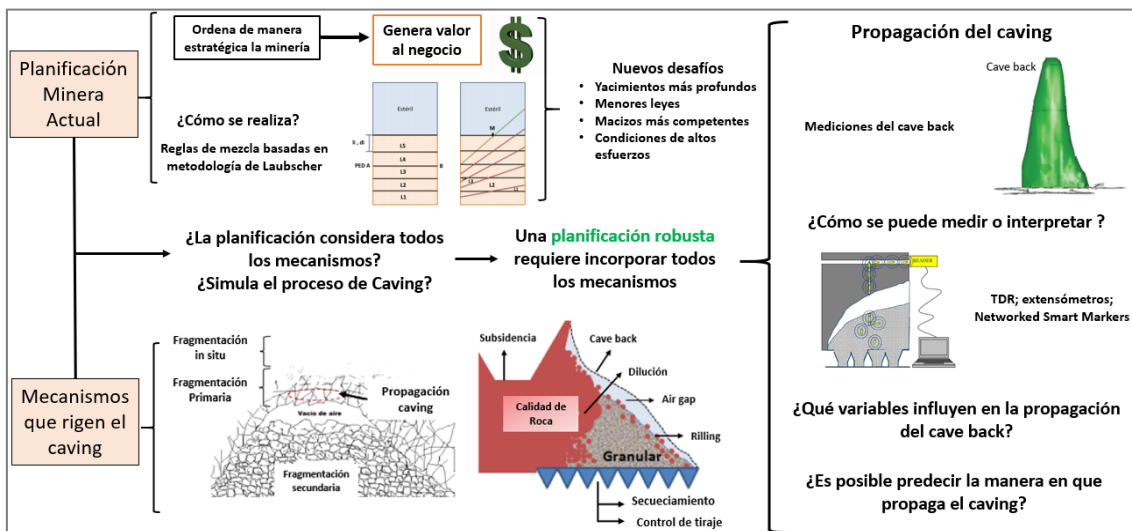


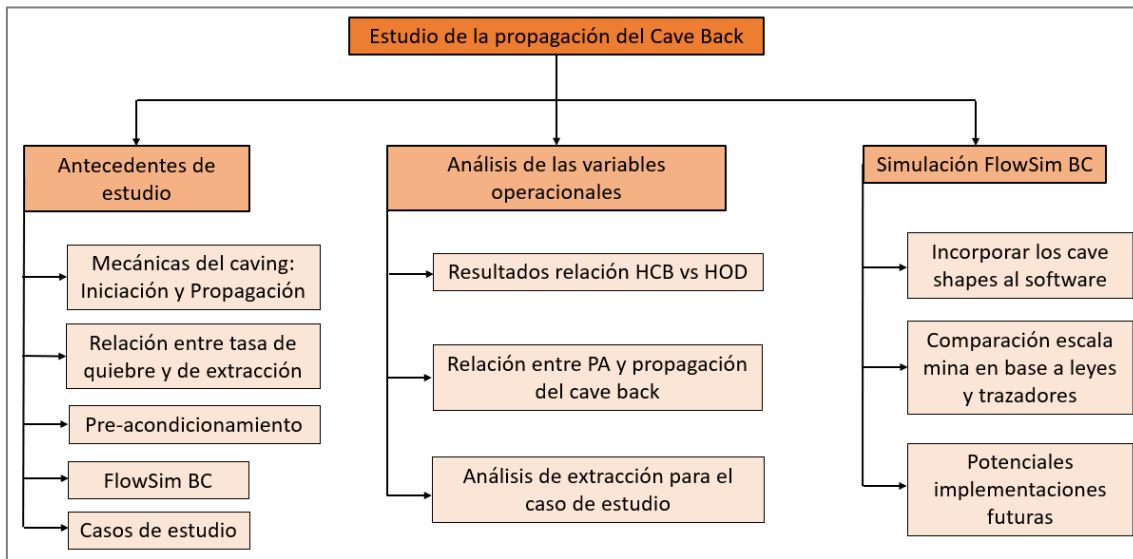
Figura N° 1. Esquema que resume la importancia de la propagación del caving

El estudio se complementa con el software de flujo gravitacional FlowSim BC el cual ha sido testado y usado en la planificación minera. En primer lugar se incorpora la variable de Cave Shape y Rilling interno al simulador, para luego compararlo con datos mina y al mismo tiempo compararlo con otros simuladores de planificación que actualmente ya incorporan esta variable como es REBOP, una herramienta que se basa en la generación y actualización de zonas de movimiento a través de ecuaciones de balance de masa el cual ha sido desarrollado por Itasca en el contexto del International Caving Study (ICS) y posteriormente el Mass Mining Technology Project (MMT) (P. Paredes, 2012).

#### 1.4. Metodología

La metodología de trabajo realizada para el estudio de la propagación de caving se dividió en tres etapas comenzando por el estado del arte y los antecedentes de estudio, luego el análisis de las variables operacionales que influyen en la manera de propagación del

caving y finalmente las simulaciones en FlowSim BC. La Figura N° 2 muestra el esquema de la metodología implementada para el estudio de la propagación del cave back.



**Figura N° 2. Esquema de la metodología implementada en este trabajo.**

Con respecto a los antecedentes de estudio se revisaron los conceptos y fundamentos detrás del caving, como las mecánicas de hundimiento, identificando aquellas variables que influyen en la manera en que propaga, separándolas en aquellas que son controlables a nivel operacional tal como la extracción y el pre-acondicionamiento de aquellas que dependen de fenómenos naturales externos o del macizo rocoso. Finalizando esta etapa con el estudio del software FlowSim BC y una descripción de los casos de estudio.

Una vez que se han definido las variables a considerar se realiza un análisis detallado en términos de altura de cave back y altura de extracción equivalente, reflejando una relación entre la tasa de quiebre y la tasa de extracción, en base a los resultados de ambos casos de estudio es posible inferir si el grado de PA tiene alguna influencia en la forma de propagación del caving, se completa el estudio con un análisis de extracción en términos de leyes y trazadores para ambos casos a fin de comprender el comportamiento a nivel de flujo gravitacional.

La última fase fue incorporar un nuevo mecanismo que representa el cave back en el simulador FlowSim BC, para posteriormente simular los casos de estudios y comparar los resultados en términos de leyes y trazadores, además a modo de validación se compara con resultados a nivel de leyes utilizando el software REBOP el cual tiene incorporado de forma similar el “mecanismo de Cave Back”. Se finaliza esta etapa mencionando las nuevas capacidades que se podrían implementar a FlowSim gracias a la implementación del nuevo mecanismo, proponiendo los algoritmos que se deben ser incorporados.

## 1.5. Contenido de la Tesis

**Capítulo I: *Introducción*.** Se presenta la motivación del trabajo, los objetivos y alcances, la justificación de la tesis en base a las limitaciones actuales de la planificación minera subterránea y se formula la metodología de trabajo.

**Capítulo II: *Antecedentes teóricos*.** En este capítulo se realiza una revisión del estado del arte detrás del fenómeno de propagación de caving. Se estudia la importancia que tiene el crecimiento vertical del caving en las primeras etapas en una operación subterránea y cómo es posible estimar su posición, y así establecer relaciones en función de variables operacionales como la extracción y el pre-acondicionamiento. Además, se describen los fundamentos y mecanismos de caving del simulador de flujo gravitacional FlowSim BC, finalmente se entrega una descripción para ambos casos de estudio.

**Capítulo III: *Análisis de variables operacionales*.** En este capítulo se realiza una comparación entre la altura de cave back y la altura de extracción equivalente (HOD) para ambos casos de estudio, en base a lo anterior se determina la influencia del tipo de variante de PA aplicado, además se realiza un análisis de extracción en términos de leyes y trazadores para el CASO 1 y CASO 2.

**Capítulo IV: *Simulación FlowSim BC*.** Se explica el nuevo mecanismo de Cave shape incorporado al software, se hacen pruebas en base a los datos mina de ambos casos de estudio comparándolo a nivel de extracción (leyes y trazadores), además se validan los resultados de leyes (Cu y Au) con el software REBOP, el cual también tiene la capacidad de representar el mecanismo de propagación de caving.

**Capítulo V: *Propuestas de mejoras*.** Gracias a la incorporación del cave back nuevas capacidades se han descubierto en FlowSim BC, en este capítulo se presentan las propuestas para implementar en un futuro tales como, el cambio de porosidad, control de air gap y cambios de topografía, se deja la optimización del algoritmo y el desarrollo en C++ como trabajo futuro.

**Capítulo IV: *Conclusiones y recomendaciones*.** Se presentan las conclusiones del trabajo de tesis y recomendaciones relacionadas tanto al software FlowSim BC como en términos operacionales para futuros proyectos.



## CAPÍTULO II

### 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

En este capítulo se realiza una revisión del estado del arte detrás del fenómeno de propagación de caving. Se estudia la importancia que tiene el crecimiento vertical del cave back en las primeras etapas en una operación subterránea y cómo es posible estimar su posición, y así establecer relaciones en función de variables operacionales como la extracción y el pre-acondicionamiento. Además, se describen los fundamentos y mecanismos de caving del simulador de flujo gravitacional FlowSim BC, finalmente se entrega una descripción de ambos casos de estudio.

#### 2.1. Método de explotación por Block/Panel Caving

El fenómeno de propagación de caving ocurre en aquellas operaciones subterráneas masivas explotadas mediante Block Caving/Panel Caving. Estos métodos se caracterizan por lograr altas productividades a bajo costo, cuya eficacia recae en el uso de la gravedad para romper y desplazar grandes cantidades de roca quebrada hacia los puntos de extracción ubicados en el nivel de producción.

Ambos métodos operan sobre los mismos principios de explotación, siendo la gran diferencia la manera en cómo se incorpora nueva área en producción. En el block caving, el área basal del cuerpo mineralizado se subdivide en porciones discretas o bloques, los cuales entran en producción de acuerdo con el secuenciamiento definido por el programa de producción. Cada bloque es preparado de manera íntegra antes del inicio de la extracción. En cambio, en el método de panel caving, la incorporación de nueva área productiva sigue un patrón relativamente continuo (Flores, 2005) en donde la socavación de sectores adyacentes a los sectores activos permitirá la entrada en producción de nuevos puntos de extracción. Lo anterior implica que en el método de panel caving se generará una frente de hundimiento que se moverá atravesando el cuerpo mineralizado guiada por la dirección del avance de la socavación (Brown, 2003).

El hecho de que sea distinta la estrategia de incorporación de área productiva implica que para el caso de una mina de panel caving en régimen existirá un perfil de extracción como el indicado en la Figura N° 3-Izquierda, el cual puede ilustrarse a través de la variación de la altura de la columna quebrada, la cual decrece en la medida que se acerca hacia la frente de hundimiento. Por otro lado, se puede apreciar que para una mina de block caving en régimen Figura N° 3-Derecha, estas diferencias de altura quebrada debieran ser menos evidentes en puntos de extracción cercanos, no pudiendo reconocerse un perfil de extracción como en el caso del panel caving.

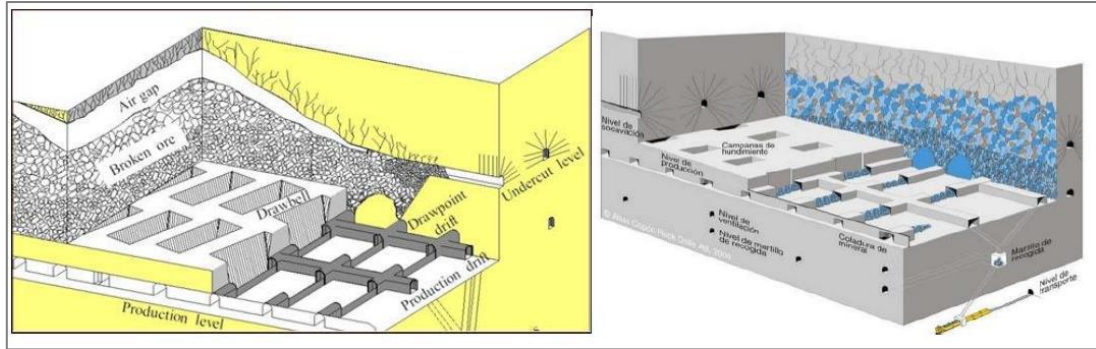


Figura N° 3. Izquierda, representación del método de Panel Caving (Karzulovic 2001). Derecha, representación del método de Block caving (Atlas Copco 2007)

## 2.2. Mecánica del caving: Iniciación y Propagación

El supuesto elemental del hundimiento consiste en que cualquier macizo rocoso es susceptible de ser hundido si es que se alcanza una socavación basal de un tamaño suficiente (Brown, 2003). En este contexto, existen varias estrategias para evaluar la hundibilidad de un macizo rocoso determinado, siendo las más habituales los gráficos de estabilidad empíricos, los cuales relacionan la geometría del área basal socavada representada por el radio hidráulico ( $RH$ , razón entre el área y el perímetro de una excavación dada) con la calidad del macizo rocoso, siendo el más comúnmente empleado el propuesto por Laubscher en 1987 en base a datos disponibles recogidos desde varias minas de hundimiento alrededor del mundo. La principal utilidad de estas técnicas es que han permitido definir condiciones para el par  $RH$ -calidad de roca bajo las cuales deberían ocurrir conductas estables, transicionales o de hundimiento, lo cual ha sido aplicado ampliamente durante etapas de diseño de minas de caving. La última actualización del se muestra en la Figura N° 4, la cual incluye casos de la mina El Teniente asociados a macizos rocosos de mayor más competencia.

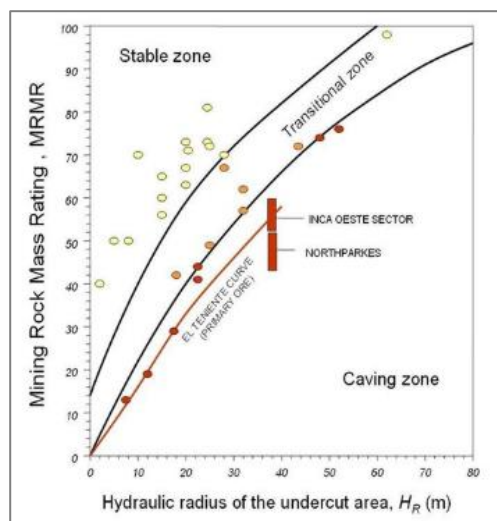


Figura N° 4. Gráfico de estabilidad presentado por Flores y Karzulovic (2003) para calcular el  $RH$  requerido en la iniciación del caving en función de la clasificación del macizo rocoso.

Una vez se completa la socavación requerida para iniciar el hundimiento la extracción del material esponjado causa que la roca intacta sobre la pila de material quebrado comience a debilitarse, al continuar con la extracción de material el quiebre de la roca comienza a propagar a través de toda la altura de columna hasta llegar a superficie.

En la actualidad, uno de los modelos conceptuales más aceptados para describir el comportamiento mecánico del caving ha sido propuesto por Duplancic y Brady (1999), tal como se ilustra en la Figura N° 5, este modelo incluye 5 regiones, las cuales se describen a continuación:

**1) Zona hundida:** Esta región está constituida por el material quebrado que se ha desprendido desde el cave back moviéndose hacia los puntos de extracción.

**2) Air gap:** Colchón de aire definido entre el cave back y la pila de material hundido. La existencia del air gap dependerá de la velocidad de extracción la tasa de propagación del caving.

**3) Zona de deformación discontinua:** Esta región se caracteriza por presentar un macizo rocoso debilitado debido al fracturamiento inducido por la propagación del caving. Los esfuerzos dentro de esta área son típicamente bajos. Debido a estos aspectos, esta zona no presenta actividad sísmica.

**4) Zona sismogénica:** Actividad sísmica se concentra en esta región primariamente debido al deslizamiento a lo largo de estructuras preexistentes y a la generación de nuevas fracturas (Board y Pierce, 2009).

**5) Dominio pseudo-continuo:** La roca de caja alrededor del caving se comporta principalmente de manera elástica. La conducta del macizo rocoso y sus propiedades resistentes son asimilables a una roca no degradada (Board y Pierce, 2009).

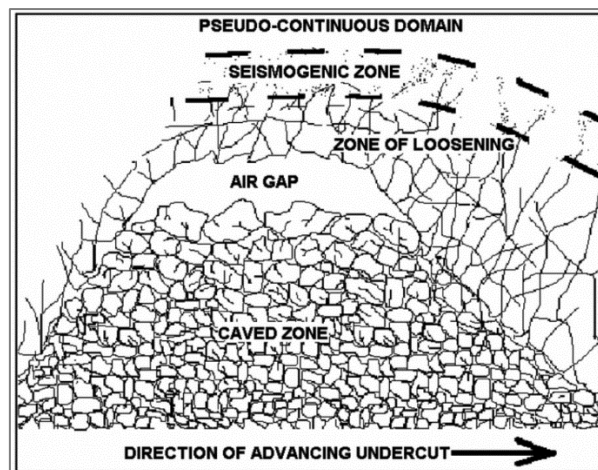


Figura N° 5. Distinción de las zonas generadas durante la propagación del caving Duplancic and Brady (1999). Brown (2003).

Durante el proceso de caving, es posible distinguir dos principales etapas en la propagación y generación de fracturas. En la primera de ellas, denominada como estado de quiebre, se están generando y propagando nuevas fracturas en la dirección de hundimiento vertical, por lo que se tiene una condición de alta sismicidad. En la segunda etapa, en donde se alcanza la conexión del caving con la superficie, generando superficie,

se tiene una disminución tanto de los esfuerzos en las cercanías de la zona de fragmentación como de la sismicidad presente. Según Laubscher (1994), esta condición se alcanza cuando se ha extraído, aproximadamente, el 30% de la columna de mineral in situ.

En términos operacionales una de las variables que controlan la propagación es la extracción, la cual se representa como Velocidad de extracción [t/m<sup>2</sup>-día]. La velocidad de extracción queda definida como la producción diaria extraída en una mina por unidad de superficie disponible para la explotación. En block caving la velocidad de extracción con la que se lleva a cabo la producción no es la misma durante toda la operación, sino que varía dependiendo del estado de la propagación del hundimiento o caving en cada sector del cuerpo en explotación, definiéndose así dos velocidades de extracción distintas.

- 1) **Velocidad de extracción en quiebre:** Corresponde a la tasa unitaria de extracción que se usa cuando el caving se encuentra en estado de propagación, es decir, que no ha sido conectado con superficie o con sectores explotados en un nivel superior (Ver Figura N° 6). Las principales razones por las cuales se restringe esta velocidad se deben a condiciones operacionales y seguridad ya que, por un parte, se debe controlar la amplitud del air gap, definido como la distancia que existe entre el material quebrado y el cave back, para evitar colgaduras en altura o eventos como air blast y, por otra parte, se maneja la concentración de esfuerzos, que puede afectar la estabilidad de las excavaciones circundantes. De esta forma, la velocidad de extracción en quiebre se define en función de la velocidad de propagación del caving (Laubscher, 1997).
- 2) **Velocidad de extracción en régimen:** Corresponde a la tasa unitaria de extracción que se utiliza una vez que el hundimiento se ha propagado hasta la superficie o sector explotado en un nivel superior. En esta condición el concepto de air gap pierde validez ya que se considera que la columna completa se encuentra fragmentada con lo cual la tasa de extracción dependerá principalmente de la capacidad que tenga el sistema de extracción y manejo de materiales en sí y no del macizo rocoso. Dado lo anterior, la velocidad de extracción en régimen suele ser mayor a la velocidad de extracción en quiebre.

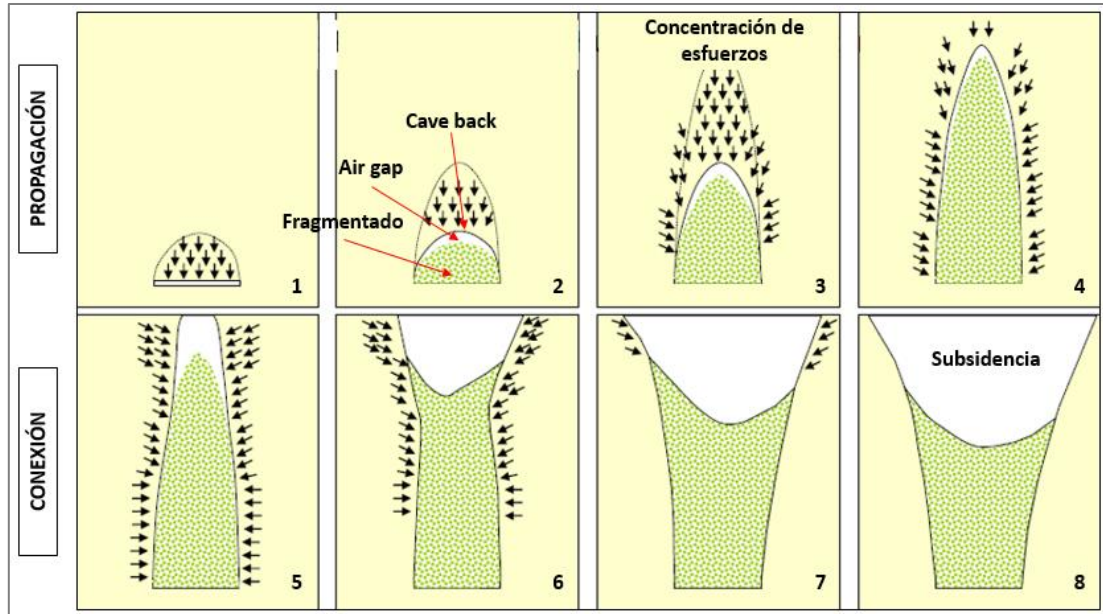
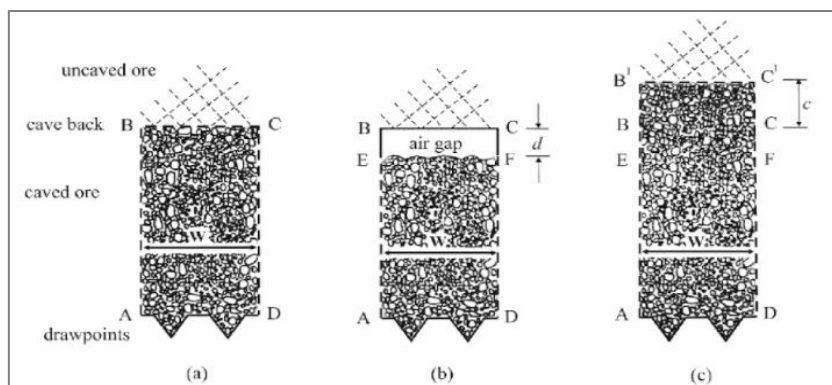


Figura N° 6. Evolución de la propagación del caving, desde el inicio de la socavación hasta la conexión en superficie y posterior subsistencia. (Vargas, 2017).

### 2.3. Relación entre tasa de quiebre y tasa de extracción

La viabilidad del proyecto en su totalidad podría depender de la correcta determinación de las tasas de extracción. Como se explicó anteriormente la tasa de extracción varía dependiendo de la etapa del caving. Durante la fase de propagación la velocidad de extracción está restringida por la velocidad de quiebre. Una vez que el caving haya madurado (haya conectado con la superficie o con un sector superior previamente explotado) la tasa de extracción deja de estar limitada por la velocidad de propagación y comienza a ser regularizada por el manejo de materiales. El objetivo por lo tanto es establecer las relaciones entre la tasa de quiebre y tasa de extracción durante la fase de propagación.

Brown (2003) demuestra que la tasa de propagación del caving establece un límite para la tasa de extracción del material quebrado de manera que si se considera una sección de ancho  $w$  en un área que se encuentra en la etapa de iniciación del caving, tal como lo muestra la Figura N° 7-(A), se tendrá que habiendo extraído una distancia vertical equivalente " $d$ " (como de muestra en la Figura N° 7-(B)) ocurrirá una propagación del caving hasta que el vacío sea llenado nuevamente (Figura N° 7-(C)). Por lo tanto, la extracción genera que el cave back se propague, lo que formará un espacio de aire.



**Figura N° 7. Sección vertical a través de una columna de extracción en la que se muestra (A) Pila llena de material quebrado, (B) Formación de un “air gap” por la extracción, (C) Relleno del air gap debido al esponjamiento del nuevo material quebrado. (Brown, 2003).**

En base a lo anterior la altura de pila de material quebrado ( $H_{pila}$ ) se relaciona con la altura extraída ( $HOD = \text{Height of draw}$ ), altura de cave back ( $HCB = \text{Height of Cave Back}$ ) y el factor de esponjamiento o razón de vacíos ( $e$ ), definido como la razón entre el volumen de vacíos y el volumen sólido, de la siguiente manera:

$$H_{pila}[m] = (H_{CB}[m] - HOD [m]) \times (1 + e)$$

**Ecuación N° 1. Altura de la pila en función de la altura de cave back, altura extraída (HOD) y razón de vacíos.**

Por otra parte, la altura extraída puede escribirse en términos del tonelaje extraído por un punto y su área asociada. O bien, en función de la velocidad de extracción ( $V_{ex}$ ), la densidad del mineral sólido ( $\rho$ ) y el tiempo ( $t$ ), como:

$$HOD [m] = \frac{\text{Ton extraído}}{\text{Área [m}^2\text{]} \times \rho[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3}]} = \frac{V_{ex}[\frac{\text{ton}}{\text{m}^2 \times \text{día}}]}{\rho[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3}]} \times t[\text{día}]$$

**Ecuación N° 2. Altura de extracción (HOD) en función del tonelaje acumulado extraído y área unitaria o bien en función de la velocidad de extracción, densidad sólida y el tiempo.**

Además, la altura de cave back es una función de su tasa de propagación vertical o velocidad de quiebre ( $V_{quiebre}$ ) y el tiempo:

$$H_{CB} [m] = V_{quiebre}[\frac{m}{\text{día}}] \times t[\text{día}]$$

**Ecuación N° 3. Altura de cave back en función de la tasa de quiebre vertical y el tiempo.**

La formación del espacio de aire para un momento determinado durante la fase en quiebre ocurrirá si la altura del cave back ( $HCB$ ) es mayor que la altura de la pila de extracción ( $H_{pila}$ ). Al combinar las relaciones anteriores se llega a la siguiente condición:

$$H_{CB}[m] = HOD[m] \times \left[ \frac{1 + e}{e} \right]$$

**Ecuación N° 4. Relación entre la altura de cave back y altura de extracción asociada a la condición para la formación de air gap sobre la pila.**

En la Figura N° 8 se muestra la relación existente entre la tasa de quiebre y la velocidad de extracción máxima permitida en donde se refleja que mayores tasas de quiebre

permiten alcanzar mayores velocidades de extracción para distintos factores de esponjamiento. La velocidad de quiebre a su vez depende de la competencia del macizo rocoso, en rocas de buena calidad la tasa de quiebre es menor que en una roca de baja calidad, es decir, la extracción en rocas competentes es menor alcanzando velocidades máximas similares independiente de la porosidad del material (factor de esponjamiento), lo contrario ocurre en roca de baja competencia, donde la tasa de quiebre permite mayores velocidades, sin embargo, la porosidad del material tiene un rol más importante, dicha variable está fuertemente relacionada con la fragmentación resultante de la propagación y está controlada por el preacondicionamiento.

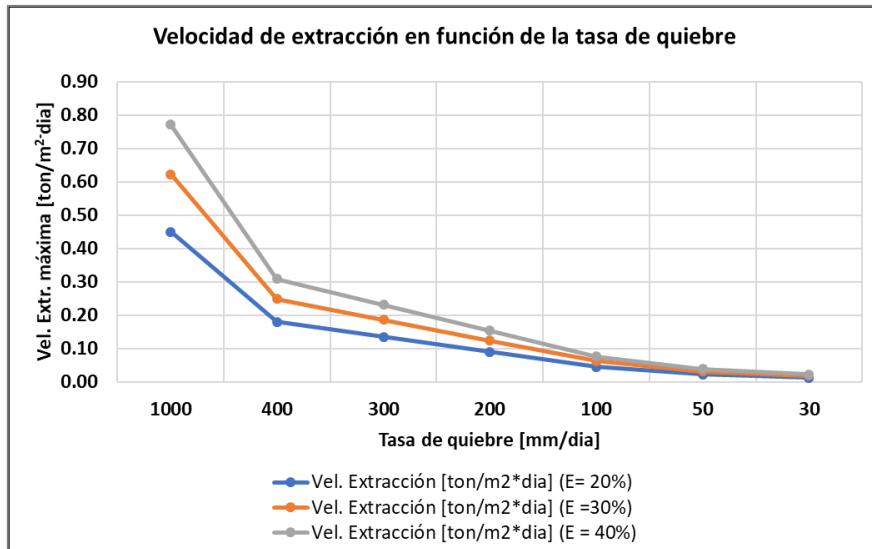


Figura N° 8. Velocidad de extracción en función de la tasa de quiebre del macizo rocoso para distintos factores de esponjamiento. (Guzmán, 2018)

De acuerdo a lo anterior, para tener un control adecuado de la operación durante la etapa de iniciación del caving, resulta imprescindible llevar un control de la evolución de la cavidad, la cual es necesariamente diferente para cada operación minera de hundimiento debido a que cada una posee distintas condiciones tanto geomecánicas como de diseño y estrategia de apertura de puntos de extracción.

## 2.4. Preacondicionamiento (PA)

La tecnología de preacondicionamiento, se basa en la disminución de la competencia mecánica del macizo rocoso a través de la creación de fracturas para mejorar la capacidad de hundimiento y la fragmentación resultante.

Existen dos técnicas principales de preacondicionamiento utilizadas en la minería, siendo estas el hidro fracturamiento (FH) y el debilitamiento dinámico con explosivos (DDE). Adicionalmente, se define una tercera técnica, la cual resulta de la aplicación conjunta de las dos anteriores, tomando por nombre Pre-acondicionamiento Intensivo o Mixto. Se describen a continuación, brevemente, las técnicas de PA mencionadas:

- FH: Consiste en la inyección de líquido a alta presión en pozos confinados realizados en el macizo rocoso. El líquido es inyectado de manera continua en el pozo generando la presurización de las paredes internas de éste. Se genera un estado tensional plano perpendicular a la dirección del esfuerzo principal menor  $\sigma_3$ , generando la apertura, extensión y generación de nuevas fracturas en dicho plano. Como resultado, se tiene la generación de fracturas radiales sub paralelas al esfuerzo principal mayor, las cuales pueden alcanzar radios de entre 20 m y 40 m, facilitando la ruptura y disminuyendo la fragmentación del macizo rocoso. En la Figura N° 9 se muestra un pozo de FH y su plano de ruptura.

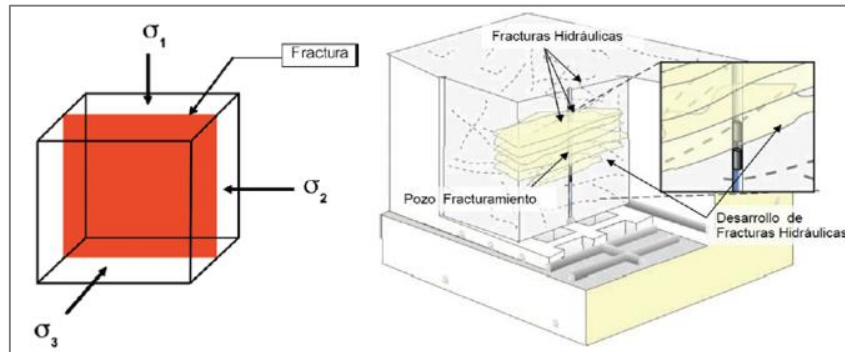


Figura N° 9. Esquema de la técnica de FH, mostrando el plano preferencial de ruptura. (CODELCO, 2010).

- DDE: Consiste en la detonación de pozos confinados cargados con material explosivo que tienen como principal objetivo el promover la aparición de nuevas fracturas y extender aquellas preexistentes en el macizo rocoso. El fracturamiento es producido por medio de dos mecanismos esenciales, el primero de ellos corresponde a la acción de las ondas de choque generadas por la tronadura las cuales representan una pequeña fracción de la energía liberada por la tronadura (3-20%) y que generan una zona de trituración en torno al pozo de tronadura. El segundo mecanismo corresponde a la acción expansiva de los gases generados por la explosión los cuales se encargan de propagar las fracturas generadas por la detonación de la carga explosiva. En la Figura N° 10 se muestra esquemáticamente un pozo de tronadura de DDE y su efecto en el macizo.

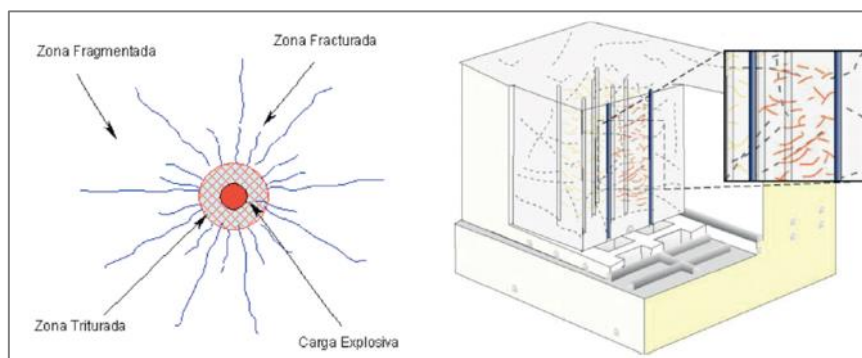


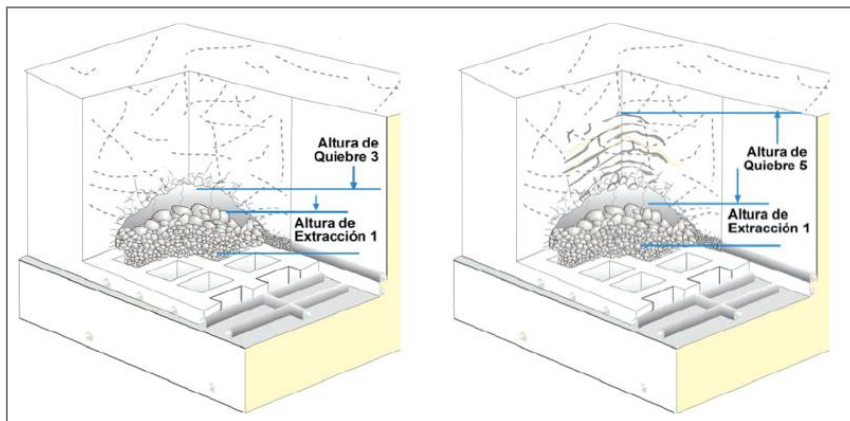
Figura N° 10. Esquema de la técnica DDE y el efecto en el pozo de tronadura. (CODELCO, 2010).



- PA Mixto: Corresponde a la aplicación conjunta de los dos mecanismos descritos anteriormente para aprovechar las características de cada uno. Supone que las discontinuidades generadas mediante FH servirán de superficies reflectoras para el campo de ondas posterior a la tronadura, concentrando el mayor efecto en las fracturas hidráulicas y minimizando acoplamiento desfavorable de ondas fuera de la zona de interés.

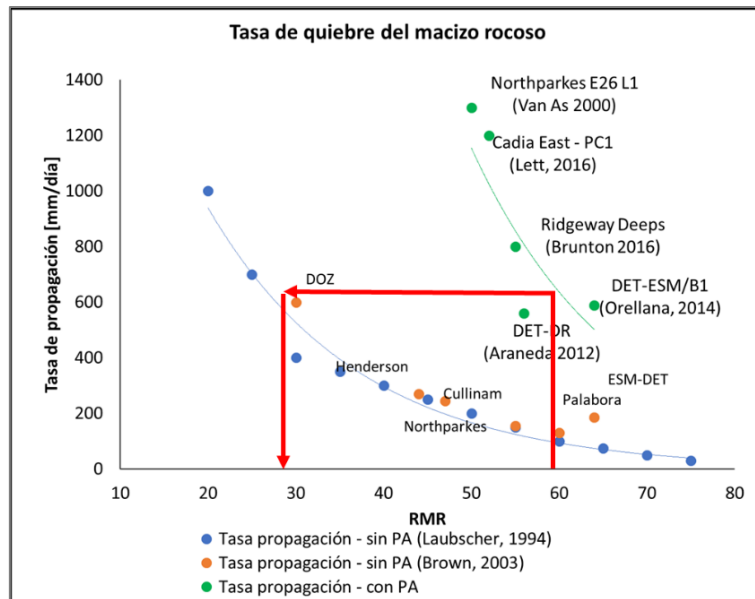
Según CODELCO (2010), se ha ido descubriendo y evaluando algunos fenómenos relacionados con el PA, en particular se comprobó un aumento de la razón que relaciona la altura de quiebre (HCB) versus la altura de extracción (HOD). Para macizos sin PA se ha verificado que esta relación es de 3:1 y para macizos rocosos con PA se pudo confirmar que esta razón es de 5:1 (Figura N° 11).

El cambio en la proporción de esta razón permite comprobar que el debilitamiento provocado por el PA se traduce en una velocidad de propagación más rápida del caving, generándose también una zona mucho más extensa en altura por sobre el mineral quebrado, donde el macizo se ve afectado en términos de la activación de estructuras existentes o la generación de nuevas fracturas (CODELCO, 2010).



**Figura N° 11. Razón entre la altura de extracción versus la altura de quiebre. En la izquierda la dicha razón se estima en torno a 3 sin la aplicación del PA, por otro lado, a la derecha se muestra que la altura de quiebre aumentaría hasta llegar a una razón de 5 producto del debilitamiento del macizo provocado por el PA. (CODELCO, 2010).**

El pre-acondicionamiento, como se definió, tiene el objetivo de reducir la fragmentación esperada del mineral por medio del debilitamiento del macizo rocoso y la generación de fracturas que promuevan y faciliten la propagación del hundimiento. En la Figura N° 12 se muestra una recopilación de información relativa a la tasa de propagación de hundimiento de distintas minas de caving en el mundo en función de la calidad del macizo rocoso, se muestra una actualización de los datos de Laubscher (1994) incorporando información de Brown (2003) de minas de caving sin pre-acondicionamiento y de minas de block caving con pre-acondicionamiento .



**Figura N° 12. Recopilación de las tasas de propagación en minería subterránea en función de la calidad de la roca a partir de la curva de Laubscher (1994) sin PA.**

Se observa a modo de ejemplo que, en términos de tasa de propagación de caving, un macizo rocoso con un RMR de 60, sujeto a preconditionamiento, presenta aproximadamente el mismo comportamiento que un yacimiento en donde no se aplicó preconditionamiento, que tiene un RMR de 30. Esto indica, que el preconditionamiento tiene la capacidad de disminuir la competencia del macizo rocoso y cambiar su comportamiento en cuanto a propagación de fracturas, lo cual puede disminuir la restricción de velocidad de extracción en quiebre. Es posible concluir que el efecto del PA puede aumentar la tasa de quiebre hasta sobre 3 veces para un macizo de RMR entre 50-60.

A partir de lo anterior nace la necesidad de llevar un registro del avance de la cavidad para determinar las tasas de propagación, ya que conocer la posición del cave back ayuda a desafiar los principales retos que se generan durante la fase de ramp up y están relacionados con los siguientes riesgos:

- 1) El desarrollo de un espacio de aire entre el cave back y la pila de material quebrado representa un riesgo de seguridad significativo de “air blast”. Este fenómeno ha causado muertes en otras operaciones de BC el pasado y como tal los air blasts son tratados como un riesgo importante en la minería de hundimiento (Ross & van As, 2005).
- 2) La trayectoria (forma) de la cavidad influirá en la cantidad y calidad del material dentro del cave back estará disponible para la extracción futura, siendo improbable extraer material que se encuentre fuera de los límites de la cavidad. Por lo tanto, controlar la evolución ayuda a evitar incluir material de baja calidad no planificado dentro de la cavidad, ya que esto conduce una entrada temprana de la dilución.
- 3) El avance del cave back y el posterior hundimiento pueden dañar la infraestructura que se encuentra demasiado cerca de la zona de hundimiento.

Los riesgos y desafíos mencionados anteriormente están relacionados directa o indirectamente con el control de la propagación de caving durante la fase de quiebre. Generalmente, las oportunidades para influir en el comportamiento de la propagación se limitan al control de extracción y el grado de pre-acondicionamiento aplicado. Por ende, el éxito de estas técnicas solo puede medirse y evaluarse a través de sistemas efectivos de monitoreo de cavidades que sean capaces de rastrear la respuesta del cave back de manera confiable y robusta.

## 2.5. ¿Cómo se mide la posición del cave back?

Las siguientes técnicas son las más usadas para monitorear la ubicación y progreso del cave back, generalmente son usadas en conjunto:

**1) Time domain reflectometry (TDR):** Es un sistema que funciona midiendo la respuesta (reflexión) de un pulso eléctrico a través de un cable coaxial. Los cortes o extensiones del cable alteran la impedancia característica de la onda lo que indica un movimiento o cambio del macizo rocoso. En los TDR es posible medir la longitud del cable indicando así la ubicación del extremo de este, idealmente, el cave back corta el cable, y el sistema reacciona informando la ubicación de la intersección de la cavidad y la longitud hasta el pozo de instalación del TDR. Si el cable se corta en una posición más alta que el cave back el sistema no funcionará y entregará una indicación errónea del cave back.

**2) Los extensómetros:** Un extensómetro consta de un cabezal de referencia, generalmente instalado en el cuello de un pozo de perforación, y una cantidad X de “anclajes” por pozo, cada uno de los cuales se fija en su lugar a una profundidad conocida. A medida que la roca se deforma o el cave back avanza, las distancias entre los anclajes adyacentes al interior del pozo cambian con respecto a la cabeza de referencia. Esto permite una determinación precisa de la distribución, magnitud, velocidad y aceleración de la deformación en la roca o avance del cave back a medida que intercepte el pozo donde se encuentran los anclajes.

**3) El monitoreo microsísmico:** Es la observación de sismos con magnitud menor que cero, son demasiado pequeños para ser sentidos en superficie, pero pueden ser detectados para analizar el resultado de la actividad minera que ocurren cuando se rompe la roca, que es la característica de la zona sismogénica (Duplancic y Brady, 1999) pero no es un indicador directo de la ubicación del cave back. La precisión de ubicación de los eventos sísmicos alrededor de la propagación del caving a menudo se ven obstaculizada por las condiciones cambiantes de masa de roca que atenúan las señales microsísmicas, lo que dificulta la evaluación del avance de la propagación.

**4) Open Holes:** Son pozos que atraviesan el cave back perforados desde una ubicación segura. Estos pozos se usan para bajar pesas, cámaras o sondas de escaneo láser por el agujero hacia el interior de la cueva. Este método de monitorización proporciona datos directos para interpretar las posiciones y los perfiles tanto para la pila de material hundido, como el cave back. Desafortunadamente, este método es más vulnerable al colapso y las dislocaciones del pozo y, por lo general, requiere que los pozos sean re-perforados o reacondicionados regularmente. Otro aspecto importante es que el acceso a los collares

de los pozos debe ser seguros, ubicándose ya sea en superficie o en una cota alejada del paso del cave back para asegurar la efectividad de este método de monitoreo.

Para que todos estos sistemas de monitoreo sean efectivos, requiere la perforación de pozos en volúmenes de rocas que se encuentran en la trayectoria de propagación. Por lo que estos sistemas de monitoreo dependientes de pozos son particularmente vulnerables. Se debe tener en cuenta que la dislocación / cizallamiento de un pozo no siempre se limita a las zonas más cercanas al cave back, lo que a menudo ocurre a grandes distancias como en la "zona elástica"(Duplancic y Brady, 1999). La infraestructura requerida para estos monitoreos los métodos se basan en cables a lo largo del barreno para la comunicación de datos y la transmisión de potencia. Cualquier desplazamiento pequeño dentro del pozo puede romper los cables y hacer que el sistema de monitoreo no funcione o, lo que es peor, conducir a lecturas imprecisas. Como resultado de estos efectos, la instalación y el mantenimiento de sistemas de monitoreo efectivos y robustos durante el período crítico de desarrollo de cuevas es particularmente desafiante (S. Steffen, et.al, 2016). A partir de lo anterior nacen los Smart Markers como un nuevo sistema de monitoreo de cave back.

**5) Smart Markers:** Son dispositivos electrónicos autónomos con la capacidad de monitorear el flujo de mineral y recuperación de material. La ubicación de la instalación y el tiempo de extracción se utilizan para analizar el comportamiento del flujo de material quebrado. Los marcadores son instalados al interior del cuerpo mineralizado y luego son automáticamente identificados por transmisión de radiofrecuencia, permitiendo la comunicación inalámbrica entre sensores a través del macizo rocoso cuando son recuperados por los LHD en los puntos de extracción.

Los Smart Markers se instalan secuencialmente dentro de un pozo con varios de ellos vinculados a un solo cable. Después de la instalación de los marcadores, los pozos se rellenan para fijar los Smart markers en su posición inicial hasta que comienzan las deformaciones o movimiento de la roca.

La transferencia de señal de radio entre marcadores se repite hasta que se transmite a la estación de lectura, donde todos los datos se recopilan periódicamente a intervalos predefinidos. Los datos adquiridos de los sensores se descargan en el lector y luego se envían a través de un módem 3G a un servidor en línea predefinido, lo que permite obtener los datos de forma remota.

Para un monitoreo de caving efectivo, el sistema de monitoreo de Smart markers requiere que los marcadores se instalen a intervalos regulares a lo largo de los agujeros de perforación que atraviesan el yacimiento. Inicialmente, el lector debería ser capaz de comunicarse con el marcador más lejano (el más bajo) del barreno. Cuando el cave back se acerca a los marcadores más bajos, la roca alrededor de los marcadores puede fracturarse y moverse, sin embargo, los marcadores permanecerán visibles mientras permanezcan dentro del alcance de la radio. Cuando el cave back se propaga por encima del pozo, los marcadores más bajos caerán sobre la pila de material quebrado y se moverán con la roca hundida. Este movimiento significativo interrumpe las comunicaciones con la cadena de marcadores. Una vez que el lector ya no puede comunicarse con este marcador, el siguiente marcador en la cadena representa la posición aproximada del cave back. Por lo tanto, con el fin de monitoreo y propagación del caving,

el sistema Smart marker puede considerarse esencialmente como un TDR inalámbrico como se muestra en la Figura N° 13.

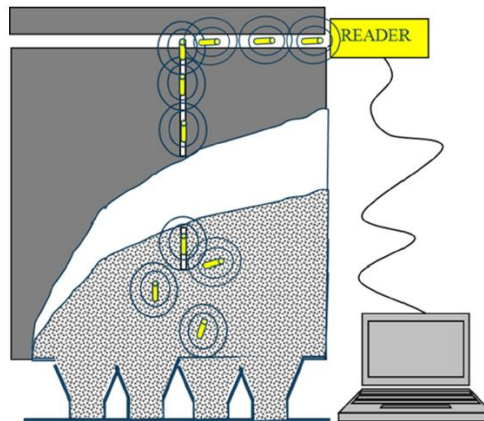


Figura N° 13. Esquema del monitoreo de cave back utilizando Smart Markers.

## 2.6. FlowSim BC

En los métodos de extracción subterránea por hundimiento, modelar los recursos asociados al flujo gravitacional del material quebrado es fundamental para definir con precisión un plan de producción. En los últimos años, se ha avanzado considerablemente en la aplicación de nuevos enfoques matemáticos para modelar el comportamiento del flujo. Los principales se basan en métodos de elementos discretos (DEM), método de elementos finitos (FEM), modelos gráficos o método de autómatas celulares (Cundall et al, 2000; Castro, 2006).

Hasta la fecha se han desarrollado diferentes herramientas para simular y modelar el flujo gravitacional (REBOP; PFC3D, PCBC) (Cundall et.al, 2000) los cuales tienen ciertas limitaciones asociadas a los parámetros necesarios para ajustar las formas del flujo (ángulo de fricción, cambios de porosidad, el diámetro medio de los fragmentos) los que son difíciles de medir, y por lo tanto, calibrar. Esto se traduce en una capacidad limitada para modelar el mecanismo de flujo en operaciones a escala real (Castro et al., 2016). Por lo tanto, aún existe la necesidad de desarrollar herramientas flexibles validadas a través de experimentos y datos a escala industrial.

FlowSim BC es una herramienta numérica que utiliza un enfoque de autómatas celulares (AC) para modelar el flujo gravitacional (Castro, 2006; Castro et al 2009; Castro et al., 2016). Este tipo de enfoque tiene la ventaja de ser simple de implementar en computadoras y los tiempos de simulación son menores siendo factible simular la extracción de muchos puntos de extracción (sobre 200). Su principal desventaja es que no simula de forma explícita la física asociada a los fragmentos de la roca (como lo hace el método DEM) y además para obtener buenos resultados se requiere calibrar los parámetros de flujo.

FlowSim BC al utilizar un método numérico basado en AC, considera el macizo rocoso como una discretización regular de bloques con las siguientes características:

- **Grid / Espacio:** El espacio está representado por bloques de igual tamaño, los cuales se discretizan en bloques que tienen una dimensión de 2 x 2 x 2 m. discretizaciones más pequeñas significa alcanzar un comportamiento más preciso del flujo gravitacional, pero con un consumo de tiempo mucho mayor.
- **Estado:** Cada bloque puede tener uno de estos tres estados: granular, sólido o vacío. En el estado granular, los bloques tienen la capacidad de fluir. En el estado sólido, los bloques no se pueden mover incluso si tuvieran el espacio para hacerlo. Los bloques vacíos tienen densidad cero y se generan desde los puntos de extracción mediante el proceso de extracción. El estado de un bloque puede cambiar de granular a vacío y de sólido a granular. En FlowSim, un parámetro  $C_{ijk}$  representa el estado de cada bloque colocado en una ubicación específica (ijk) dentro de la cuadrícula.  $C_{ijk}$  puede obtener el valor de -1, 0 o 1 representando el estado sólido, granular o vacío, respectivamente.
- **Vecindario:** Es la disposición básica de la celda alrededor de una celda vacía donde se aplica la función de transición Figura N° 14. La vecindad está conformada por 17 bloques, 9 del nivel k+1, y 8 alrededor de la celda en el nivel k.
- **Función de transición:** Es la regla matemática local que se aplica durante la simulación para el movimiento de bloques. FlowSim aplica dos funciones de transición diferentes, una para flujo no confinado o de superficie (material con ángulo de reposo que forma una pila de material en los puntos de extracción) y otra para flujo confinado o de gravedad (asociado al movimiento de partículas generadas por el espacio creado por otras partículas en contacto). La función de transición para el flujo gravitacional se define por la probabilidad de flujo usando la siguiente ecuación (BCTEC, 2018):

$$P_i = \frac{d_i^{-n} \times RF_i^{-m}}{\sum_{k=1} d_k^{-n} \times RF_k^{-m}}$$

Ecuación N° 5. Función de probabilidad o transición.

Donde:

- $d_k$  es la distancia entre la celda vacía y las celdas en el nivel superior.
- $RF_k$  es un parámetro de flujo de roca que está relacionado con la característica de flujo del bloque. Esta variable toma un valor de 100 para la fragmentación gruesa y 10 para la fragmentación fina.
- $n$  es una constante de ajuste y está relacionada con el comportamiento de flujo general de la roca quebrada. Aumentar este parámetro conduce a una zona de extracción de movimiento / extracción más estrecha.
- $m$  es el parámetro de flujo preferencial. Está relacionado con el potencial de migración de finos (bloques con un menor valor de RF). Cuanto mayor es el valor de  $m$ , mayor es la probabilidad de que fino migre hacia la celda vacía.

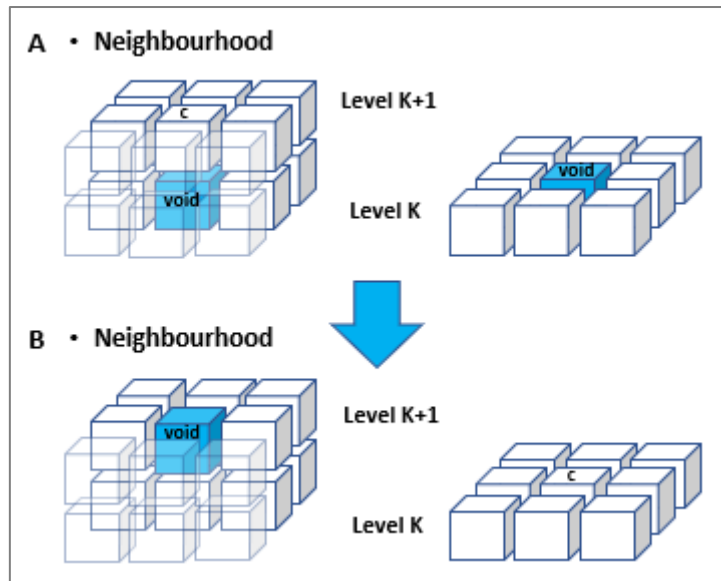


Figura N° 14. Una vista esquemática de los bloques del barrio y el movimiento ascendente de la celda vacía. (A) Antes de la extracción; (B) después de la extracción.

Cabe señalar que la función de transición solo se aplica si hay un número mínimo de vacíos ( $C_v$ =Condición de vacíos). Este parámetro es ingresado por el usuario y restringe el proceso de difusión de vacíos. Puede tomar un rango de valores entre 0 y 9. Si  $c_v = 0$ , los vacíos migrarán hacia arriba sin restricción. Si  $c_v = 9$  los vacíos no podrán ascender a un nivel  $k+1$ , ya que se está pidiendo la condición de que todos los bloques del nivel  $k+1$  sea vacíos. Este mecanismo ha demostrado replicar la evolución de la zona de movimiento y además está relacionado con el factor de esponjamiento y porosidad.

El principal desafío en FlowSim es lograr calibrar los parámetros  $c_v$ ,  $m$  y  $n$  y lograr que sean flexibles para todas las capacidades de esta herramienta. A continuación, se explican los mecanismos que FlowSim es capaz de representar con el fundamento teórico y calibración respectiva.

### 2.6.1. Diámetro de la zona de extracción

El diámetro de la zona de extracción (IEZ) define aquel material que es extraído y está relacionado con la fragmentación de la roca quebrada, cuanto más fina es la fragmentación, menor es el diámetro de la zona de extracción. En FlowSim BC este fue uno de los primeros y más importantes mecanismos para calibrar los parámetros de simulación. Esta calibración se lleva a cabo en base a experimentos tanto para fragmentación gruesa como fina. Experimentos previos utilizando grava han demostrado que para roca fragmentada gruesa ( $d_{50} = 0.6$  m) el diámetro de la zona de extracción podría alcanzar 28.5 m a 100 m (Castro et al., 2007). Para obtener datos para roca fina fragmentada, se realizaron experimentos de laboratorio en un modelo físico (escala 1:75) usando un sistema LHD para la extracción (Sánchez, 2017). La figura 2 muestra la geometría y los parámetros del modelo físico.

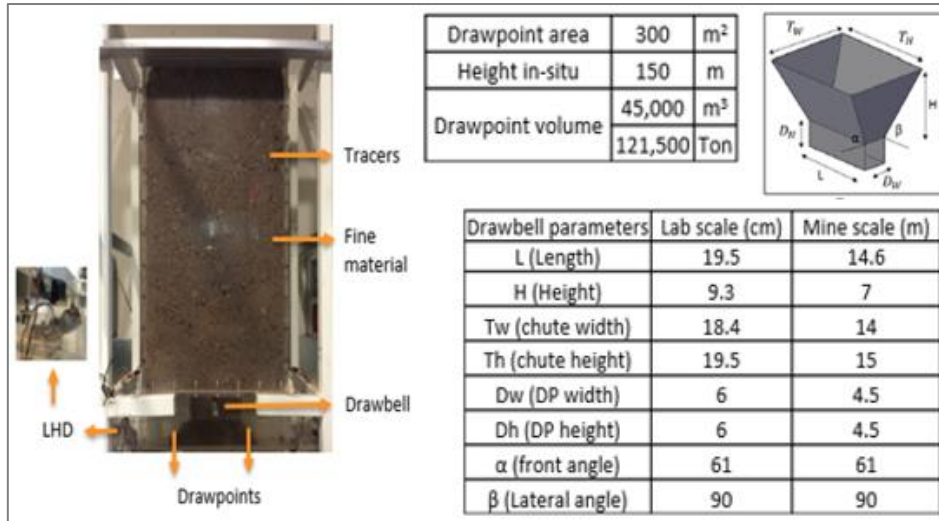


Figura N° 15. Configuración experimental construida para caracterizar material granular fino (Sánchez, 2017).

La Tabla N° 1 muestra los resultados experimentales. Se puede observar que el IEZ es más pequeño que para rocas gruesas y que la relación entre la zona de extracción (IEZ) y Dw (ancho del punto) para roca finamente fragmentada llega a 2.86 (Sánchez, 2017).

Tabla N° 1 Parámetros de la zona de flujo para rocas fragmentadas finas obtenidas a partir de datos experimentales (valores escalados).

Parámetros	Datos experimentales
Tamaño de fragmentos	< 0.37 m
Diámetro IEZ	12.9 m
Ancho del punto de extracción, Dw	4.5 m
IEZ/Dw	2.86

En términos de FlowSim BC, el parámetro "n" controla el comportamiento del flujo, por lo tanto, está vinculado al IEZ. La Figura N° 16 muestra el comportamiento del diámetro de la zona de extracción para diferentes valores de "n" en función de los datos del experimento. Por lo tanto, los valores pequeños de n ( $n = 3-4$ ) se relacionan con la fragmentación gruesa ( $d_{80} = 1$  m) y los valores grandes de n ( $n > 9$ ) con el flujo de fragmentación fina ( $d_{100} < 0.3$  m).



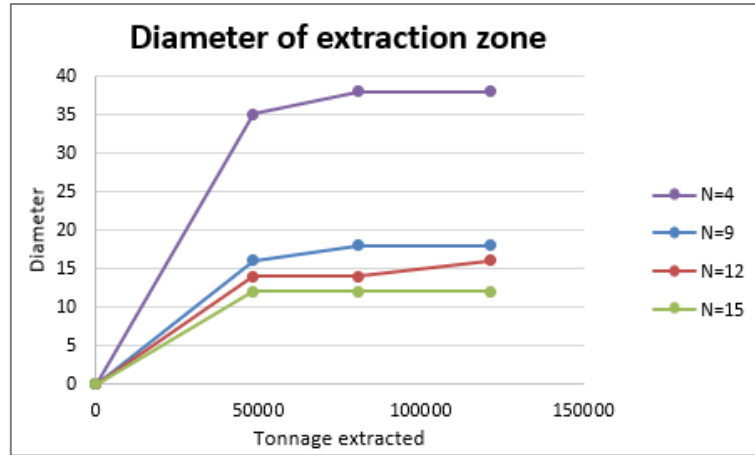


Figura N° 16. IEZ simulado en FlowSim BC variando el parámetro de flujo “n”

2.6.2. Migración de finos

Se sabe que la migración o percolación de fino es un aspecto importante en el flujo gravitacional. Para su calibración se realizaron pruebas con modelos de escala física (escala 1:50), en la Figura N° 17 se muestra el modelo físico el cual fue llenado con dos materiales muy distintos en términos de fragmentación. En su base se colocó un material que representa fragmentación gruesa ( $d_{80} = 1$  m) sobre este una capa de material fino ( $d_{80} = 0.1$  m). Por lo tanto, la relación entre la fragmentación gruesa y fina es 1:10.

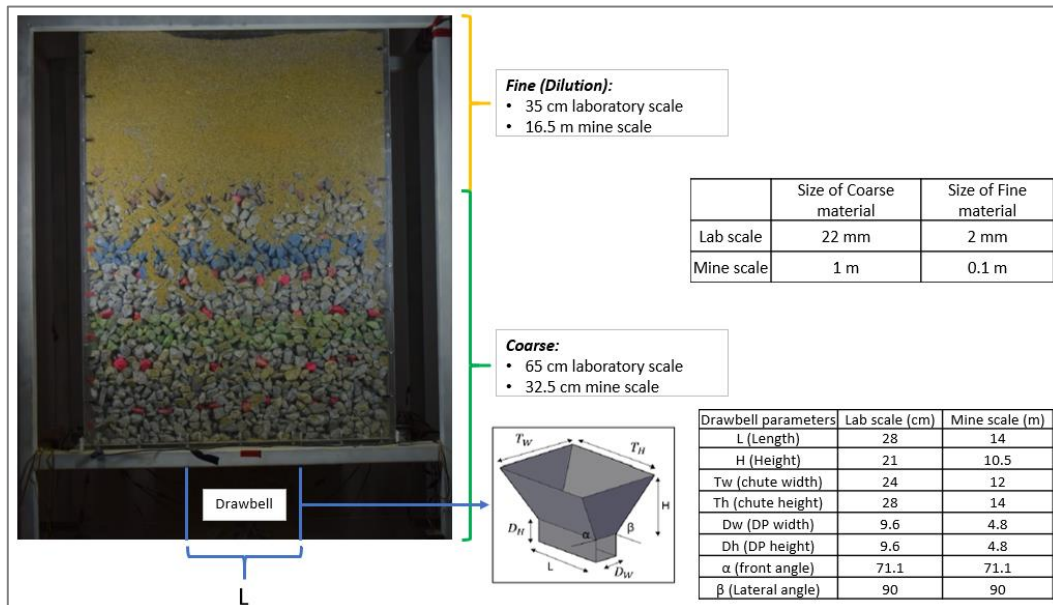


Figura N° 17. Montaje experimental para el estudio de la migración de finos (Arancibia, 2018).

Los experimentos de migración de finos se han cuantificado en términos de dos observaciones: cuando se observa que los finos comienzan a aparecer en los puntos de extracción y el aumento de la cantidad de finos extraídos. En términos de simulaciones en FlowSim, el parámetro que interviene en la migración de finos es "m". Cuanto mayor sea el valor m, mayor será la probabilidad de que migren los bloques finos. Como se

observa en la Figura N° 18, es posible representar el punto de entrada de los finos y la cantidad extraída de finos de los experimentos con un valor para el parámetro  $m = 15$ . Esto significa que en términos de la función de probabilidad los finos tendrán a descender más rápido que los gruesos.

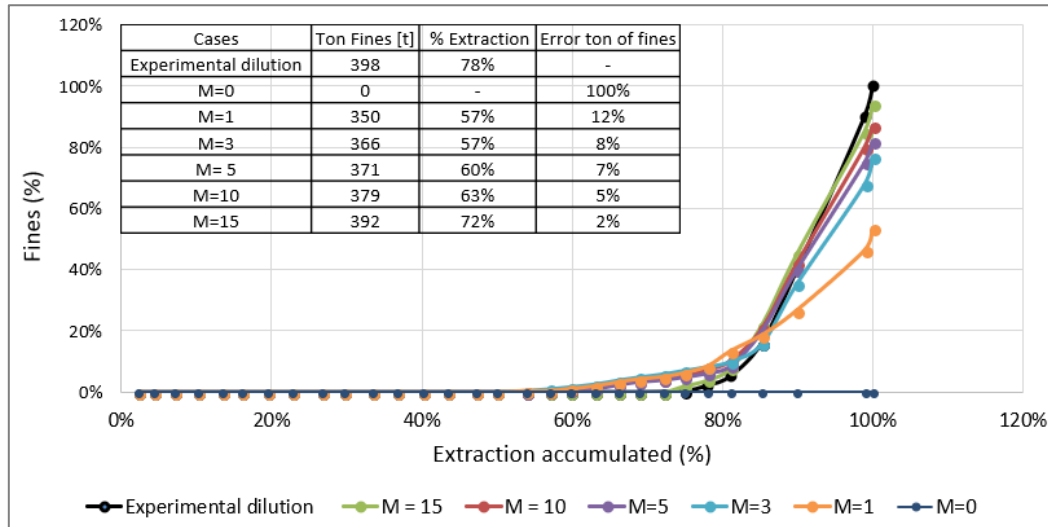


Figura N° 18. Comparación entre el resultado experimental en el modelo físico y la simulación en FlowSim BC en términos de entrada porcentual de dilución y finos extraídos.

### 2.6.3. Flujo preferencial

Los parámetros RF y  $m$  podrían ser útiles para cuantificar o representar la dirección de propagación del caving y su efecto sobre las zonas preferenciales del movimiento de flujo. Estas zonas preferenciales para el caving podrían deberse a la presencia de estructuras o materiales de baja resistencia como se muestra en la siguiente figura.

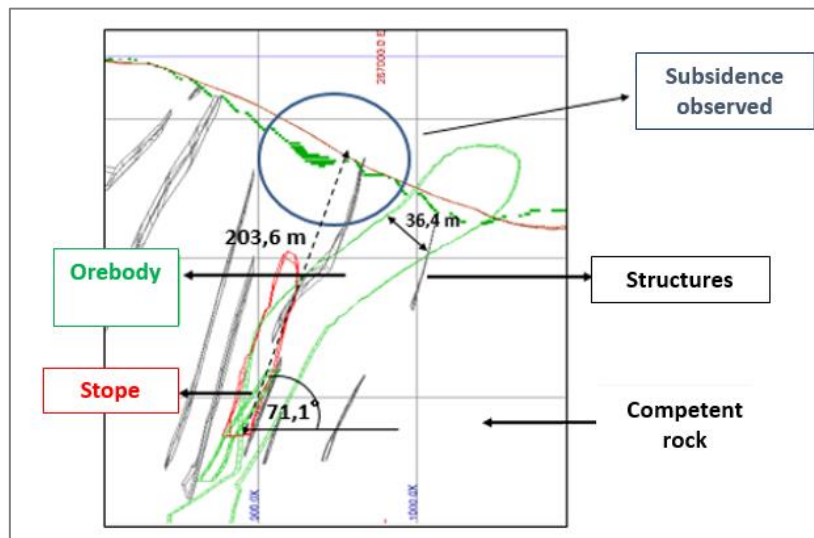


Figura N° 19. Vista de perfil que muestra la propagación inclinada del caving.

Se comprobó la lógica de migración de finos aplicado al caso de estudio mostrado anteriormente donde el cave back propagó siguiendo la estructura sub-vertical con un ángulo de  $71^\circ$ . El resultado de la calibración FlowSim BC para flujo preferencial,

permitió emular tanto la inclinación del flujo, como el área aproximada donde se produjo la superficie de hundimiento. Esto se muestra en la Figura N° 20. Finalmente, aplicando este mecanismo se logró estimar las leyes y dilución con un error del 8% y 15% respectivamente comparado a las mediciones reales en los puntos.

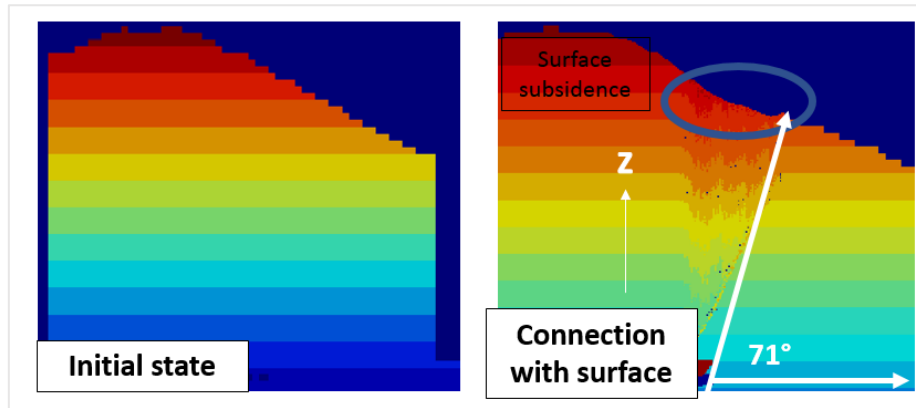


Figura N° 20. Calibración de FlowSim para el flujo preferencial, emulando la inclinación y el área donde ocurrió el hundimiento.

#### 2.6.4. Mezcla de finos y gruesos

Hasta ahora todos los mecanismos y calibraciones anteriores consideran el flujo de materiales finos y materiales gruesos por separado. Sin embargo, es bien sabido que una pequeña fracción de fragmentación fina controla el flujo cuando alcanza un cierto límite en términos de volumen (Kvapil, 2008). Para cuantificar de forma experimental la influencia que tienen el material fino y la humedad en el flujo, se realizó un estudio de flujo gravitacional confinado (Olivares, 2014). Se realizaron experimentos para diferentes porcentajes de humedad (de 0%, 3% y 6%), porcentajes de finos (0%, 20% y 40%) y carga vertical (0; 1.5; 3; 6; 10 Mpa). En dicho experimento los finos tienen un  $d_{80} = 0.1$  mm mientras que el material grueso alcanza un  $d_{80} = 15.6$  mm. Los resultados indicaron que un aumento en la carga vertical implica una disminución en la fluidez del material.

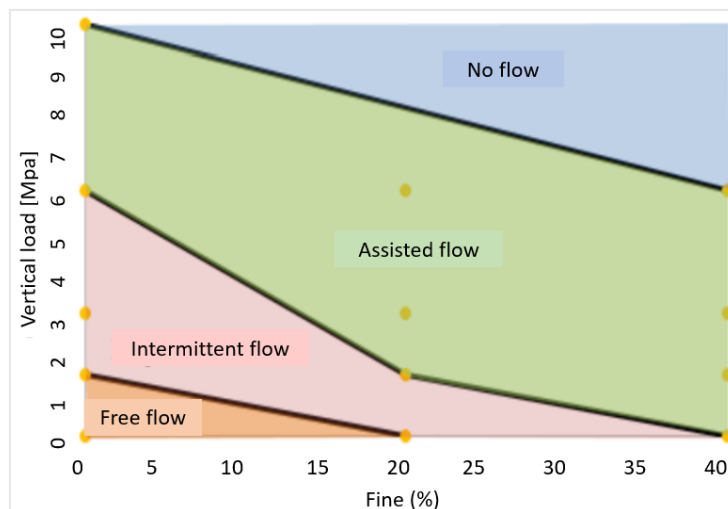


Figura N° 21. Efecto de la presencia de finos y carga vertical en condiciones de flujo (Olivares, 2014).

Se concluyó que, en el caso de que haya una gran presencia de finos (aproximadamente 20 [%]) en los puntos de extracción y con la presencia de humedad (6 [%]) la fluidez del material se reduciría drásticamente, debido el flujo se comporta como material fino.

Basado en el experimento anterior, FlowSim BC también incorpora la mezcla de finos y gruesos en el comportamiento general del flujo (ver Figura N° 22). Este mecanismo depende del parámetro de flujo "n". El aumento de este parámetro conduce a un elipsoide de movimiento más esbelto, lo que representa el comportamiento de fragmentación fina. Por esto se definen dos parámetros "n" para cada tipo de fragmentación: n1 (grueso, bajo valor de n) y n2 (fino, alto valor para n). Cuando el porcentaje de finos es igual al 30% la función de transición comienza a utilizar un valor de "n" asociado a la fragmentación fina.

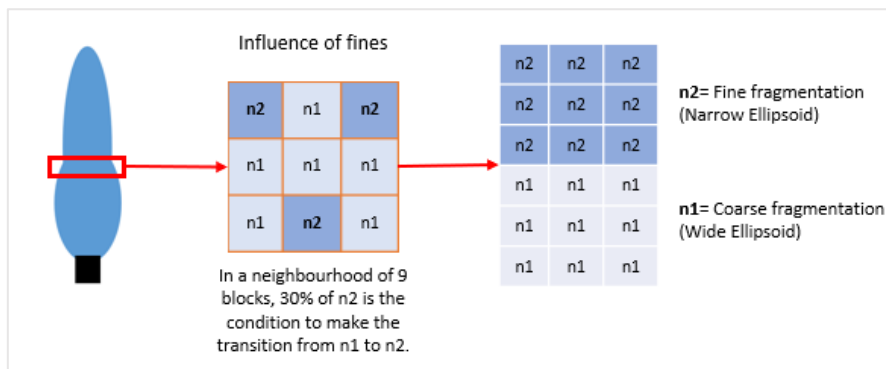


Figura N° 22. Influencia de finos para cambiar el comportamiento del flujo.

Finalmente, la Tabla N° 2. Resumen de los parámetros principales para la calibración de FlowSim y su significado físico. resume los principales resultados de calibración de parámetros. Como se señaló, los parámetros de la función de transición están relacionados con la fragmentación, la migración de finos y los mecanismos de flujo preferencial. Sin embargo, aún hay trabajo por realizar para ajustar los parámetros del factor de esponjamiento a partir de los datos de escala industrial.

Tabla N° 2. Resumen de los parámetros principales para la calibración de FlowSim y su significado físico.

Parámetros de FlowSim BC	Función que cumple en la simulación	Valores típicos que puede tomar, de acuerdo a calibraciones.
N	A medida que n aumenta el diámetro de la zona de extracción se reduce, por lo tanto, n se relaciona con la fragmentación del material.	N1 ( $d_{80}$ grueso = 1 m) = 4 N2 ( $d_{80}$ fino <0.3 m) = 10-15
M	A medida que aumente el valor de m la probabilidad de una migración de finos o un flujo preferencial aumentará.	m = 0; para ningún flujo preferencial m = 15; en caso de una clara migración preferencial o presencia de finos.
Cv	Está relacionado con el factor de esponjamiento de la roca hundida. Un pequeño cv significa una pequeña porosidad y un gran potencial para el movimiento horizontal debido al rilling.	Cv se debe ajustar de acuerdo al factor de esponjamiento (porosidad) y espacio de aire.

## 2.7. Casos de estudio

Los casos analizados corresponden a dos yacimientos adyacentes explotados por el método de panel caving Figura N° 23. Para el CASO 1 la altura de columna extraíble es de 1000 m, y se aplicó PA intensivo (Mixto) hasta los 400 m, su estado actual en términos de extracción corresponde a una mina en régimen. Por otro lado, el CASO 2 presenta una altura de columna de 750 m, solamente fue pre acondicionado por FH entre los 200 m a 600 m y actualmente está en etapa de propagación.

A diferencia de la mayoría de las operaciones de BC/PC, en donde las alturas de columnas no superan los 400 m con el principal objetivo de acelerar el inicio del proyecto alcanzando un estado en régimen rápido, además de restringir la explotación a los sectores donde realmente existe alta ley, estos casos fueron diseñados con alturas de columnas muy elevadas con el incentivo fundamental de minimizar los costos de desarrollo y maximizar la capacidad productiva. Debido a esto también el alto requerimiento de la técnica de pre-acondicionamiento de modo de asegurar la conexión del cave back en superficie.

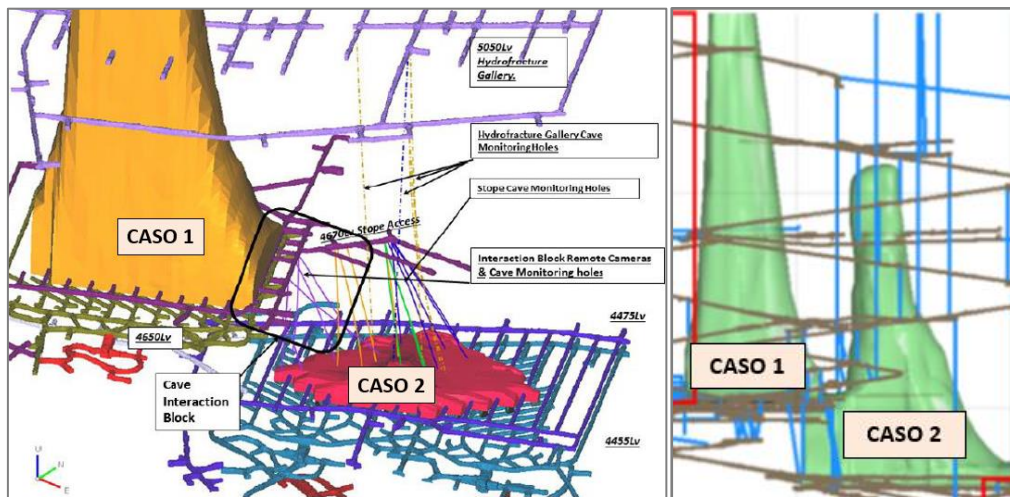
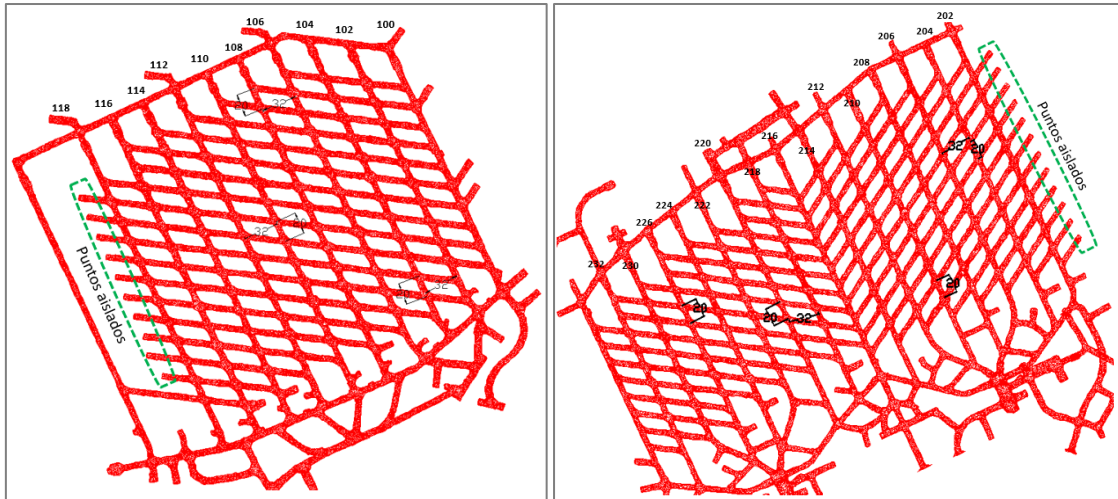


Figura N° 23. Vista isométrica del CASO 1 Y CASO 2. (Lett et al, 2016).

La Figura N° 24-Izquierda muestra el layout del CASO 1 con un diseño tipo teniente 16m x 20 m, y un número total de puntos de extracción de 218, de los cuales 10 corresponden a puntos de extracción aislados ubicados en el lado oeste del bloque. Por otro lado, la Figura N° 24-Derecha muestra el layout del CASO 2, con un espaciamiento de 16m x 20m, el número total de puntos de extracción es de 318. Este caso en particular presenta un cambio en la orientación de sus calles, por lo que se estudia considerando un sector Este sobre el cual existe una interacción con el CASO 1 y el sector Oeste. Además, hay 12 puntos de extracción aislados ubicados en el primer sector. Ambos aplican un tipo de hundimiento avanzado, además el nivel de producción del CASO 1 se encuentra a una diferencia de 195 m por sobre el CASO 2.



**Figura N° 24. Izquierdo, Layout del nivel de producción para CASO 1. Derecho, Layout del nivel de producción para el CASO 2.**

Como se mencionó anteriormente uno de los aspectos más destacables para ambos casos era la altura de columna extraíble, en donde la aplicación de la técnica del PA sería fundamental para lograr una propagación de caving adecuada, sin embargo, para el CASO 1 esto fue así hasta que el cave back alcanzó los 800 m de altura aproximadamente, debido a angostamiento del cave back por sobre los 750 m este terminó estancándose a mediados del año 2014. Una de las razones fueron las estructuras presentes en el macizo rocoso en particular la falla CaLa Norte la cual guio el crecimiento vertical por una zona muy estrecha hasta que el el interfaz de cave back redujo en exceso el radio hidráulico requerido para que la roca siguiera quebrándose. La solución fue la implementación de FH desde superficie, el resultado fue que en dos meses el cave back propagó rápidamente hasta conectar en octubre el 2014.

Debido a lo anterior es que se buscó relacionar el impacto que tendría el PA en la propagación del caving, comparando su efecto en las variables operacionales que influyen en crecimiento vertical del cave back (extracción) para ambos casos de estudio.

## 2.8. Conclusiones

En base al modelo actual de propagación de caving establecido por Duplancic y Brady, se establece que para determinar la relación entre la tasa de quiebre y velocidad máxima de extracción se debe controlar la distancia entre el cave back y la pila de material quebrado, zona que ellos denominan como “air gap”.

Por otro lado, se ha demostrado de forma empírica que para alcanzar mayores beneficios durante la fase de ramp up, es conveniente completar la etapa de quiebre lo más rápido posible, esto se logra alcanzando altas tasas de propagación, para esto el macizo rocoso debe estar preparado para fluir, sin tener problemas de estancamiento. Por esto la aplicación de PA se hace fundamental, donde se podría elevar la razón de HCB: HOD desde 3:1 a 5:1, de acuerdo a los antecedentes de Codelco.

FlowSim BC ha demostrado ser una herramienta innovadora de flujo gravitacional aplicable a la planificación minera de block caving, la cual se ha desarrollado rigurosamente a partir de experimentos y observaciones a escala industrial. Las simulaciones son capaces de representar muchos de los fenómenos que rigen en el caving, tales como la migración de finos (dilución), flujo preferencial, Rilling superficial, fragmentación secundaria, cambios de la geometría del elipsoide de extracción, los cuales han sido calibrados y validados, entregando errores menores a un 5%. Se espera que este tipo de herramientas, dadas sus capacidades, facilidad de uso y rapidez de ejecución, logre reemplazar los actuales enfoques basados en reglas obsoletas de caving. Por otro lado, el simulador seguirá en constante evolución a medida que se obtenga una mayor comprensión e información del flujo gravitacional.

Con respecto a los casos de estudio ambos tienen en común ser yacimientos muy grandes, y profundos llegando a alturas de columna extraíble de hasta 1000 m. La experiencia de la compañía en operaciones en block caving anteriores ha sido beneficioso para tomar acciones ante los desafíos que imponen ambos macrobloques. En particular la aplicación intensiva de pre-acondicionamiento.

## CAPÍTULO III

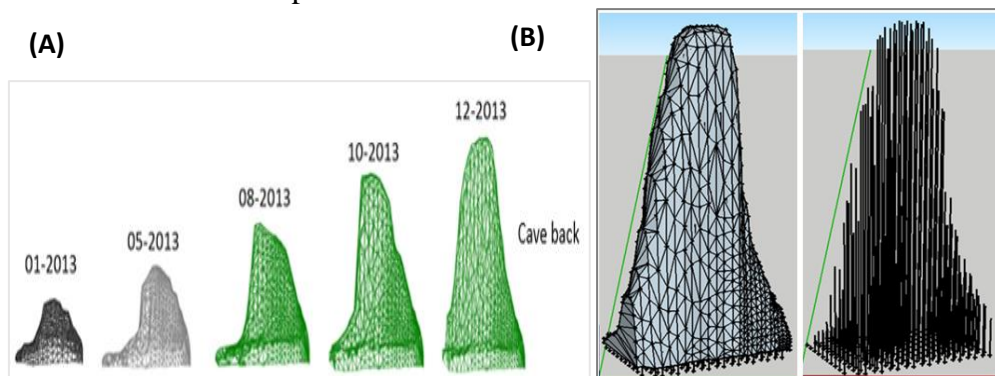
### 3. ANÁLISIS VARIABLES OPERACIONALES QUE INFLUYEN EN LA PROPAGACIÓN

En este capítulo se realiza una comparación entre la altura de cave back y la altura de extracción equivalente (HOD) para ambos casos de estudio, en base a lo anterior se determina la influencia del tipo de variante de PA aplicado, además se realiza un análisis de extracción en términos de leyes y trazadores en ambos casos de estudio.

#### 3.1. Altura del cave back (HCB) vs altura de extracción (HOD)

Para analizar la influencia que tiene la extracción sobre la propagación del caving, se busca relacionar la altura de extracción con la altura de cave back. Para esto se sigue la siguiente metodología:

- 1) A partir de las mediciones de cave shape en formato (.dxf) para cada periodo como se muestra en la Figura N° 25-A, se calcula la altura del cave back (HCB) para cada punto de extracción. Utilizando el software Sketch Up se trazan líneas verticales las cuales se intersectan con el cave back (Figura N° 25-B), posteriormente dichas líneas son exportadas al software AutoCAD con el fin de obtener la distancia de cada una de dichas rectas. Esta distancia representa la altura de cave back y se mide desde el nivel de producción.



**Figura N° 25. (A) Cave shapes como input en formato dxf. (B) Vista isométrica del software Sketch Up para trazar las líneas de cada punto de extracción hasta su intersección con el cave back a modo de definir la HCB.**

- 2) Se calcula la altura de extracción (HOD) para todos los puntos de extracción en aquellos periodos donde se tiene mediciones del cave back. Esta altura se estima en función del área de los puntos ( $320 \text{ m}^2$ ), el tonelaje extraído acumulado para cada periodo y la densidad del material sólido siguiendo la Ecuación N° 2 (Capítulo II, sección 2.3).



### Capítulo III: Análisis de variables operacionales que influyen en la propagación

- 3) Se calcula la razón HCB : HOD para todos los puntos y periodos donde existe medición del cave back.

#### 3.1.1. HCB vs HOD CASO 1

La Figura N° 26 muestra cómo se comporta el cave back en función de la extracción para todos los puntos del CASO 1 en el cual se aplicó PA mixto (DDE+FH) hasta los 400 m de altura de columna, se pueden observar tres tendencias claras; (1) Aquellos puntos sobre el cual el cave back se propaga rápidamente. (2) Puntos donde el cave back crece moderadamente a medida que la extracción aumenta. (3) Puntos donde el cave back se propaga lentamente con la extracción. La tendencia general es una razón HCB : HOD = 8:1 de modo que a mayor extracción (HOD) mayor será la altura del cave back. Sin embargo, existe una alta dispersión, esto significa que es posible identificar áreas con puntos de extracción sobre los cuales el cave back crece muy rápido y otras donde se propaga muy lento durante la extracción.

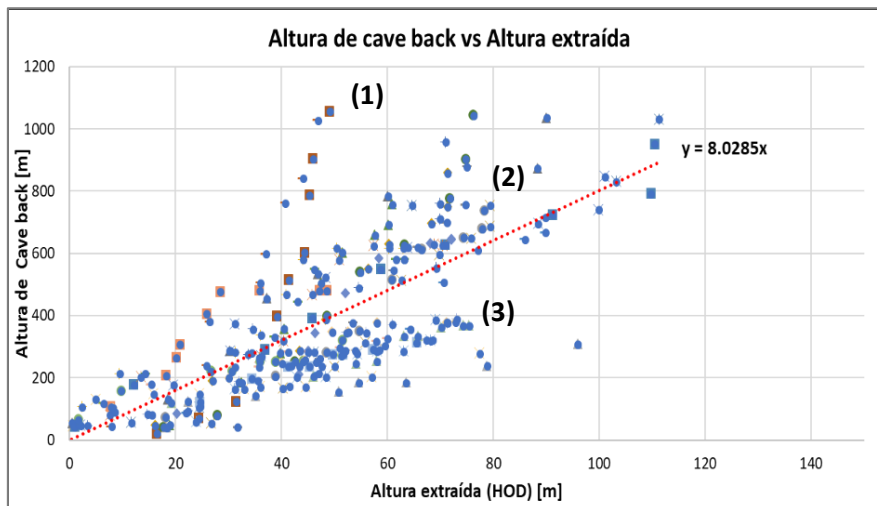


Figura N° 26. Relación entre HCB y HOD para todos los puntos del CASO 1.

La Figura N° 27 muestra la evolución del cave back para cada periodo (8 en total), en cada uno se calcula la razón HCB:HOD, en la Tabla N° 3 se resumen dichos valores observándose que a medida que propaga el caving la razón aumentará hasta que alcanza una altura superior a 800m, sobre esta altura la razón disminuye hasta octubre del 2014 debido al estancamiento de la propagación por el angostamiento o reducción del radio hidráulico del cave back en altura, gracias al PA mediante FH superficial se logró quebrar el macizo rocoso en los alrededores hasta que conecta en superficie.

Capítulo III: Análisis de variables operacionales que influyen en la propagación

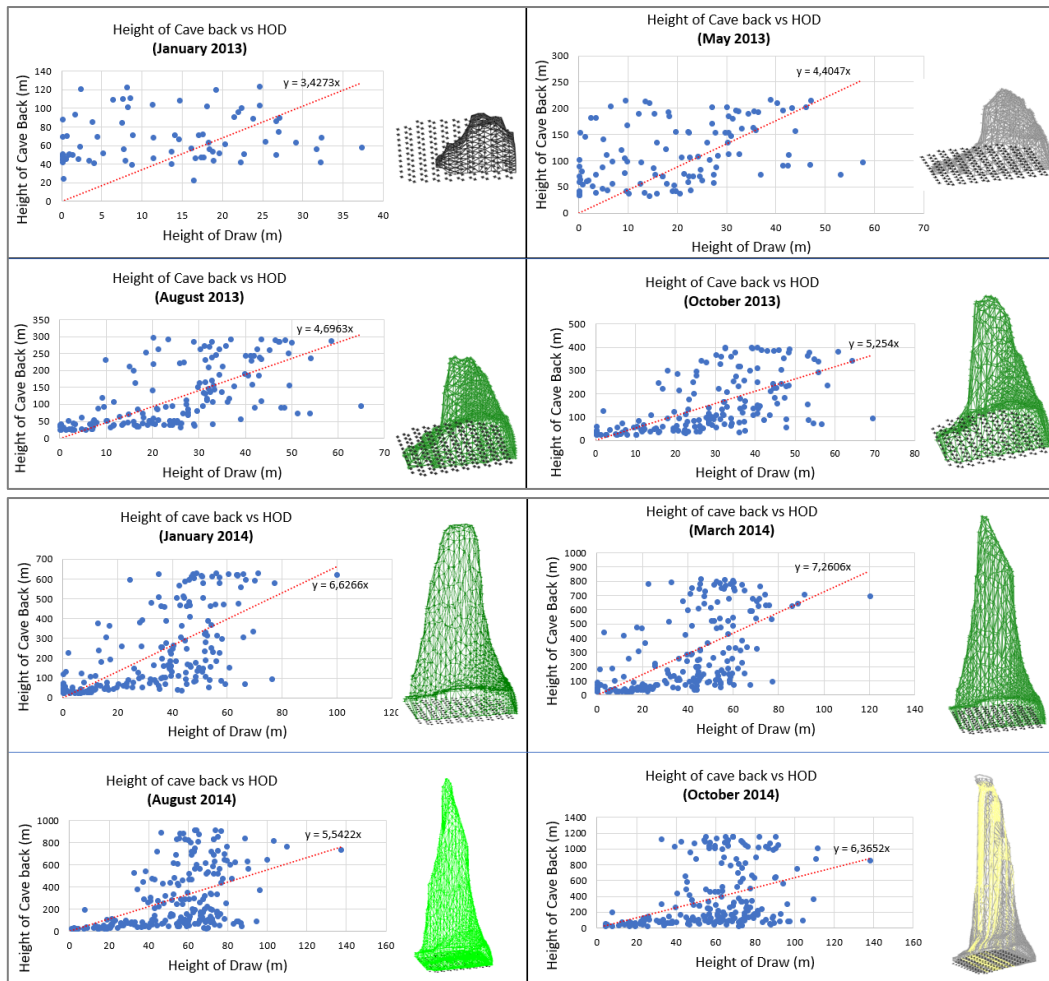


Figura N° 27. Evolución del cave back para 8 periodos donde se tienen mediciones de cave back para el CASO 1.

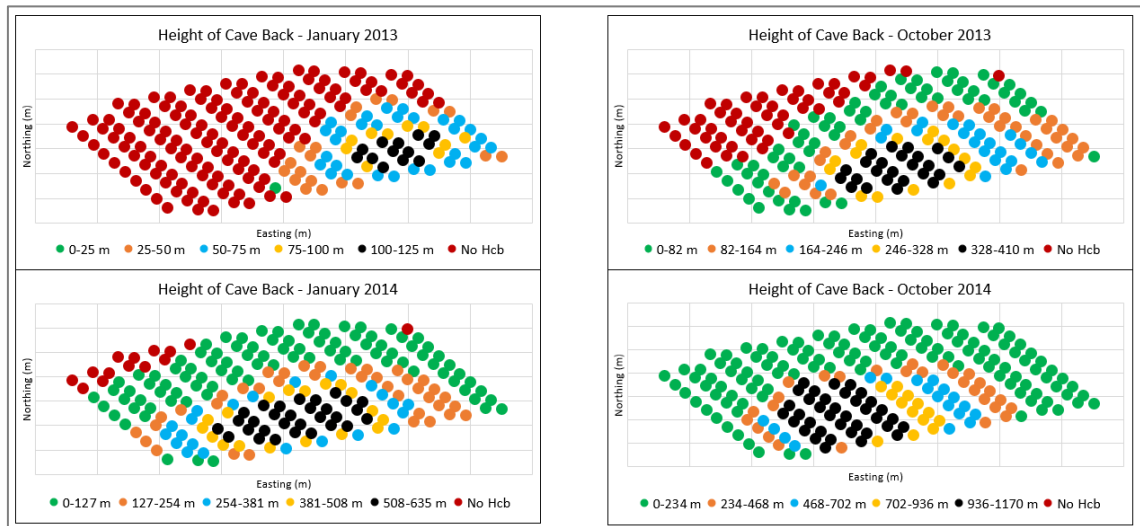
Tabla N° 3. Altura de cave back y relación HCB : HOD para cada periodo donde existe una medición para el CASO 1.

Medición de CB	HCB	HCB : HOD
Jan-13	120 m	3.42
May-13	200 m	4.40
Aug-13	300 m	4.69
Oct-13	400 m	5.25
Dec-13	500 m	6.46
Jan-14	600 m	6.62
Mar-14	800 m	7.26
Aug-14	900 m	5.54
Oct-14	> 1000m	6.36

### Capítulo III: Análisis de variables operacionales que influyen en la propagación

Debido a la gran dispersión observada en los valores de la razón HCB:HOD se realizó un análisis más profundo separando aquellos puntos donde el cave back alcanza mayores alturas por periodo de aquellos donde el cave back no propaga tan rápido, para eso se siguió la siguiente metodología.

- 1) Para cada periodo estudiado se determina aquella área con mayor HCB. Para esto se busca el valor máximo y mínimo de HCB en cada periodo y se crea un rango de valores según muestra la siguiente figura.

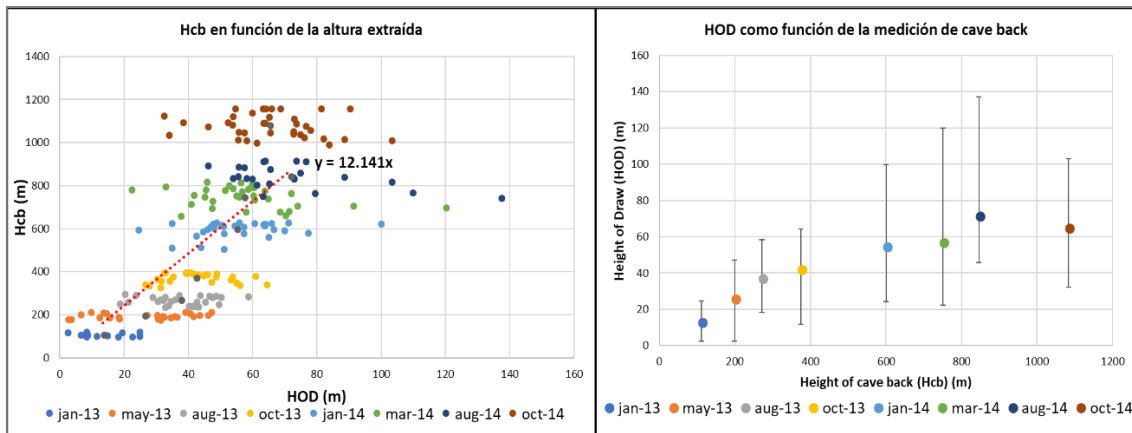


**Figura N° 28. Evolución de la zona con los puntos de extracción cuya proyección de cave back propaga más rápido.**

Se observa que la zona en negro representa aquellos puntos donde la altura de cave back es mayor, por ende, propaga más rápido. Además, se observa la secuencia de extracción, comenzando del sector sur-este del layout.

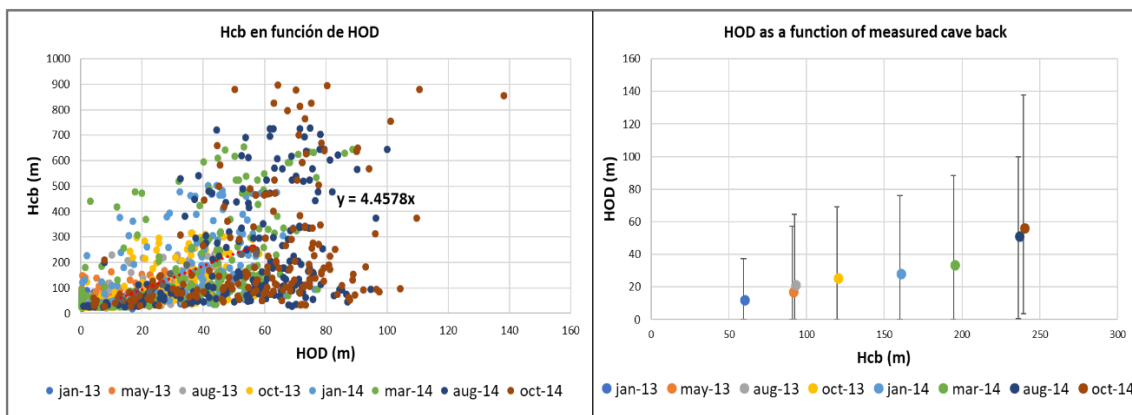
- 2) Se establece una relación con la altura extraída separando aquellos puntos que se encuentran al interior de la zona de mayor propagación de aquellos que se encuentran en el entorno.

Siguiendo la metodología anterior se calcula la razón entre altura del cave back (HCB) y altura extraída (HOD) para aquellos puntos de extracción dentro de la zona de mayor HCB. La Figura N° 29-Izquierda muestra que en el área de mayor HCB la relación se vuelve  $HCB : HOD = 12:1$ . En la Figura N° 29-Derecha se observa que hasta los 800 m de altura de cave back la extracción aumenta moderadamente, dicha altura representa la cota en el cual el cave back comienza a estancarse, una vez que se ha aplicado el PA con FH superficial el cave back propaga rápidamente hasta conectar a superficie superando una altura de columna de 1000 m, sin embargo la extracción disminuye para no generar riesgos operacionales asociados a la formación de un air gap muy grande.



**Figura N° 29. Izquierda, Razón HCB:HOD para aquellos puntos bajo la zona de mayor propagación. Derecha, muestra el comportamiento de la extracción a medida que aumenta la altura del cave back para el CASO 1.**

Al realizar el mismo análisis con aquellos puntos que se encuentran fuera de la zona de mayor HCB, se observa que la razón es aproximadamente 4.5:1 como se muestra en la Figura N° 30-Izquierda. Por otro lado, en la Figura N° 30-Derecha no se observan particularidades en términos de extracción, ya que al aumentar la altura de cave back la extracción también aumenta. La altura máxima en la zona fuera de mayor propagación no supera los 250m a pesar de que la roca que se encuentra pre-acondicionada de forma intensiva hasta los 400m y que la extracción promedio es mayor que en la zona de mayor altura de cave back, esto se observa al comparar la Figura N° 29-Derecha en donde a los 250 m la altura de extracción equivalente no supera los 30 m, en cambio en la Figura N° 30-Derecha, se muestra que a los 250 m de HCB la extracción supera los 50 m.



**Figura N° 30. Izquierda, Razón HCB:HOD para aquellos puntos fuera de la zona de mayor propagación. Derecha, muestra el comportamiento de la extracción a medida que aumenta la altura del cave back para el CASO 1.**

Los resultados anteriores muestran que la razón con PA intensivo es mucho mayor a la que se podía alcanzar de manera teórica con pre-acondicionamiento (5:1) en base a los antecedentes teóricos expuestos por Codelco (2010), llegando en promedio a una razón de 8:1. Sin embargo, al realizar la separación entre los sectores con mayor propagación y menor propagación se observa que aquellos puntos que se encontraban en el entorno de la mayor propagación del cave back la razón se mantiene dentro del rango teórico (4.5:1). Por otro lado, para la zona de mayor HCB se observa que existen puntos con menor

### Capítulo III: Análisis de variables operacionales que influyen en la propagación

tonelaje extraído que algunos puntos fuera de la zona de mayor HCB, el motivo se debe a que el análisis está acotado solamente a la extracción, a partir de antecedentes de la mina se sabe que existen estructuras (falla CaLa Norte) que permitieron una mayor propagación debido a que el cave back crecía en aquellas zonas guiadas por la falla donde la roca quiebra con mayor facilidad, esto genera un incremento de la razón HCB:HOD a 12:1, aumentando el promedio general por sobre el teórico (8:1).

#### 3.1.2. HCB vs HOD CASO 2

La Figura N° 31 muestra cómo se comporta el cave back en función de la extracción para todos los puntos de extracción del CASO 2, en el cual se aplicó PA con FH en un volumen de roca ubicado entre 300m y 650m desde el nivel de producción. Se pueden observar dos tendencias claras. (1) Puntos donde el cave back crece moderadamente a medida que la extracción aumenta. (2) Puntos donde el cave back comienza a estancarse con el aumento de la extracción. La tendencia general entrega una razón HCB : HOD = 8:1 de forma análoga a lo que ocurre en el CASO 1. Debido a la dispersión se decide realizar el mismo análisis de las áreas con puntos en donde el cave back crece moderadamente y otras donde se propaga muy lento durante la extracción.

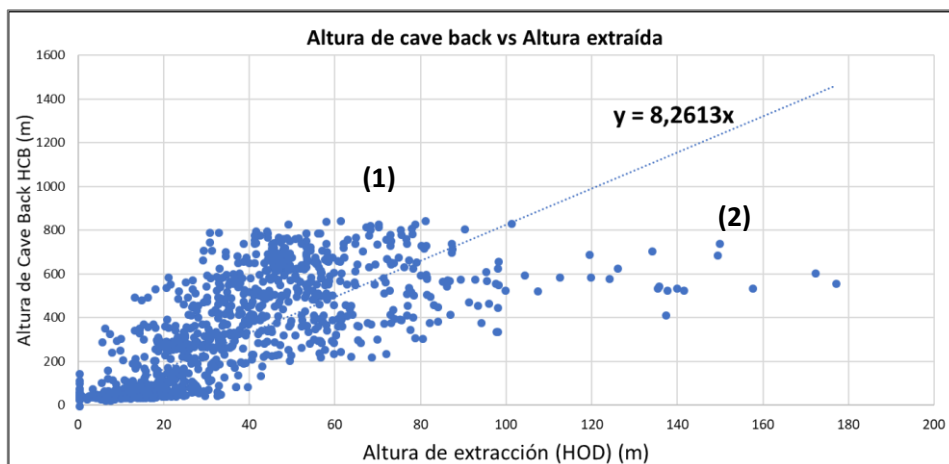


Figura N° 31. Relación entre HCB y HOD para todos los puntos del CASO 2.

La Figura N° 32 muestra la evolución del cave back para cada periodo, en cada uno se calcula la razón HCB:HOD, en la Tabla N° 4 se resumen dichos valores observándose que a medida que propaga el caving la razón aumentará hasta que alcanza una altura superior a 600m. A mayor extracción mayor será la razón HCB : HOD, esto se cumple hasta que comienza la interacción entre cavidades (desde Abril del 2017), en donde, aquellos puntos cercanos al CASO 1, la extracción es mayor pero la altura de cave back está limitada por el proceso de conexión con el sector previamente explotado.

Capítulo III: Análisis de variables operacionales que influyen en la propagación

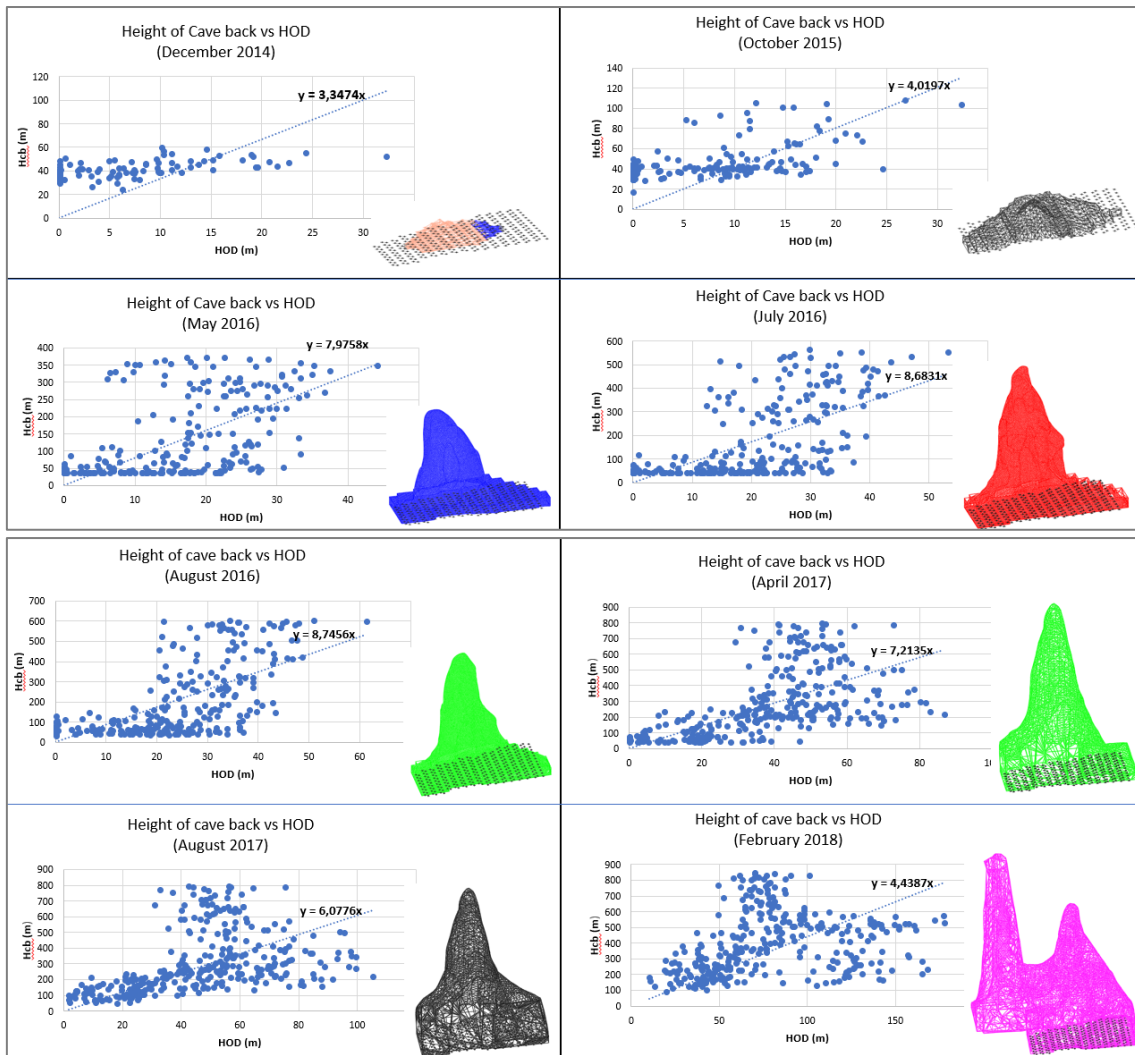


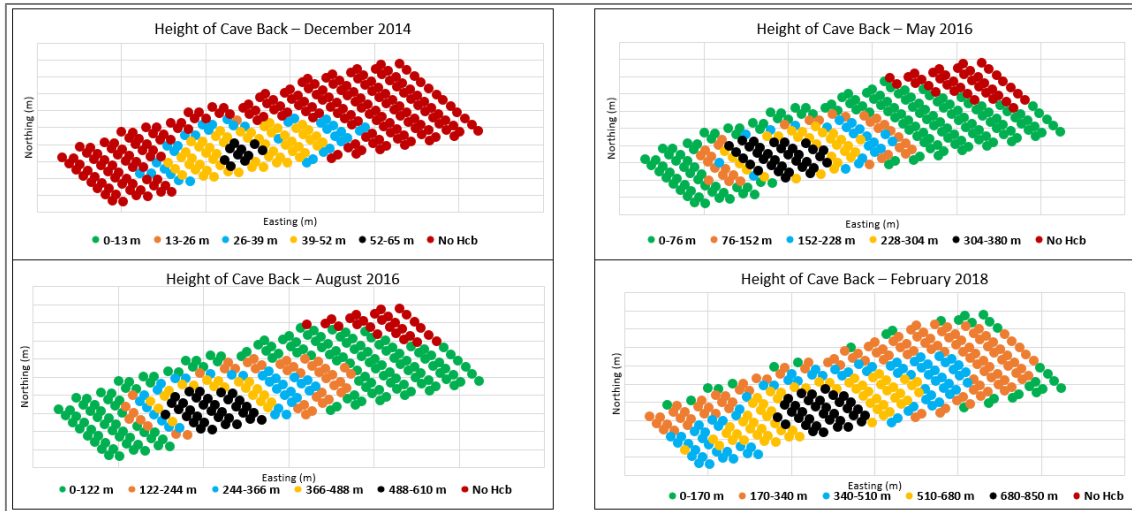
Figura N° 32. Evolución del cave back para 8 periodos donde se tienen mediciones de cave back para el CASO 2.

Tabla N° 4. Altura de cave back y relación HCB : HOD para cada periodo donde existe una medición para el CASO 2.

HCb medido	HCB	HCB : HOD
Dic-2014	60 m	3.35
Oct-2015	100 m	4.01
May-2016	400 m	7.98
Jul-2016	550 m	8.68
Ago-2016	600 m	8.74
Abr-2017	750 m	7.21
Ago-2017	800 m	6.07
Feb-2018	850 m	4.44

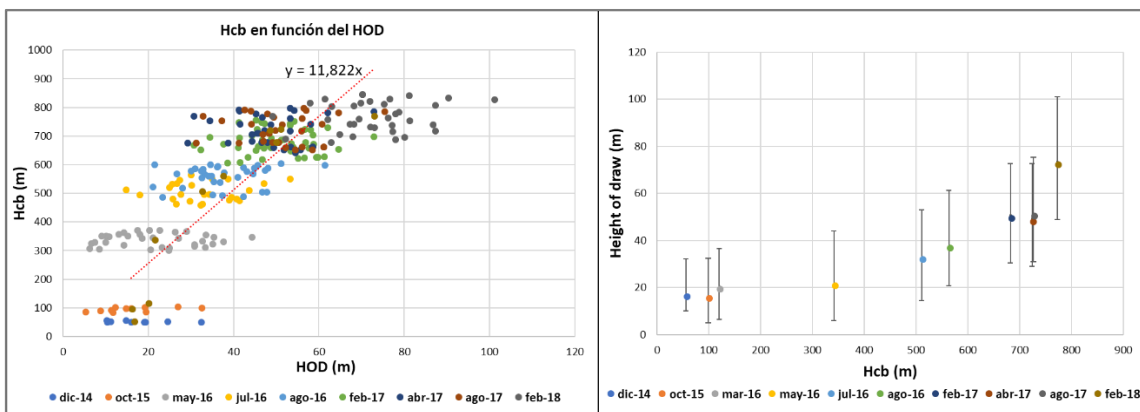
### Capítulo III: Análisis de variables operacionales que influyen en la propagación

Utilizando la misma metodología que para el CASO 1 se realizó un análisis más profundo para la razón HCB:HOD separando aquellos puntos donde el cave back alcanza mayores alturas por periodo de aquellos donde el cave back no propaga tan rápido, la siguiente figura muestra un mapa con aquellos puntos (negro) donde el cave back alcanza una mayor altura.



**Figura N° 33. Evolución de la zona con los puntos de extracción cuya proyección de cave back propaga más rápido.**

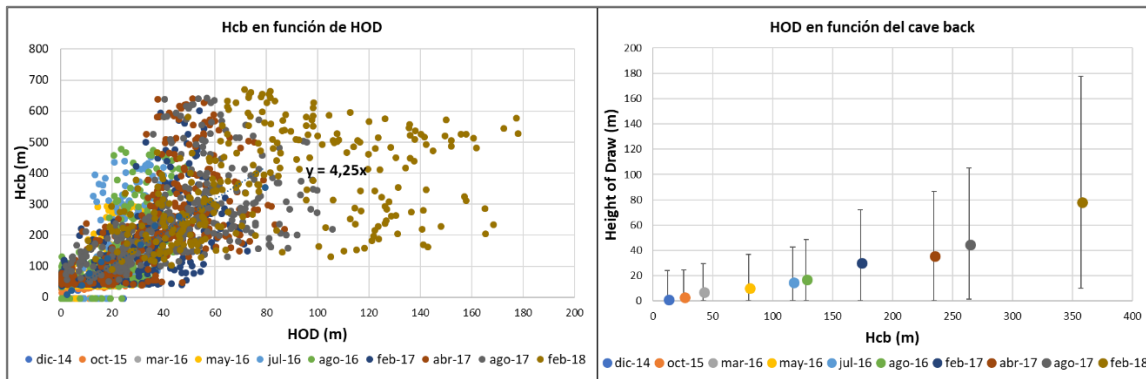
Al calcular la razón entre altura del cave back (HCB) y altura extraída (HOD) para aquellos puntos de extracción dentro de la zona de mayor HCB se tiene que en el área de mayor HCB la relación se vuelve  $HCB : HOD = 12:1$  (Figura N° 34-Izquierda). En la Figura N° 34-Derecha se observa que a partir de los 500 m de altura de cave back la extracción comienza a aumentar significativamente.



**Figura N° 34. Izquierda, Razón HCB:HOD para aquellos puntos bajo la zona de mayor propagación. Derecha, muestra el comportamiento de la extracción a medida que aumenta la altura del cave back para el CASO 2.**

Al realizar el mismo análisis con aquellos puntos que se encuentran fuera de la zona de mayor HCB, se observa que la razón es aproximadamente 4.2:1 como se muestra en la Figura N° 35-Izquierda. Por otro lado, en la Figura N° 35-Derecha no se observan particularidades en términos de extracción, ya que al aumentar la altura de cave back la extracción también aumenta. Una vez que el cave back alcanza los 300 m de altura

Capítulo III: Análisis de variables operacionales que influyen en la propagación  
aumenta la velocidad de quiebre ya que se encuentra dentro de la zona de  
preacondicionamiento.



**Figura N° 35. Izquierda, Razón HCB:HOD para aquellos puntos fuera de la zona de mayor propagación. Derecha, muestra el comportamiento de la extracción a medida que aumenta la altura del cave back para el CASO 2.**

Se observa que a pesar de que el pre-acondicionamiento fue realizado con otra variante la razón promedio entre HCB y HOD fue la misma a la obtenida en el CASO 1. Sin embargo, una variable particular para este caso que no fue cuantificada es la interacción existente con el CASO 1, debido a que dicho sector estaba previamente explotado se generan volúmenes de roca quebrada que facilitan la propagación del caving, además una vez que alcanza los 300 m que es donde inicia el efecto del FH la propagación aumenta, alcanzando razones de hasta 12:1.

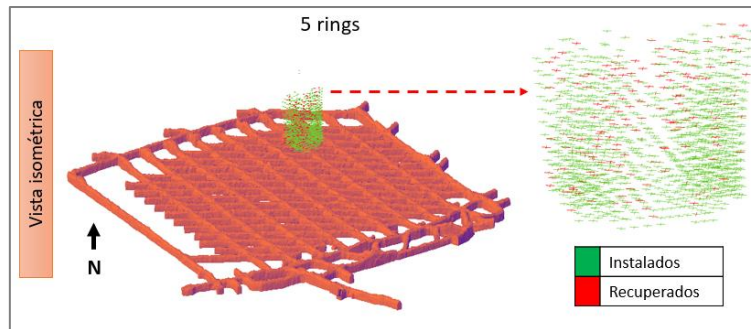
### 3.2. Análisis de extracción casos de estudio

A modo de complementar el análisis de cave back se realiza un análisis de extracción para ambos casos, en términos de leyes y trazadores.

#### 3.2.1. Trazadores de campo cercano CASO 1

De acuerdo a la base de datos 137 trazadores fueron recuperados lo que representa un 12% del total instalado. La Figura N° 36 muestra una vista isométrica de la ubicación de los trazadores instalados (verde) y aquellos que fueron recuperados (rojo). Los trazadores fueron instalados en 5 rings desde el nivel de hundimiento abarcando el área de influencia de dos puntos de extracción.





**Figura N° 36. Vista isométrica de la instalación de trazadores de campo cercano CASO 1.**

Para el análisis de los marcadores se compara la altura a la cual los trazadores fueron instalados con la altura equivalente extraída HOD (Height of Draw), esta última se obtiene a partir del tonelaje acumulado en el cual los trazadores fueron extraídos mediante la Ecuación N° 2.

$$HOD (m) = \frac{Ton}{Densidad \left( \frac{ton}{m^3} \right) \times \text{Área}(m^2)}$$

Donde:

- Densidad: 2.7 ton/m<sup>3</sup>.
- Área: 320 m<sup>2</sup>.
- Ton: En base a información mina se reporta el tonelaje en el cual los trazadores fueron recuperados.

En la Figura N° 37 se observa la comparación entre la altura de instalación de los marcadores y la altura de extracción en la cual fueron recuperados, la condición ideal en términos de planificación sería la pendiente del gráfico (X=Y) la cual representa una correspondencia directa entre el tonelaje extraído y la altura de los trazadores. Los puntos sobre la recta corresponden a aquellos trazadores que fueron recuperados antes, es decir, la altura de extracción HOD es menor que la altura de instalación, por otro lado, los puntos ubicados bajo la recta representan aquellos trazadores recuperados después. Como regla general los trazadores de campo cercano presentan una gran dispersión, pero siguen una tendencia de  $y=0.98x$

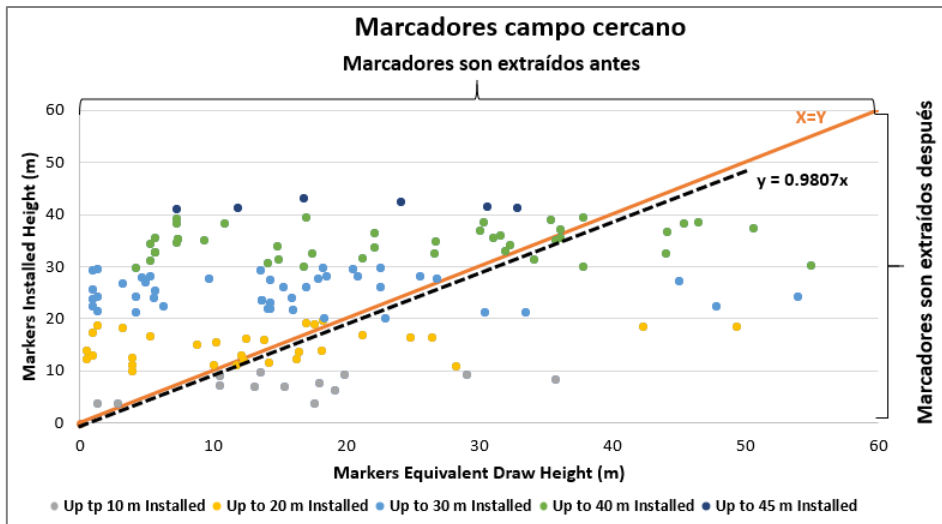


Figura N° 37. Gráfico de dispersión entre la altura de instalación de los trazadores vs la altura de extracción en la cual fueron extraídos para el campo cercano.

### 3.2.2. Trazadores de campo lejano CASO 1

Para el campo lejano se consideran todos aquellos trazadores instalados sobre los 70 m desde el nivel de hundimiento, la información mina contiene un total 1271 trazadores instalados, de los cuales 91 fueron recuperados Figura N° 38. Los trazadores fueron instalados desde las galerías de preconditionamiento por FH ubicada a 400 m sobre el nivel de producción.

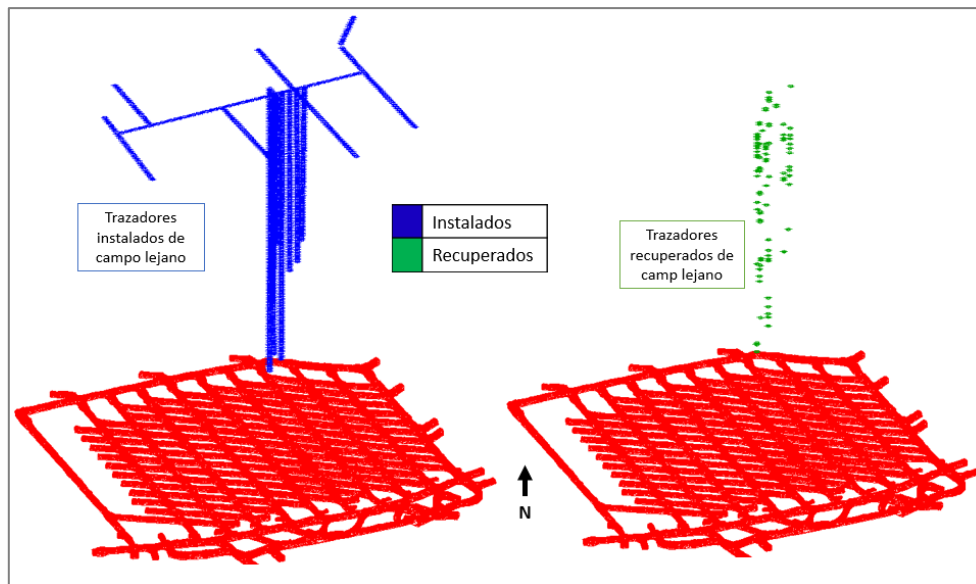


Figura N° 38. Instalación de marcadores de campo lejano para el CASO 1.

En la Figura N° 39 se muestra la correlación entre la altura inicial de los trazadores y HOD, se observa de acuerdo a la tendencia una razón de 1:3 ( $y = 3x$ ), a modo de ejemplo significa que a una HOD= 50 m, los trazadores fueron instalados a 150 m. Por lo tanto, son recuperados mucho antes de lo planificado.

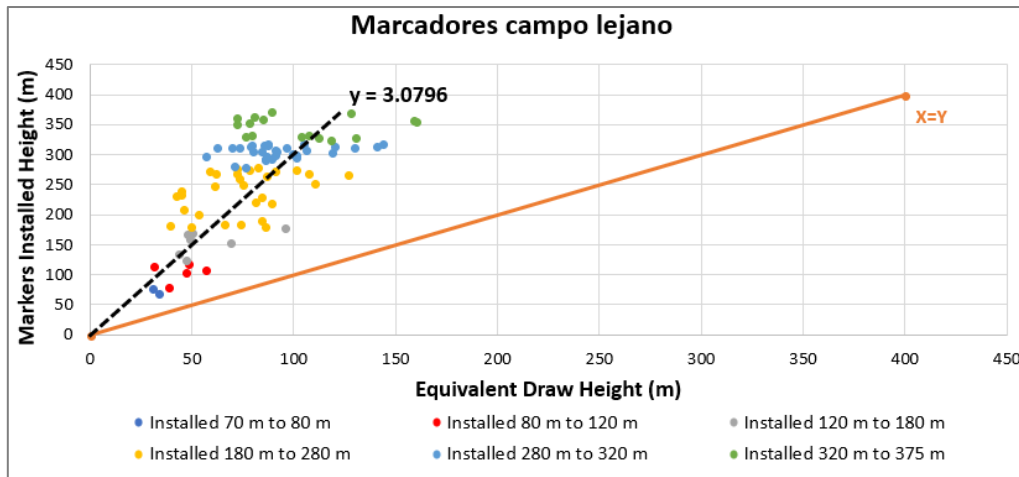


Figura N° 39. Gráfico de dispersión entre la altura de instalación de los trazadores vs la altura de extracción en la cual fueron extraídos para el campo lejano.

Para estudiar la recuperación temprana de los trazadores se evaluó el movimiento de los marcadores al interior de la pila de material quebrado. La Figura N° 40 muestra una vista en planta de la posición en la cual los marcadores fueron instalados (verde), y los puntos por donde estos fueron recuperados (rojo), además se destaca el área de los puntos con mayor extracción, en donde se hubiera esperado la mayor recuperación de marcadores, sin embargo, se plantea la hipótesis de que el desplazamiento horizontal de marcadores se debe al derrame superficial que ocurre al interior de la pila mecanismo conocido como rilling interno.

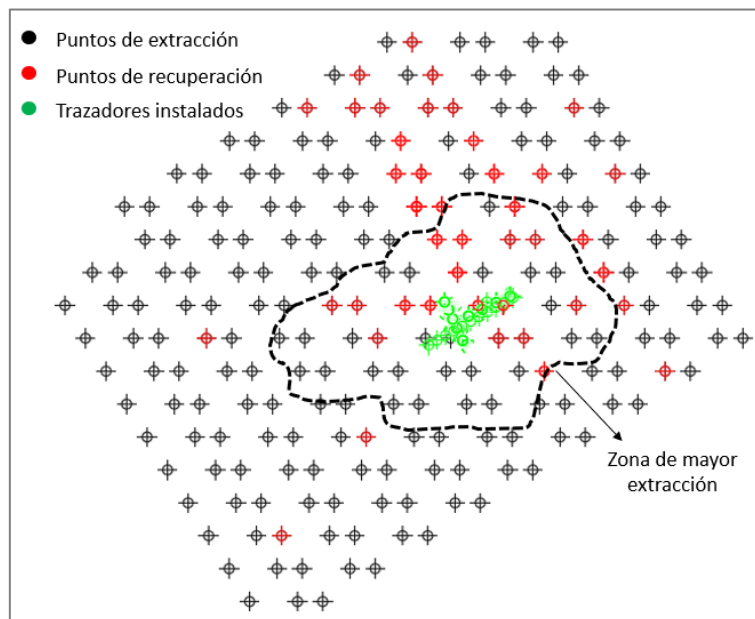


Figura N° 40. Vista en planta de la posición de donde los trazadores de campo lejano fueron instalados y los puntos por donde fueron recuperados.

De los 91 trazadores recuperados, 57 se recuperaron fuera de la zona de mayor extracción (representando el 63%) mientras que 34 trazadores se recuperaron dentro de la zona de mayor extracción (37%). En promedio el desplazamiento horizontal de los trazadores fue de  $64 \text{ m} \pm 34\text{m}$ , alcanzando distancias máximas de 158 m de movimiento.

3.2.3. Trazadores CASO 2

La Figura N° 41 muestra una vista lateral de la ubicación de los trazadores instalados desde el NP del CASO 1. De acuerdo con la base de datos 137 trazadores fueron recuperados lo que representa un 12% del total instalado. Estos marcadores son considerados de campo lejano debido a que la altura se encuentra en un rango entre 80m y 140m.

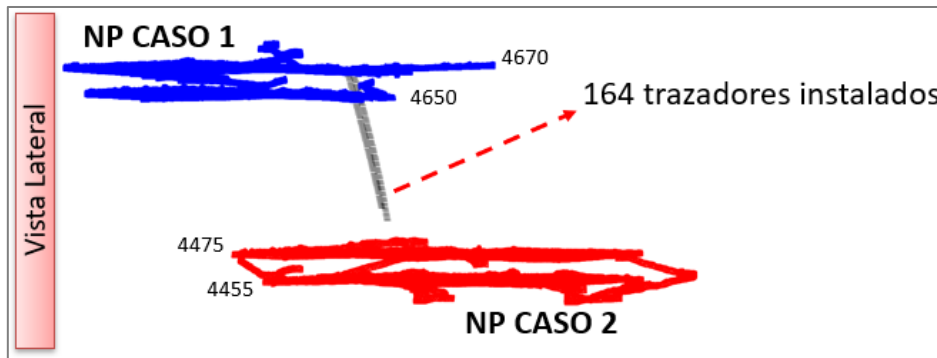


Figura N° 41. Vista lateral con la instalación de los marcadores de campo lejano para del CASO 2.

En la Figura N° 42 se observa que de forma análoga al CASO 1 los trazadores de campo lejano se recuperan mucho antes, ya que la HOD es menor que la altura a la cual fueron instalados.

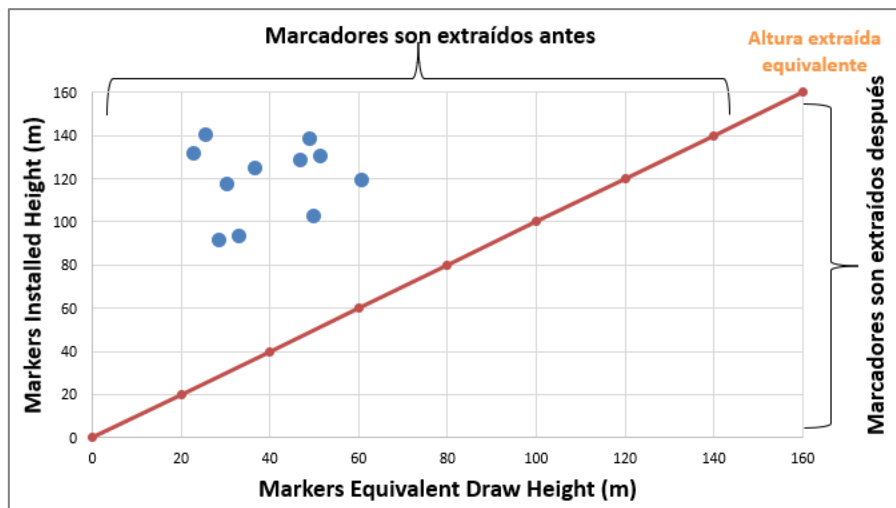


Figura N° 42. Gráfico de dispersión entre la altura de instalación de los trazadores vs la altura de extracción en la cual fueron extraídos para el campo lejano.

Al realizar un análisis sobre el desplazamiento de los marcadores se obtuvo un promedio de movimiento horizontal de  $80m \pm 23m$ . En la Figura N° 43 se observa una vista en planta de la posición en donde los trazadores fueron instalados, en rojo los puntos por donde fueron recuperados. Como se mencionó anteriormente el CASO 2, tiene la característica de que se cambia la orientación de sus calles, por lo cual fue dividido en un CASO 2-East y un CASO 2-West. En donde en este último es sobre el cual todos los

Capítulo III: Análisis de variables operacionales que influyen en la propagación  
trazadores fueron instalados y recuperados y al mismo tiempo existe una interacción con  
el CASO 1.

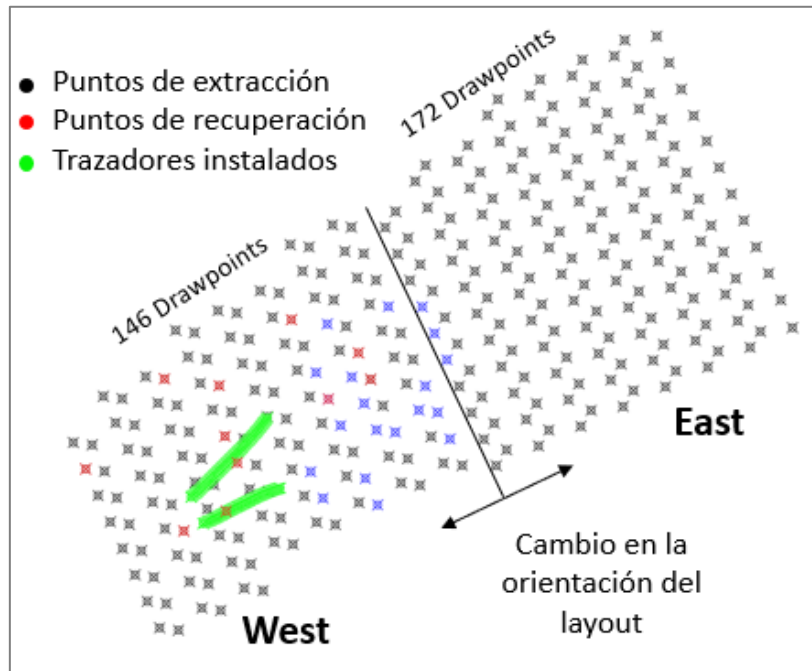


Figura N° 43. Vista en planta de la posición de donde los trazadores de campo lejano fueron instalados y los puntos por donde fueron recuperados.

#### 3.2.4. Leyes in situ CASO 1

Para complementar el análisis de extracción se hace necesario estudiar la distribución y el posible comportamiento de las leyes a ser extraídas, esto permite obtener una tendencia de las leyes en función del tonelaje acumulado o periodo (fecha).

La Figura N° 44 y Figura N° 45 muestran una vista en sección de la distribución de las leyes de Au en el modelo de bloque in situ para el CASO 1. Se observa que la ley de Au in situ disminuye a medida que aumenta la altura de columna. En base esto se podría esperar que la ley de Au decrezca al alcanzar un mayor tonelaje extraído.

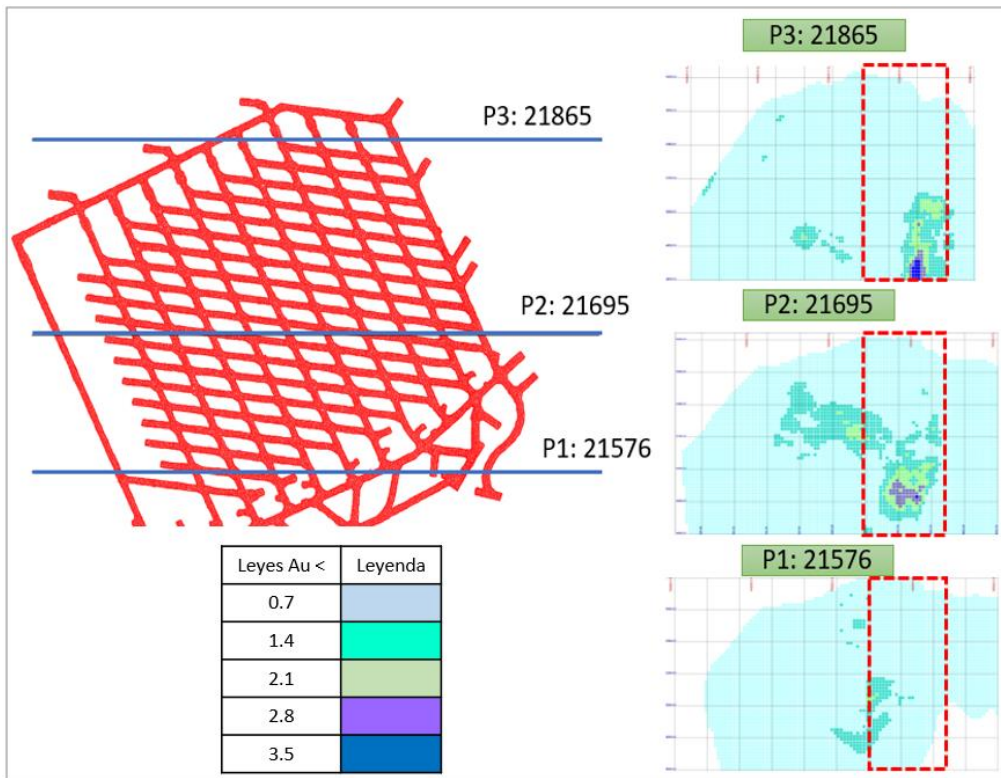


Figura N° 44. Vista de perfil Este-Oeste de las leyes de Au para el CASO 1.

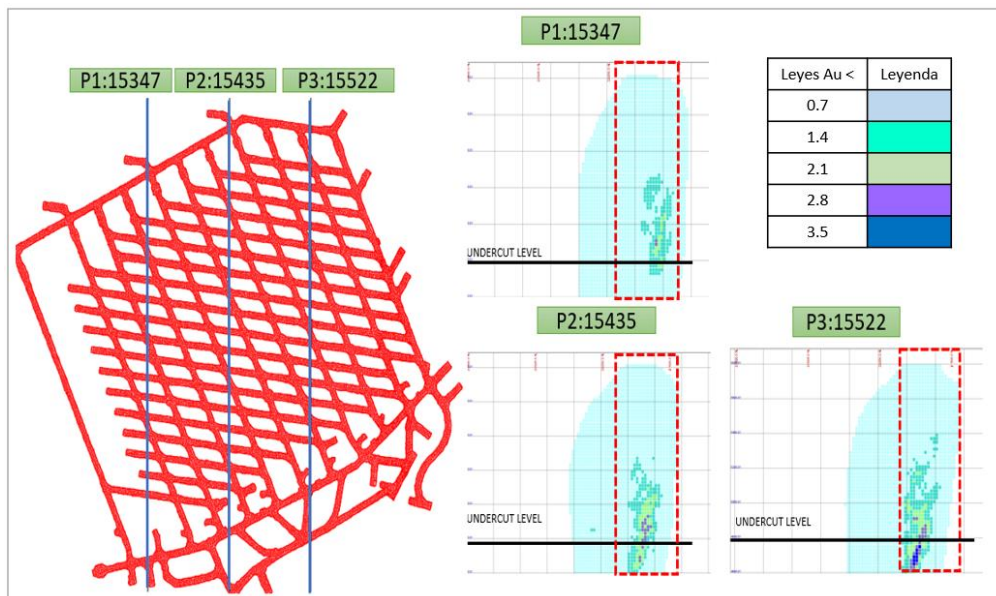


Figura N° 45. Vista de perfil Norte-Sur de las leyes de Au para el CASO 1.

Por otro lado, la Figura N° 46 y Figura N° 47 muestran vistas en sección de la distribución de Cu en el modelo de bloques in situ. Se puede observar que a mayores alturas hay un aumento de las leyes de Cu, por lo tanto, el Cu es un buen indicador de flujo de gravedad de la roca quebrada y puede indicar de donde proviene el material extraído.

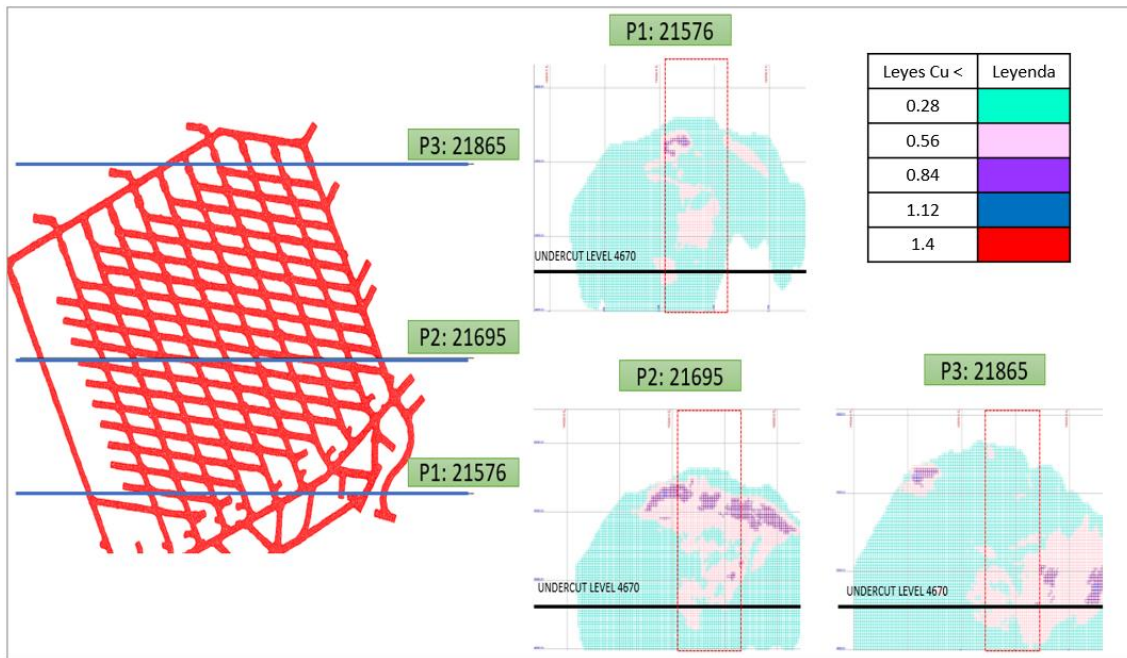


Figura N° 46. Vista de perfil Este-Oeste de las leyes de Cu para el CASO 1.

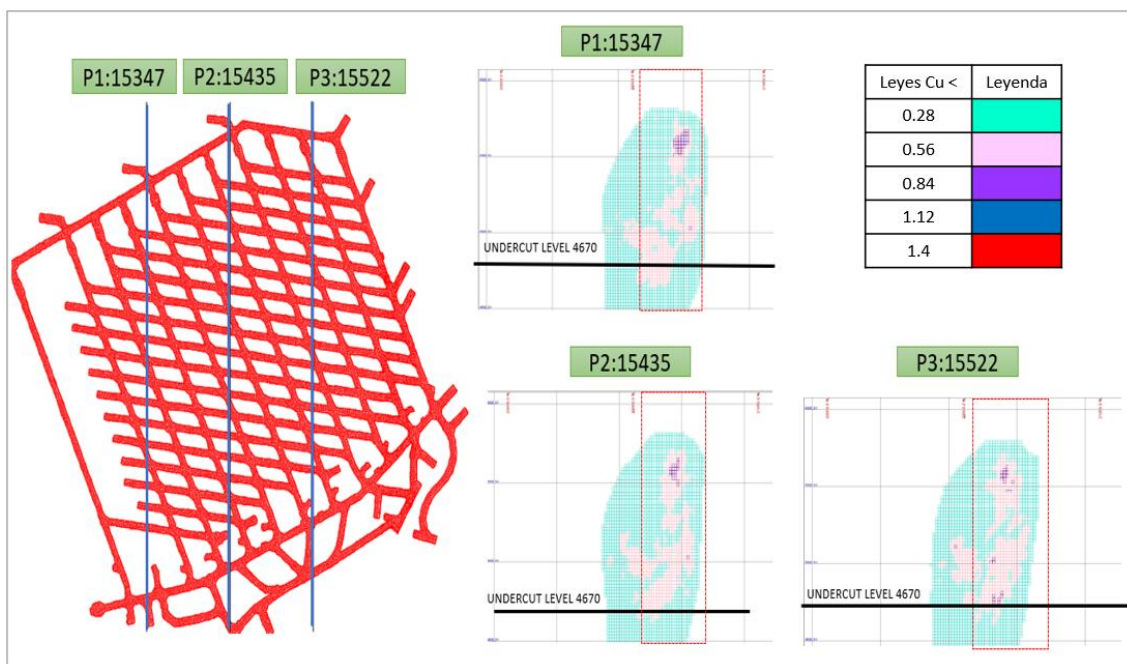


Figura N° 47. Vista de perfil Norte-Sur de las leyes de Cu para el CASO 1.

La Figura N° 48 se compara el comportamiento de las leyes en términos de la altura de columna in situ abarcando toda el área del CASO 1. Se observa una progresiva reducción en la ley de Au a partir de los 280 m, por otro lado, se observa una disminución en las leyes de Cu a los 480 m, para luego volver a incrementar desde los 720m de altura de columna. Se espera por lo tanto que a mayor material extraído la ley de Au disminuya mientras que a de Cu aumente moderadamente. Cabe recordar que, debido a las nuevas normas legales de la compañía minera a cargo de ambos casos de estudio, se omiten los valores de las leyes y periodos de medición de las mismas.

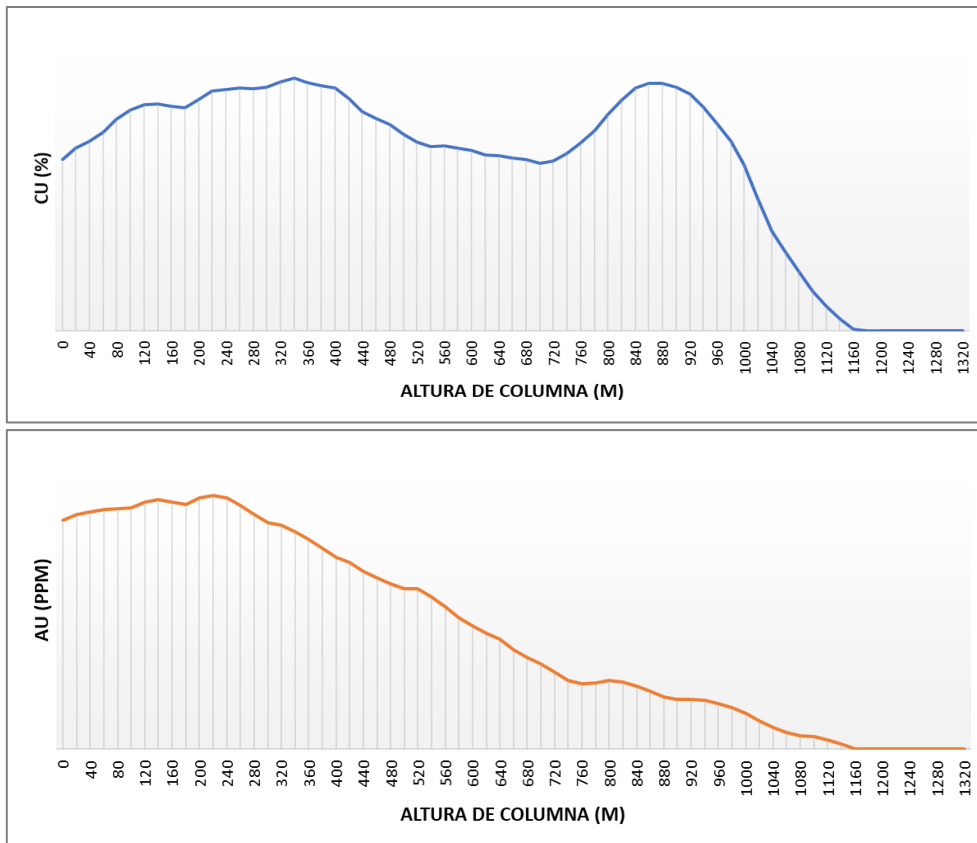


Figura N° 48. Evolución de las leyes de Au y Cu en altura sobre el layout del CASO 1.

### 3.2.5. Leyes in situ CASO 2

De forma análoga al CASO 1 se estudia la distribución de las leyes del modelo de bloques, en la Figura N° 49 y Figura N° 50 se muestra una vista en sección de las leyes de Cu para el CASO 2. Se observa que la ley de Cu in situ se concentra en zonas centrales del modelo de bloques, tendiendo a disminuir de forma moderada al aumentar la altura de columna. En base a esto se podría esperar que la ley de Cu tenga un comportamiento relativamente constante debido a que la disminución de la ley de logra a alturas que hasta la fecha aún no son alcanzadas.



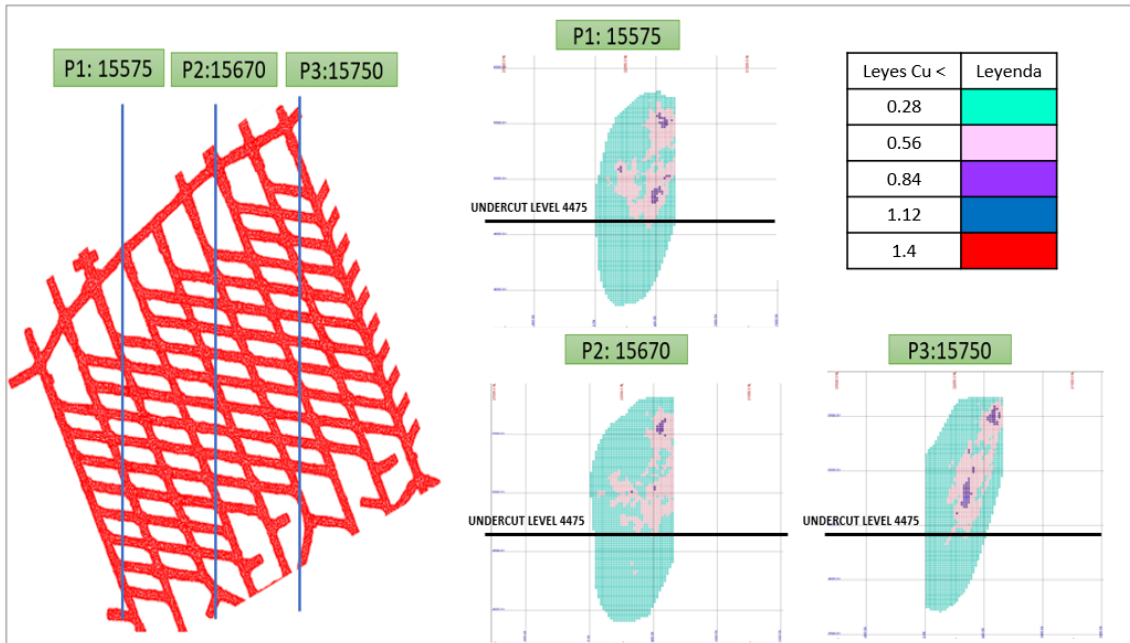


Figura N° 49. Vista de perfil Norte-Sur de las leyes de Cu para el CASO 2.

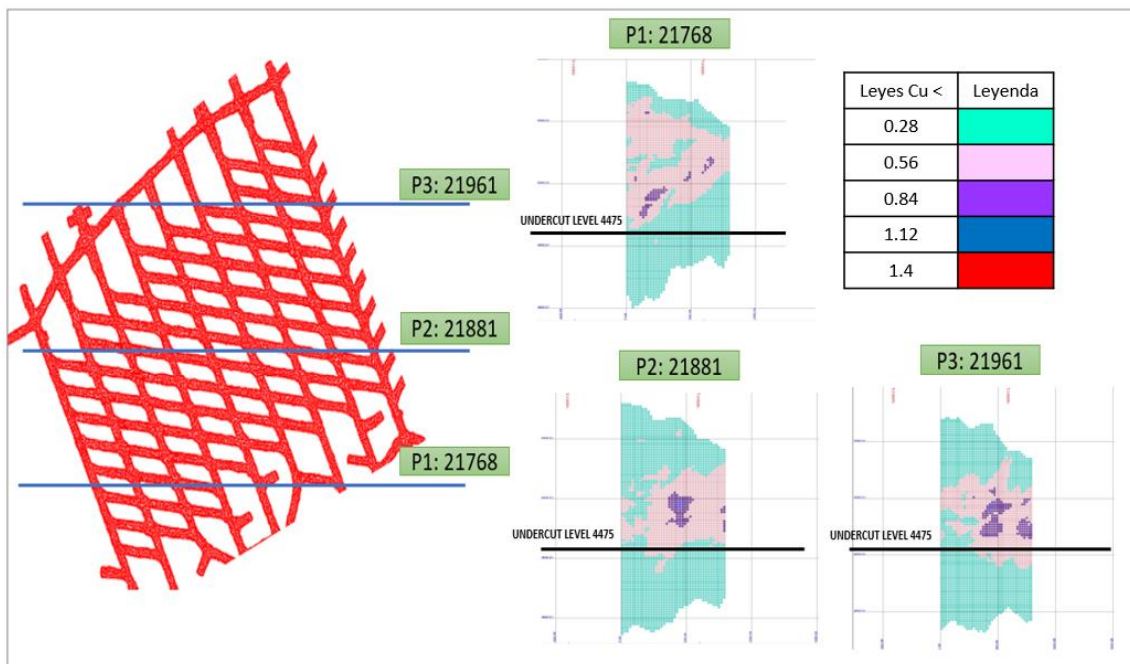


Figura N° 50. Vista de perfil Este-Oeste de las leyes de Cu para el CASO 2.

Por otro lado, la Figura N° 51 y Figura N° 52 muestran vistas en sección de la distribución de Au en el modelo de bloques in situ. Se puede observar que de la misma manera que el CASO 1 a mayores alturas hay una disminución de las leyes de Au.

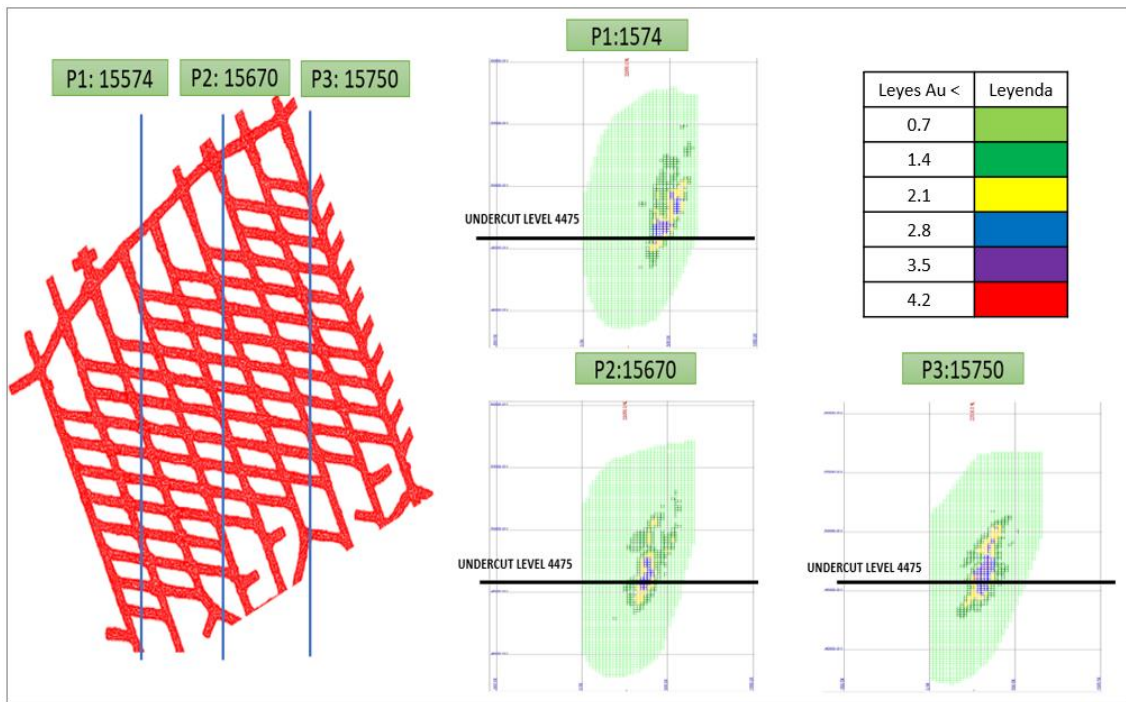


Figura N° 51. Vista de perfil Norte-Sur de las leyes de Au para el CASO 2.

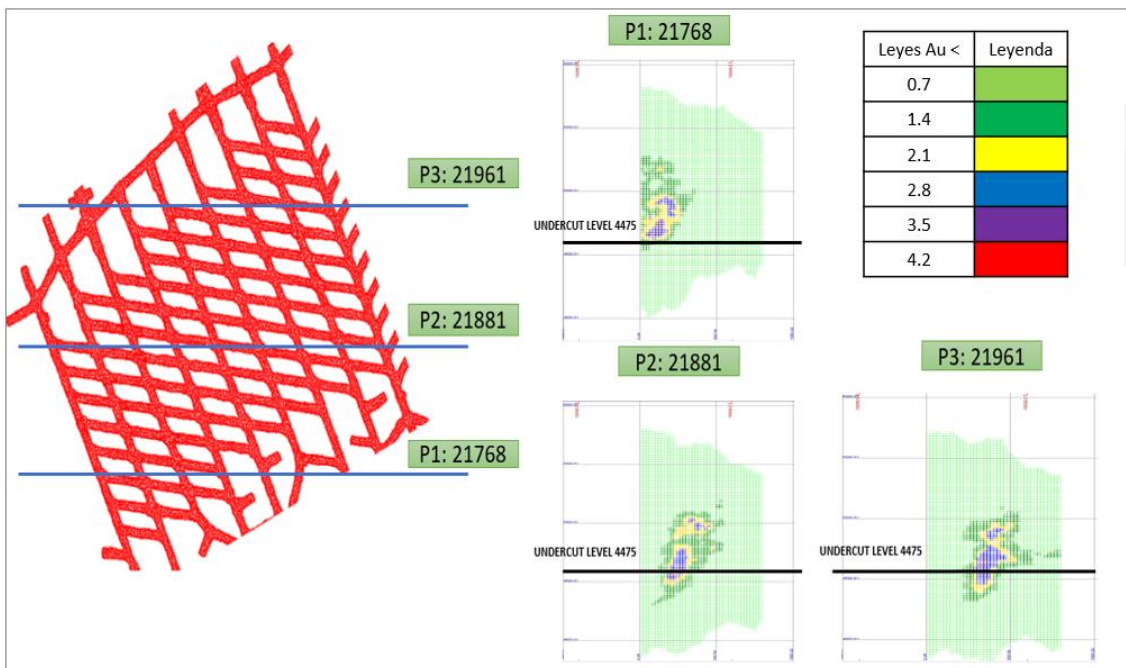


Figura N° 52. Vista de perfil Este-Oeste de las leyes de Au para el CASO 2.

En la Figura N° 53 se compara el comportamiento de las leyes en términos de la altura de columna in situ sobre el layout del CASO 2. Se observa una progresiva reducción en la ley de Au a partir de los 455 m, por otro lado, se observa una disminución en las leyes de Cu a partir de los 575 m, para luego mantenerse relativamente constante hasta 1055 m, en donde vuelve a disminuir. Se espera por lo tanto que a mayor material extraído la ley de Au disminuya mientras que a de Cu disminuya de forma gradual.

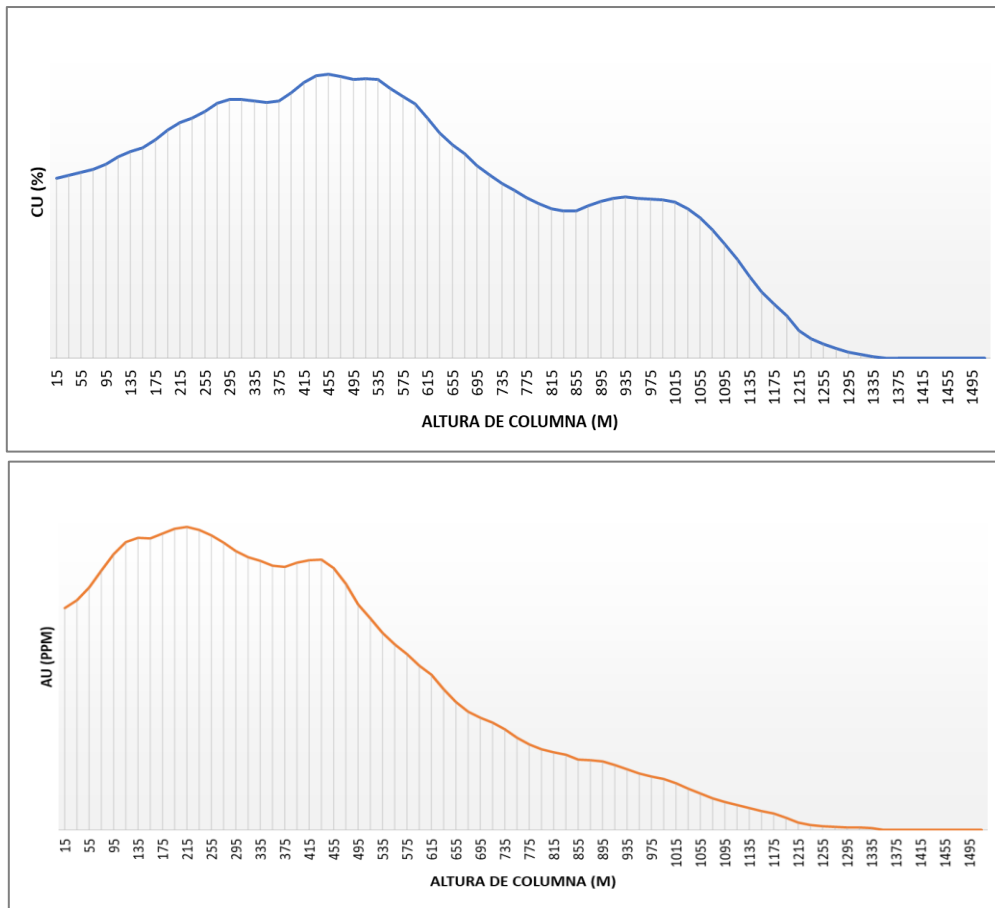


Figura N° 53. Evolución de las leyes de Au y Cu en altura sobre el layout del CASO 2

### 3.3. Conclusiones

A partir de la comparación entre HCB y HOD para el CASO 1, se observa que la extracción por sí sola no explica el comportamiento y forma de propagación del caving, siendo necesario incorporar las estructuras presentes en el macizo rocoso, por otro lado, a partir del análisis realizado en el CASO 2, se confirma de que además de la extracción y el mapeo de fallas y estructuras se hace necesario incorporar la influencia que genera el material quebrado de una cavidad adyacente previamente explotada. En ambos casos existe una razón aproximada a 5 veces la extracción en aquellas zonas pre-acondicionadas donde no existen grandes particularidades (fallas dominantes, o interacción de cavidad).

En términos de extracción con respecto al CASO 1, los trazadores de campo cercano a pesar de que presentan una buena correlación comparado al HOD teórico mostraron una amplia dispersión en términos de tonelaje en el que fueron recuperados. En los trazadores de campo lejano, el resultado muestra que los marcadores se extrajeron mucho antes de lo esperado con respecto a su altura instalada. La altura instalada de trazadores versus el HOD teórico mostró que la altura real era tres veces más alta que el HOD teórico calculado. En términos de desplazamiento, los marcadores mostraron grandes movimientos horizontales de 64 m en promedio. Con respecto al CASO 2, los marcadores

Capítulo III: Análisis de variables operacionales que influyen en la propagación de campo lejano se extrajeron antes de lo esperado mostrando desplazamientos horizontales en promedio de 80 m.

Con respecto al modelo de leyes in situ del CASO 1 se observó una ley decreciente de oro a medida que la elevación aumenta con respecto al nivel de producción. Por otro lado, se espera que las leyes de Cu aumenten en función de la extracción. En el CASO 2, se observa una disminución en las leyes de Au en altura y una distribución constante para el caso del Cu.

En base a los análisis realizados para el CASO 1 y CASO 2 se van a comparar las simulaciones en el simulador FlowSim BC, para testear y validar la incorporación del cave back como un mecanismo fundamental para las herramientas de planificación minera.

## CAPÍTULO IV

### 4. SIMULACIONES EN FLOWSIM BC

En este capítulo se describe el desarrollo de FlowSim BC desde la implementación del nuevo mecanismo de Cave Back y Rilling interno hasta su aplicación en los casos de estudio donde se calibra el simulador en función de leyes y trazadores.

#### 4.1. Implementación del mecanismo de cave shape

Evaluar de forma precisa la iniciación y propagación del caving es de crítica importancia para la planificación de cualquier operación por método de hundimiento. Por esta razón, el uso de modelos estocásticos para simular la extracción, propagación y procesos de subsidencia son cada vez más requeridos.

La evaluación y el modelado de cave back es clave en la minería de block caving ya que influye en la seguridad, la estabilidad de la infraestructura minera y el control de la dilución debido a la trayectoria de la propagación. En FlowSim BC es posible agregar las mediciones del cave back tomadas en terreno y a partir de ello establecer los estados de cada bloque durante las simulaciones.

El código actual considera que el material sobre los puntos de extracción está dispuesto a fluir en cualquier momento, para esto se genera el algoritmo de Cave shapes el cual permite definir bloques en estado sólido fuera de la superficie de cave back, lo que permite restringir los lugares dentro de la columna a partir del cual los bloques pueden fluir. Sin embargo, estos bloques podrán cambiar a un estado granular en un período determinado una vez que el cave back alcance una mayor altura y su interfaz encierre dichos bloques.

En la Figura N° 54 se explica la metodología que sigue el algoritmo de cave shape. Este mecanismo recibe como inputs las superficies de cave back (formato .dxf), cada una de ellas tiene asignado un periodo asociada a la fecha en la cual se realizó esa medición, de forma que todos los bloques sobre la superficie para un periodo  $n$  tendrán estado sólido, mientras que los que se encuentran bajo tendrán estado granular. A medida que la extracción es llevada a cabo se asignan nuevas superficies de cave back cada cierta cantidad de periodos en función del número de mediciones de cave back realizadas en terreno. Cada vez que se llega a un periodo con una superficie de cave back se actualizan los estados de los bloques de sólidos a granular.

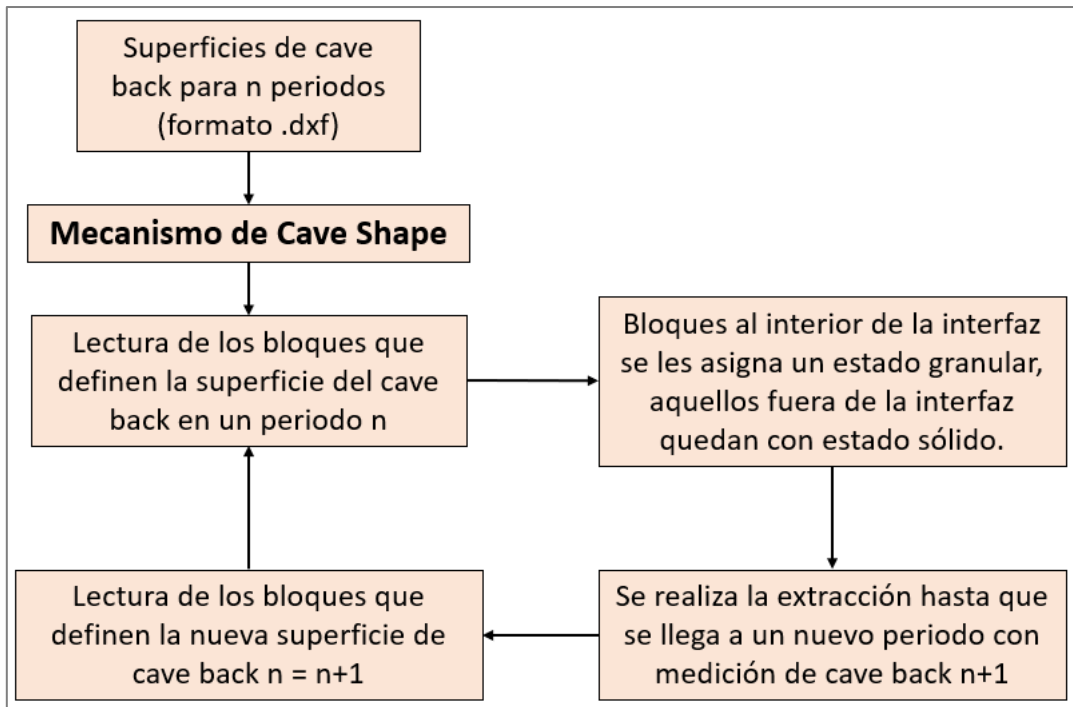


Figura N° 54. Diagrama que explica el nuevo algoritmo de cave back.

Debido a la incorporación del mecanismo de cave back se genera un air gap entre el material granular y la roca in-situ, dicho espacio permite un re-ordenamiento de la roca de material fragmentada debido al progreso de la extracción. Sin embargo, el algoritmo de Cave shape por sí solo no es capaz de representar el desplazamiento del material de la pila, por lo tanto, se complementa con el mecanismo de Rilling interno, el cual da como resultado el movimiento horizontal de la roca cavada considerando el ángulo de fricción sobre la superficie del material granular fenómeno conocido como derrame superficial. En la Figura N° 55 se observa cómo funciona el mecanismo de Rilling donde el material de la pila busca el estado de reposo (ángulo de 45°).

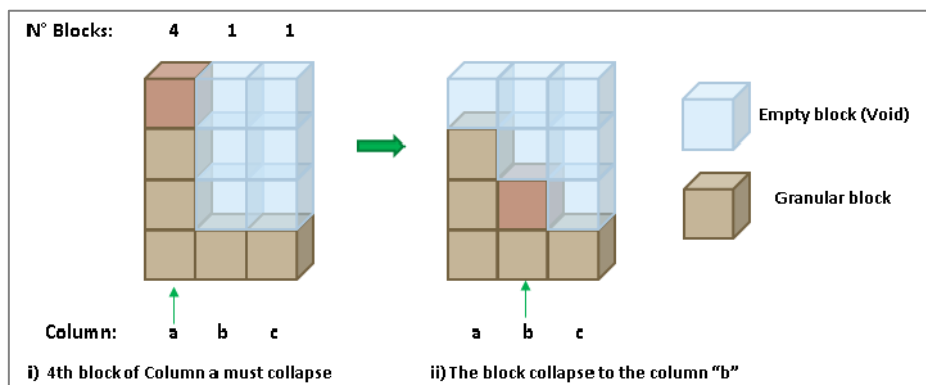


Figura N° 55. Esquema conceptual de Rilling o derrame superficial.

A partir de lo anterior es que FlowSim BC puede emular las principales características de un sistema de block caving siguiendo el modelo conceptual por Duplancic y Brady (1999). Las nuevas características que adquiere el simulador se resumen en la siguiente figura:

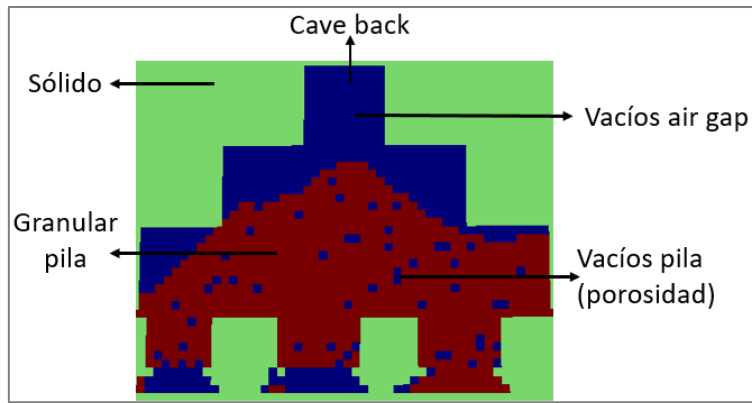


Figura N° 56. Representación de los nuevos estados generados por FlowSim BC (Rojo son bloques granulares, verdes, bloques sólidos que no fluyen y azul son vacíos).

La incorporación de los nuevos mecanismos trae consigo la formación de nuevos estados denominados *vacíos interior pila* los que hacen referencia a aquellos bloques que forman parte del esponjamiento o porosidad dentro de la pila de material quebrado y *vacíos air gap* los cuales conforman el volumen de air gap. En el siguiente capítulo se profundizará en los potenciales que pueden entregar estas nuevas capacidades de FlowSim BC.

## 4.2. Simulación de Smart Markers en FlowSim BC v5.0

Una vez incorporado los mecanismos el siguiente paso en el análisis fue realizar una simulación completa del CASO 1 Y CASO 2, comparando los resultados en términos de marcadores (campo cercano y campo lejano) y leyes de Au y Cu.

### 4.2.1. Análisis de Smart markers CASO 1

La Figura N° 57 muestra el gráfico que representa el tonelaje simulado y el tonelaje real al que se recuperaron los marcadores de campo cercano para el CASO 1. De los 137 trazadores recuperados, FlowSim BC logró predecir la recuperación de 122. En términos de tonelaje, FlowSim BC alcanzó un error promedio de -8,944 toneladas  $\pm$  36,144 toneladas.

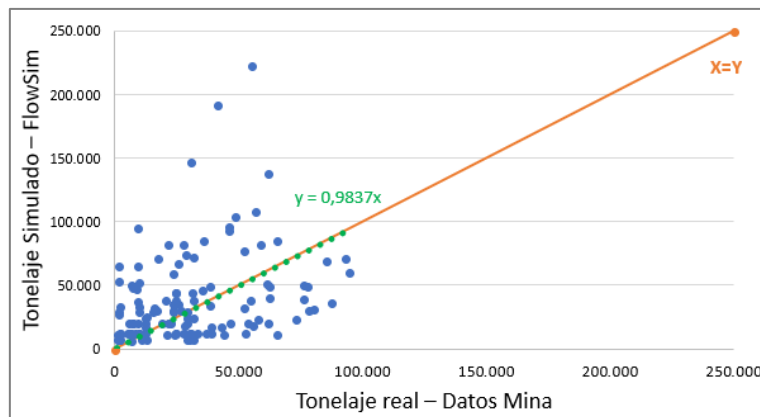


Figura N° 57. Gráfico de dispersión entre el tonelaje real al cual los trazadores de campo cercano son recuperados vs el tonelaje simulado por FlowSim.

Por otro lado, como se muestra en la Figura N° 39 del capítulo anterior, la recuperación de marcadores de campo lejano ocurrió antes debido a que la HOD fue menor que la altura a la cual fueron instalados. Este comportamiento podría ocurrir por un cambio de fragmentación en altura, lo que genera elipsoides de zona de flujo con geometrías más esbeltas permitiendo un descenso acelerado de los marcadores al aumentar la extracción.

Lo anterior se demuestra con datos mina de fragmentación mostrados en la Figura N° 58, donde se encontró que el cave back conecta en superficie al 14% de la extracción, observándose una reducción de la granulometría medida del d80 desde los  $0.62\text{m} \pm 0.3\text{m}$  a los  $0.44\text{m} \pm 0.1\text{m}$ .

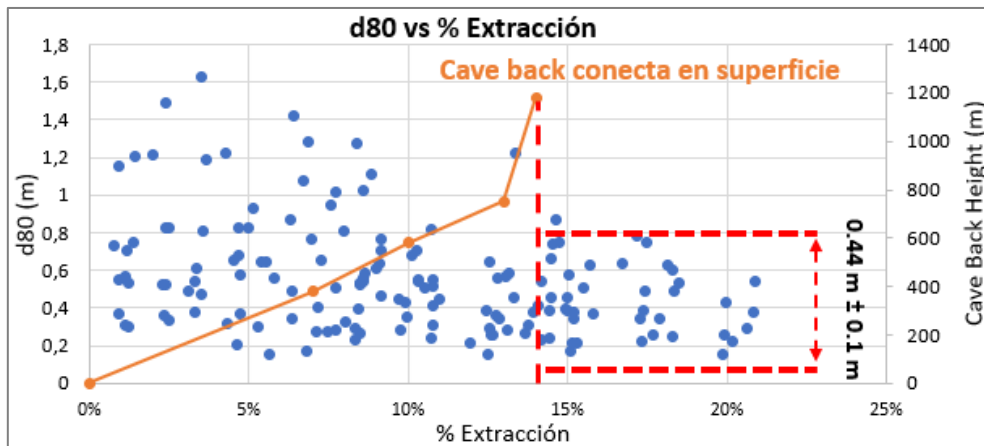


Figura N° 58. Cambio de fragmentación para el CASO 1 una vez que el cave back conecta en superficie.

En función de la granulometría d80 se estimó un diámetro de la zona de extracción de 38m antes del 14% de extracción lo que representa una fragmentación gruesa y un diámetro de 20 m del IEZ sobre el 14% de extracción representando fragmentación fina. Al considerar para el CASO 1 una altura de columna de 1000 m, el cambio de fragmentación estudiado al 14% de extracción se daría a los 140 m desde el nivel de producción.

La Figura N° 59 muestra la correlación entre las simulaciones de trazadores recuperados y los Smart markers en base a las condiciones mencionadas las cuales representan una fragmentación secundaria, se obtuvo que 68 trazadores simulados fueron extraídos de un total de 91 trazadores reales, lo que arroja una precisión global del 75%.



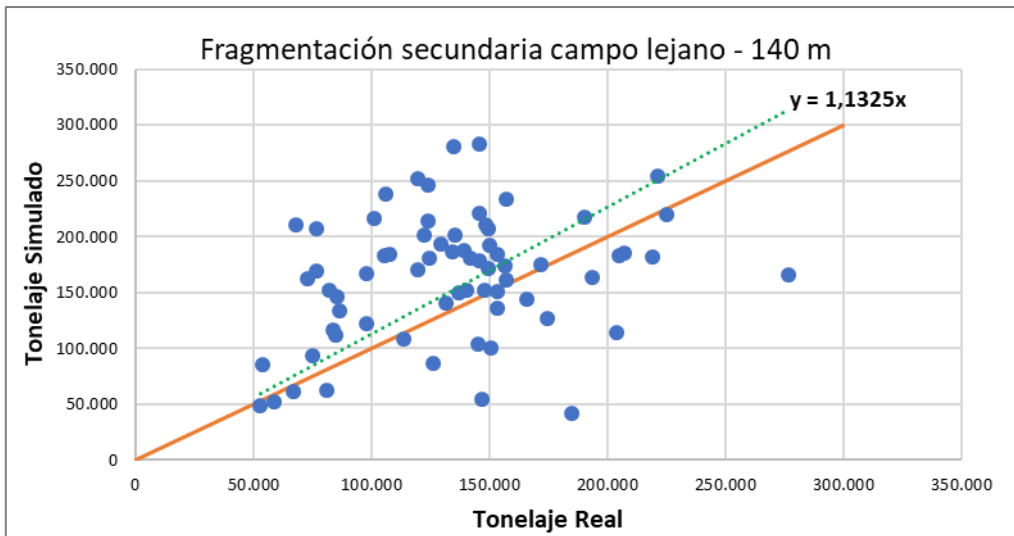


Figura N° 59. Gráfico de dispersión entre el tonelaje real al cual los trazadores de campo lejano son recuperados vs el tonelaje simulado por FlowSim.

#### 4.2.2. Análisis de Smart markers CASO 2

El análisis para los marcadores del CASO 2 se categorizó como campo lejano debido a que fueron instalados por sobre los 70 m entre 80m y 140 m desde el nivel de producción, a pesar de que en base al análisis de altura de extracción de trazadores estos fueron recuperados antes de lo esperado, no existe suficiente información como para establecer una razón de dicho comportamiento, debido a que de los 164 marcadores instalados solo se tienen datos de recuperación de 11 de ellos, a partir de los cuales se buscó calibrar el simulador variando la fragmentación (parámetro n) como se muestra en la siguiente figura, sin embargo, el mejor caso arrojó un match up de solo 3 de los 11 realmente recuperados.

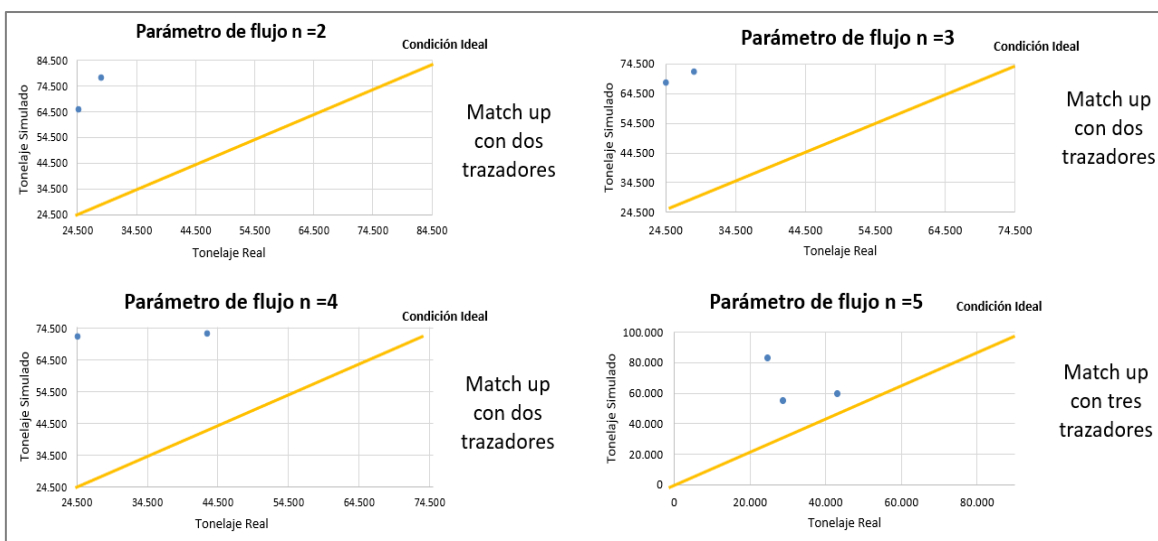


Figura N° 60. Gráficos de dispersión entre el tonelaje real al cual los trazadores de campo lejano son recuperados vs el tonelaje simulado por FlowSim.

Los valores con los cuales se buscó calibrar el valor “n” corresponden a una fragmentación gruesa, ya que a diferencia de lo que ocurre para el CASO 1 no se observa un cambio significativo en la fragmentación, tal como se muestra en la Figura N° 61, el d80 se mantiene relativamente constante en un promedio de  $0.72\text{m} \pm 0.46\text{m}$ . Esto se puede explicar principalmente por dos razones:

- 1) Para el CASO 2, aun no se produce la conexión del cave back en superficie.
- 2) Debido a las diferencias en la técnica aplicada de pre-acondicionamiento.

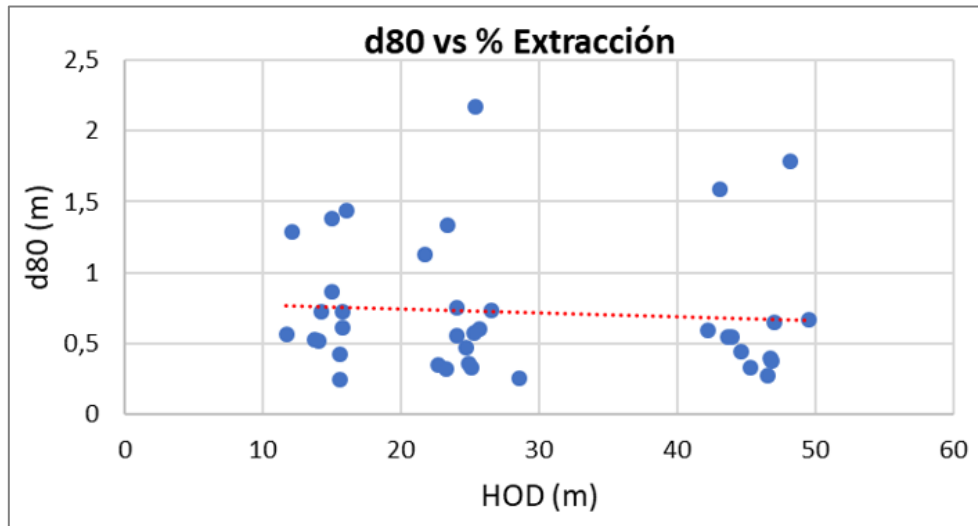


Figura N° 61. Estudio de la fragmentación para el CASO 2.

### 4.3. Comprobación desplazamiento de trazadores

Dado que los marcadores se recuperaron antes del HOD para el caso del campo lejano, se realizó un análisis del movimiento horizontal de los marcadores. En este análisis, la ubicación inicial se encuentra en la posición de instalación, mientras que la posición final está determinada por la ubicación de los puntos de extracción por la cual los trazadores fueron recuperaron. La distancia entre las dos ubicaciones indica el movimiento del marcador horizontal como se muestra en la Figura N° 62.

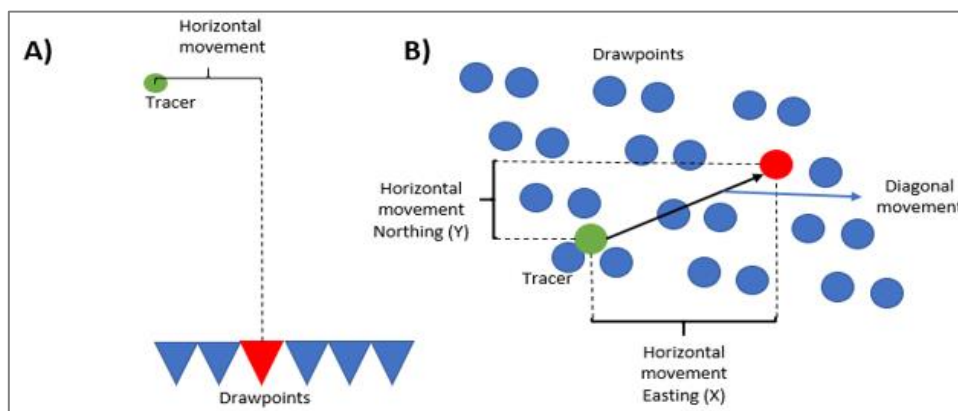
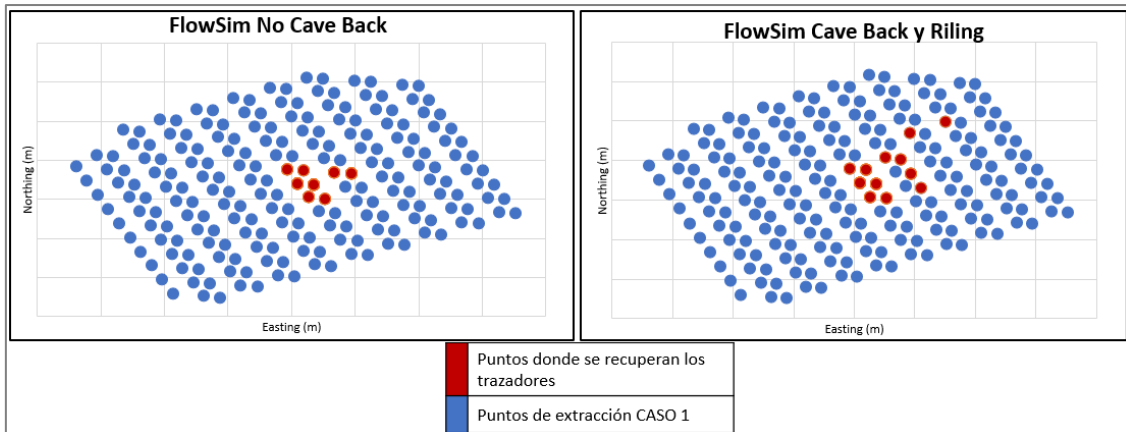


Figura N° 62. Esquema para identificar el movimiento horizontal de los trazadores.

4.3.1. Movimiento horizontal de trazadores CASO 1

A partir del análisis de trazadores de la base de datos se obtuvo un desplazamiento promedio de  $64\text{m} \pm 34\text{m}$ . La Figura N° 63 muestra la comparación entre la recuperación de los trazadores sin el mecanismo de Cave shape y Rilling interno observándose que los puntos rojos se concentran en la zona central del layout donde ocurre la mayor extracción, por otro lado, con la incorporación de los nuevos mecanismos se aprecia que existen puntos por donde trazadores fueron recuperados ubicados hasta dos calles de distancia de la zona de extracción.



**Figura N° 63. Comparación entre el desplazamiento de trazadores recuperados de campo lejano para el CASO 1 con/sin el mecanismo de Cave back y Rilling interno.**

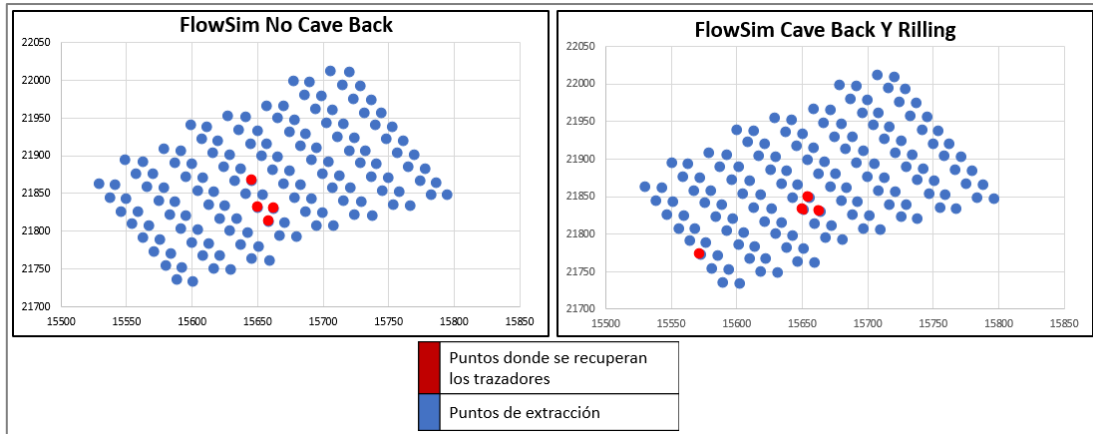
La siguiente tabla muestra un aumento en el desplazamiento desde 9m a 13 m en promedio, a través de 12 puntos de extracción. Si bien es cierto, en promedio el aumento no es destacable, si lo es en términos de que el simulador ahora es capaz de representar el movimiento de flujo que ocurre al interior de la pila de material quebrado.

**Tabla N° 5. Comparación entre el movimiento de trazadores entre FlowSim BC con y sin los nuevos mecanismos para el CASO 1.**

Resultados trazadores	FlowSim No Cave Back	FlowSim Cave Back	Real
Movimiento horizontal	9 m + 7.8 m	13 m ± 9.5 m	13 m ± 9.5 m
Puntos de recuperación	8	12	43

4.3.2. Movimiento horizontal de trazadores CASO 2

De forma análoga ocurre para el CASO 2, donde a partir de la base de datos en promedio  $80\text{m} \pm 23\text{m}$ , a través de 11 punto de extracción fueron recuperados.



**Figura N° 64. Comparación entre el desplazamiento de trazadores recuperados de campo lejano para el CASO 2 con/sin el mecanismo de Cave back y Rilling interno.**

Se observa que para este caso la mejora de FlowSim BC es más destacable pasando de un desplazamiento de 13.2 m en promedio a 23.2 m, logrando recuperaciones en puntos de extracción hasta 3 calles del área en donde estos fueron instalados.

**Tabla N° 6. Comparación entre el movimiento de trazadores entre FlowSim con y sin los nuevos mecanismos para el CASO 2.**

Resultados trazadores	FlowSim No Cave Back	FlowSim Cave Back	Real
Movimiento horizontal	13.2 m + 7.6 m	23.2 m ± 23.5 m	80 m ± 23 m
Puntos de recuperación	4	4	11

Se comprueba la hipótesis de que el desplazamiento de los marcadores y la diferencia entre la altura instalada y la HOD en la cual fueron recuperados se debe al flujo interior de la pila de material fragmentado y el Rilling generado por el espacio de aire entre el cave back y la pila de material quebrado.

#### 4.4. Comparación con leyes medidas en los puntos de extracción

##### 4.4.1. Comparación con REBOP

A modo de validar los resultados de FlowSim BC en términos de leyes se buscó compararlo con REBOP un simulador de flujo el cual también tiene incorporada la capacidad de representar la propagación de caving.

REBOP o “rapid emulator based on PFC3D” (simulador veloz basado en PFC3D) es una herramienta numérica de simulación de flujo de roca fragmentada desarrollada por el ICS y la MMT basada en los mecanismos de flujo observados en PFC3D y posteriores modelos físicos para la simulación de la evolución de los elipsoides de extracción y su interacción (Itasca, 2007). El algoritmo basa su funcionamiento en el crecimiento y propagación del elipsoide de movimiento (IMZ) producto del material que es extraído en el punto de extracción.

El modelo considera la discretización del medio en tajadas con forma de disco, las que componen el IMZ, éstas tajadas pueden crecer debido a la expansión lateral o a la adición de masa proveniente desde una tajada superior. El crecimiento de la IMZ es controlado por el colapso del arco de movimiento (en la vertical) y por la erosión (en la horizontal), además considera que el material puede adherirse desde una zona de menor porosidad a una de mayor porosidad dentro del elipsoide (Paredes, P, 2012). El colapso corresponde al fenómeno en el cual el material de una capa inferior es removido haciendo que el material correspondiente a la capa superior fluya descendentemente ocupando el vacío generado. Si el volumen de ambas capas es el mismo, la superior suplirá el espacio de la inferior completamente, de lo contrario, si el volumen de la capa superior es menor que el de la inferior, el material colapsado que desciende aumenta su porosidad. Por otro lado, la erosión corresponde al fenómeno que ocurre cuando el material que fluye se mueve en contacto con material que no fluye y lo hace comenzar a moverse debido al roce que lo eroda. Para tener un registro del movimiento y calcular las leyes y otros atributos de los elementos que van siendo extraídos, el algoritmo discretiza el medio con marcadores que contienen las propiedades de los bloques que fueron dispuestos antes de comenzar el flujo.

La Tabla N° 7 muestra los archivos o variables que son requeridas en ambas herramientas, además de los archivos de salida y las principales capacidades de cada simulador. Cabe destacar que el objetivo no es buscar cual simulador es mejor que el otro, sino validar los resultados de FlowSim no solo con los resultados a escala mina sino además con respecto a otros softwares ya instalados en la industria y que son ocupados constantemente para la planificación minera.

**Tabla N° 7. Comparación entre FlowSim BC y REBOP**

Herramientas	FlowSim BC	Rebop
Inputs (Archivos y parámetros de entrada)	<p><b>1) Modelo bloques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubicación espacial del centroide (coordenadas)</li> <li>• Tipo de roca (RT)</li> <li>• Densidad</li> <li>• Ley 1 (Cu)</li> <li>• Ley 2 (Au)</li> <li>• Dilución</li> <li>• RMR</li> <li>• Además se requiere ingresar el tamaño de los bloques, el número de bloques y el ángulo de rotación del MB</li> </ul> <p><b>2) Drawpoints</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• DPName (identificador de los puntos de extracción)</li> <li>• Ubicación espacial (coordenadas)</li> <li>• DBID (aquellos puntos de una misma batea tienen el mismo identificador ID)</li> <li>• DBType (Identifica la geometría de la batea, siendo rect1 una batea con dos puntos de extracción o rect2 una batea con solo un drawpoint)</li> <li>• Active (Define con un valor 1 aquellos puntos que están disponibles para la extracción, 0 aquellos que no)</li> </ul>	<p><b>1) Modelo bloques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubicación espacial del centroide (coordenadas)</li> <li>• Período de quiebre (Cave Period), indica el período desde el cual el bloque está dispuesto a fluir.</li> <li>• Leyes (de N elementos)</li> <li>• Densidad sólida del bloque</li> <li>• Porosidad in-situ de material (previa al esponjamiento)</li> <li>• Porosidad máxima del material. Corresponde a aquella que alcanza en la batea.</li> <li>• Ángulo de fricción del material</li> <li>• Diámetro medio</li> <li>• Diámetro medio esperado producto de la fragmentación primaria del bloque. El modelo asume que esta distribución será gaussiana.</li> <li>• Desviación estándar del diámetro</li> <li>• Desviación estándar de la fragmentación primaria del bloque.</li> </ul>

	<p><b>3) Carta de extracción</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• DPName (identificador de los puntos de extracción)</li> <li>• Periodo (Es la fecha de extracción)</li> <li>• Turno (Es un número que representa el número de turnos por día)</li> <li>• Tonelaje (Indica el tonelaje extraído en un determinado periodo)</li> <li>• Dilución (porcentaje que indica el grado de dilución extraído por periodo)</li> <li>• Ley1 (Indica la ley de Au medida en un periodo determinado por cada punto).</li> <li>• Ley2 (Indica la ley de Au medida en un periodo determinado por cada punto).</li> </ul> <p><b>4) Trazadores</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ID (Identificador para los marcadores instalados)</li> <li>• Ubicación espacial de la instalación de los trazadores</li> </ul> <p><b>5) Cave back Period</b> (En FlowSim se ingresan las mediciones de cave back en formato dxf. Por cada periodo donde hay mediciones)</p> <p><b>6) Detalles de la geometría de las bateas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• BellName (Clasifica por tipo de batea, rect1 o rect2)</li> <li>• NumDP (Número de DP por batea, 2 si es rect1 o bien 1 si es rect2)</li> <li>• DDWidth o dpw (Representa el ancho del punto en metros)</li> <li>• DDHeight or dph (Representa la altura del punto en metros)</li> <li>• SideAngle (ángulo lateral o del pilar mayor de la batea)</li> <li>• FrontAngle (ángulo frontal o del pilar menor de la batea)</li> </ul> <p><b>7)</b> Para simular se requiere ingresar los parámetros Cv, m, cota para el cambio de fragmentación en altura y así definir n1 y n2.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• UCS Resistencia a la compresión uniaxial del bloque.</li> </ul> <p><b>2) Drawpoints</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• DPName (identificador de los puntos de extracción)</li> <li>• Ubicación espacial (coordenadas)</li> <li>• DBID (aquellos puntos de una misma batea tienen el mismo identificador ID)</li> <li>• DBType (Identifica la geometría de la batea, siendo rect1 una batea con dos puntos de extracción o rect2 una batea con solo un drawpoint).</li> </ul> <p><b>3) Carta de extracción</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• DPName (Nombre de los DP)</li> <li>• Periods (Se identifican todos los periodos de extracción)</li> <li>• Tonelaje (Representa el tonelaje que se extrae por punto y por periodo)</li> </ul> <p><b>4) Detalles de la geometría de las bateas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• BellName (Clasifica por tipo de batea, rect1 o rect2)</li> <li>• NumDP (Número de DP por batea, 2 si es rect1 o bien 1 si es rect2)</li> <li>• DDWidth o dpw (Representa el ancho del punto en metros)</li> <li>• DDHeight or dph (Representa la altura del punto en metros)</li> <li>• SideAngle (ángulo lateral o del pilar mayor de la batea)</li> <li>• FrontAngle (ángulo frontal o del pilar menor de la batea)</li> </ul> <p><b>5) Trazadores (Opcional)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ID (Identificador para los marcadores instalados)</li> <li>• Ubicación espacial de la instalación de los trazadores</li> </ul>
<p>Outputs (Archivos de salida)</p>	<p><b>1) Results</b> Entrega el tonelaje, dilución y leyes simuladas por punto y periodo de extracción.</p> <p><b>2) Tracers</b> Archivo con la ubicación de los DP donde se recuperan los marcadores y el periodo de extracción</p> <p><b>3) File.out</b> Archivo de visualización que muestra el status de los bloques luego de la extracción.</p>	<p><b>1) Propiedades del caving</b> Entrega los resultados de tonelajes, leyes y dilución extraídos</p> <p><b>2) Propiedades de contorno</b> Es posible examinar las leyes, densidades, porosidad, fragmentación y esfuerzos del modelo de bloque resultante</p> <p><b>3) Movimiento de trazadores</b></p> <p><b>4) Herramientas de visualización del MB, creación de planos y gráficos</b></p>
<p>Capacidades/ Mecanismos</p>	<p>1) Estimación de leyes y dilución 2) Migración de finos 3) Medición de cave back 4) Fragmentación secundaria 5) Flujo preferencial 6) Potencial de estimación de volumen de air gap, cambio de topografía y estimación de porosidad.</p>	<p>1) Estimación de leyes y dilución 2) Migración de finos 3) Esfuerzos en cave back 4) Fragmentación secundaria 5) Estimación de porosidad, ángulos de fricción y diámetros del material extraído.</p>

4.4.2. Simulación leyes CASO 1

La comparación con las leyes de Cu y Au, se realiza con aquellas leyes que fueron medidas en los puntos donde existe información mina. La Figura N° 65 muestra aquellos puntos de extracción en donde existen mediciones de leyes.

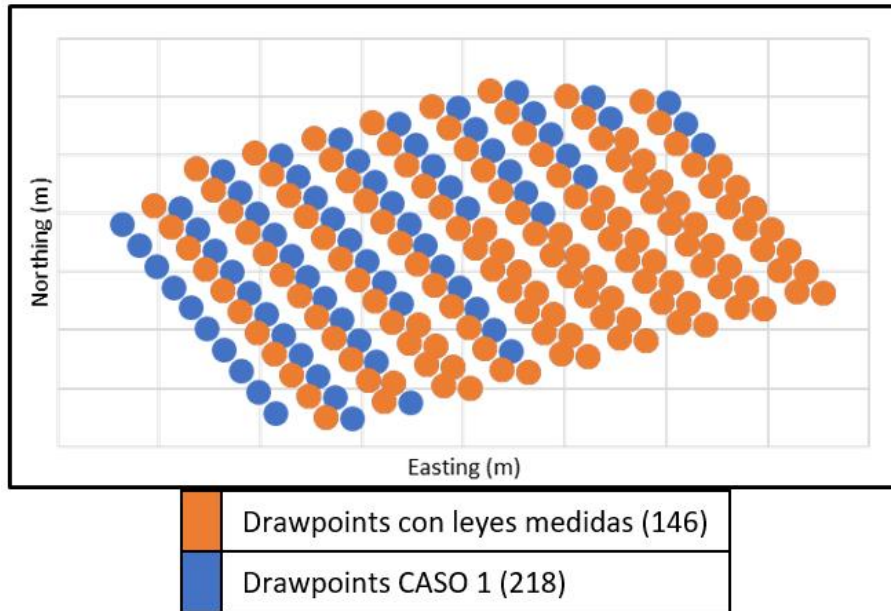


Figura N° 65. Puntos de extracción del CASO 1 donde se hicieron mediciones de las leyes de Cu y Au.

La Figura N° 66 muestra la ley de Au promedio simulada en FlowSim (Azul), REBOP (Verde) con respecto a las leyes medidas en los puntos (naranja). Se observa una tendencia a aumentar moderadamente la ley de Au y en los periodos finales esta comienza a descender.

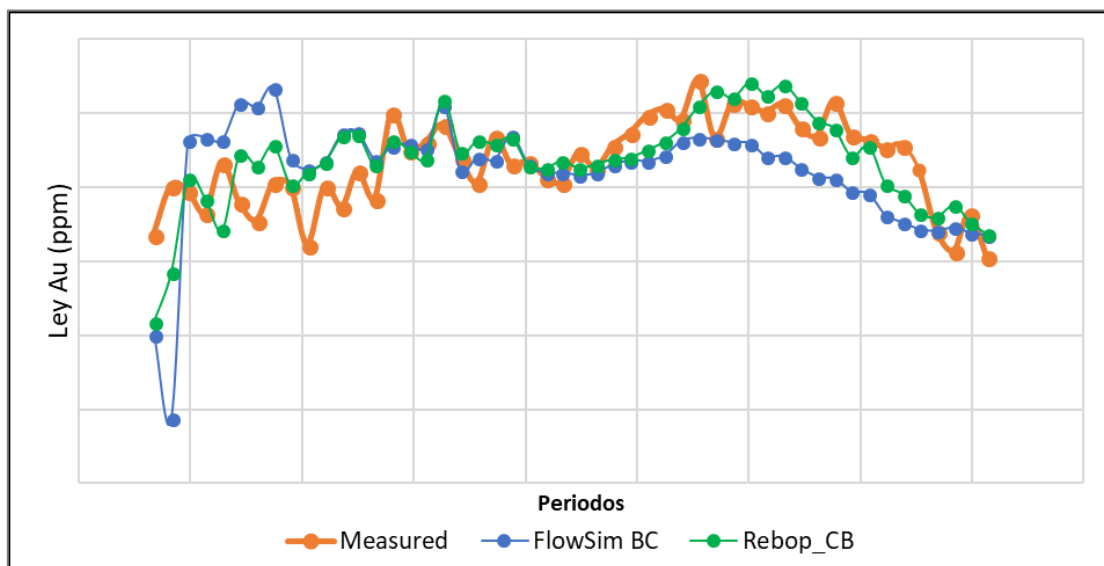


Figura N° 66. Comparación entre la ley simulada de Au en FlowSim, REBOP, y las leyes medidas.

Por otro lado el Cu presenta un comportamiento similar a lo que se había estudiado, ya que las leyes más altas se encontraban a mayores alturas de columnas, por eso a medida que aumenta la extracción la leyes promedios incrementan tal como se muestra en la siguiente figura.

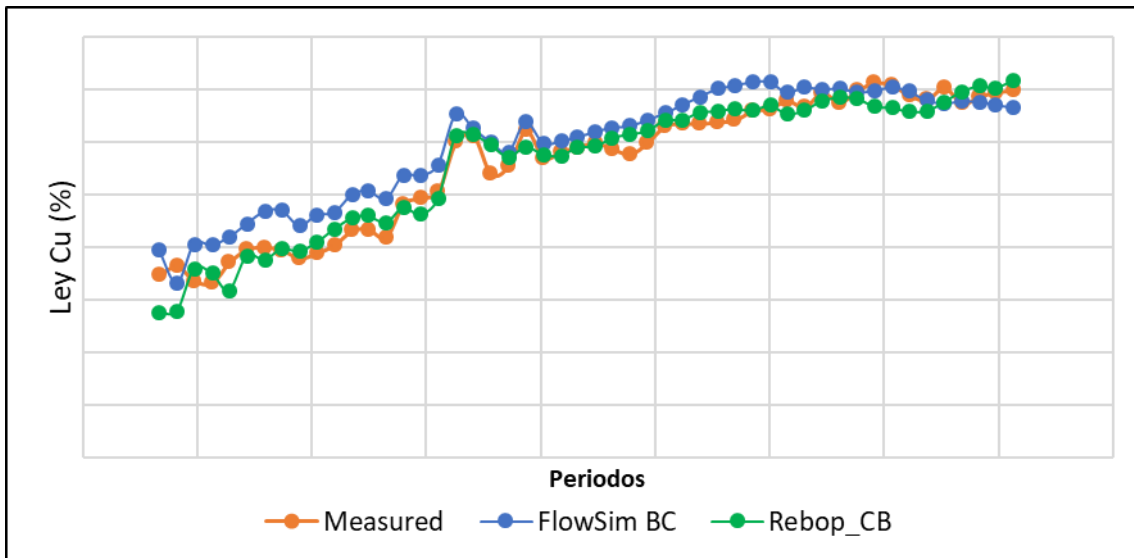


Figura N° 67. Comparación entre la ley simulada de Cu en FlowSim, REBOP, y las leyes medidas.

La Tabla N° 8 resume el error por cada simulador, se observa que en general son errores bajos al compararlos con las leyes medidas y además son capaces de representar las tendencias en el tiempo. Debido a las características de FlowSim BC por su desarrollo en base a un método de autómatas celulares realiza la simulación en menor tiempo que REBOP.

Tabla N° 8. Comparación en términos de error y tiempos de simulación

CASO 1	FlowSim BC	REBOP
Error Au	- 2.8 %	+ 1 %
Error Cu	+ 3.4 %	- 3.4 %
Tiempo de simulación	8.3 h	13.7 h

#### 4.4.3. Simulación leyes CASO 2

Al igual que en los trazadores el estudio se realizó solo en la zona donde existe interacción con el CASO 1, esto principalmente debido a que FlowSim simula dejando las calles zanjadas paralelas al eje x, por lo tanto, no es posible simular un bloque cuyas calles están en distintas orientaciones. De los 146 puntos de extracción en el layout del CASO 2-West existen mediciones de leyes en 130 de ellos.



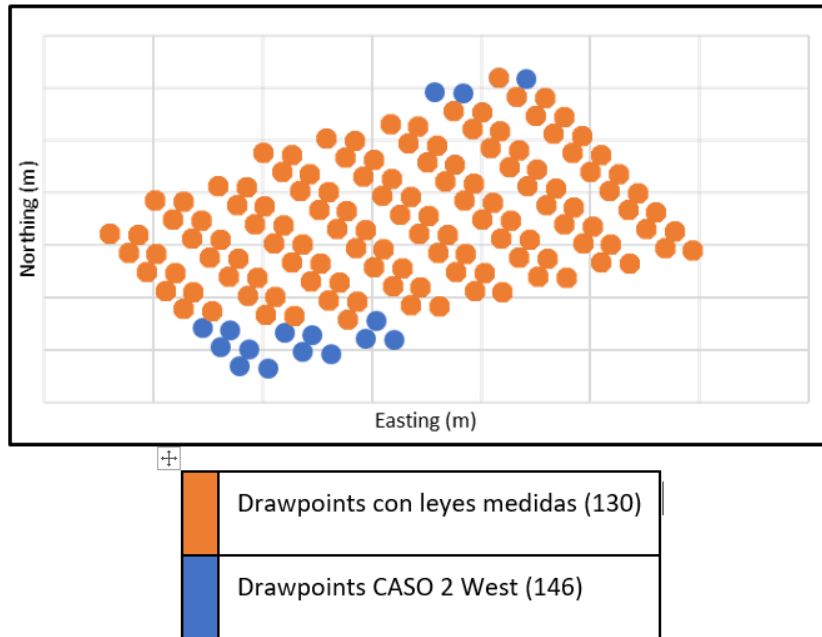


Figura N° 68. Puntos de extracción del CASO 2-West donde se hicieron mediciones de las leyes de Cu y Au.

La siguiente figura muestra que el comportamiento de las leyes en FlowSim y REBOP presentan tendencias similares a las leyes medidas en los puntos, Observándose el inicio de la caída de las leyes en los últimos periodos.

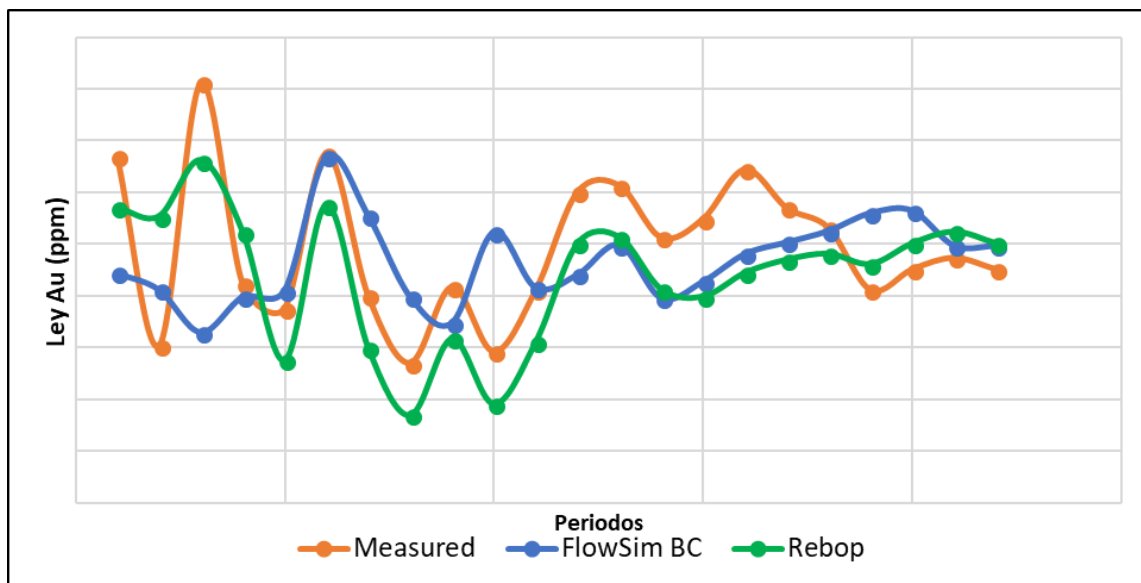


Figura N° 69. Comparación entre la ley simulada de Au en FlowSim, REBOP, y las leyes medidas.

De la misma manera las leyes de Cu se mantienen relativamente constantes en toda la columna, en la siguiente figura se observa que los simuladores siguen una tendencia similar, sin embargo, subestiman las leyes de Cu extraídas en los últimos periodos.

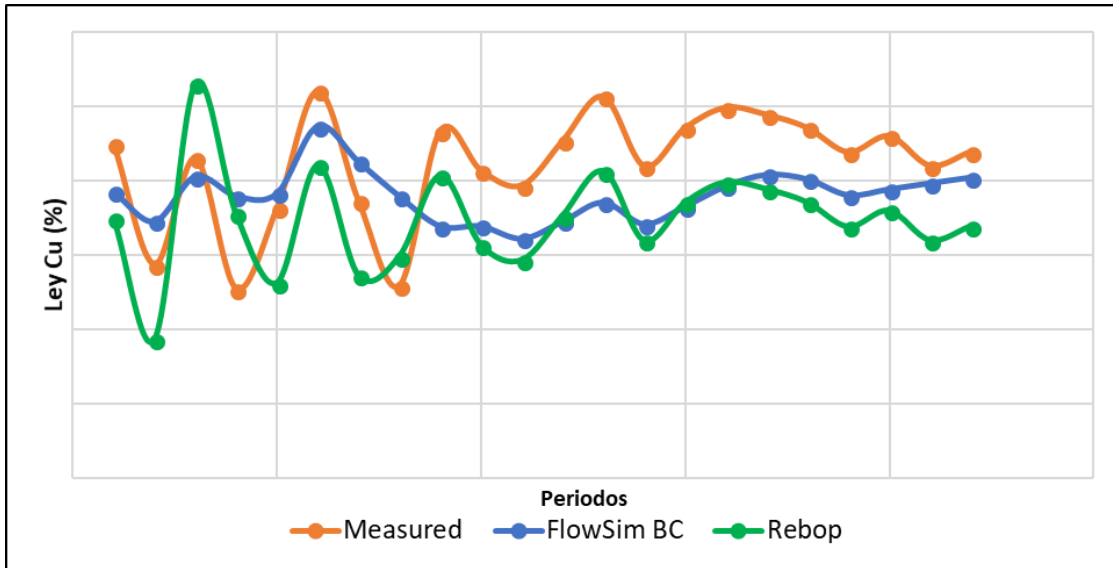


Figura N° 70. Comparación entre la ley simulada de Cu en FlowSim, REBOP, y las leyes medidas.

Finalmente, la Tabla N° 9 muestra que existe un mayor en términos de Cu para ambos simuladores, logrando buenas estimaciones en comparación al Au.

Tabla N° 9. Comparación en términos de error y tiempos de simulación

CASO 2-West	FlowSim BC	REBOP
Error Au	-3.4 %	-2.7 %
Error Cu	-5.6 %	-6.3 %
Tiempo de simulación	7.1 h	11.5 h

#### 4.5. Conclusiones

Se reconoce que la incorporación del cave back al simulador trajo consigo mejoras, las cuales fueron comprobadas a través del análisis de extracción. En términos de leyes fue capaz de predecir el comportamiento del Au y Cu en función de la extracción con errores bajos (menores a un 4% para el CASO 1 y menores a un 6% para el CASO 2), al mismo tiempo se observaron resultados igualmente buenos al utilizar el simulador REBOP, siendo la principal diferencia el tiempo de simulación de 4 horas menos en FlowSim BC. Por otro lado, en términos de trazadores se logró una precisión aceptable en el número de marcadores recuperados, siendo un 75% para el CASO 1, dejando fuera el CASO 2 debido a la baja cantidad de trazadores reales recuperados (11 de 164). Además, se obtiene una buena representación del desplazamiento horizontal de los marcadores recuperados, exigiéndole al simulador obtener el desplazamiento en los mismos puntos de extracción en los cuales los trazadores fueron recuperados en terreno y dentro del mismo periodo.

## CAPÍTULO V

### 5. PROPUESTAS DE MEJORAS

En el capítulo anterior se pone en manifiesto el potencial que entrega la incorporación del cave back, mejorando las antiguas capacidades de FlowSim BC logrando reproducir el desplazamiento de los trazadores de campo lejano, manteniendo las tendencias en las leyes medidas para el Cu y Au.

Considerando la evidencia experimental presentada en la revisión de antecedentes, se descubre que el simulador es capaz de replicar nuevos mecanismos que son fundamentales en los métodos de block/panel caving. En el presente capítulo se plantean propuestas para la implementación de tres nuevos mecanismos los cuales mejorarán los resultados de la simulación haciendo al software más robusto. Las nuevas capacidades surgen gracias a la incorporación del mecanismo cave back y rilling interno los cuales son, la porosidad variable en altura, control del volumen del air gap y cambios de topografía. Cada uno de estos mecanismos están relacionados con las etapas de la propagación del caving, siendo la porosidad y volumen de air gap importantes en la fase de quiebre y los cambios de topografía o subsidencia en la fase de régimen desde que el cave back conecta con superficie. Finalmente, se discuten las limitaciones actuales del mecanismo cave back incorporado en la última versión de FlowSim BC.

#### 5.1. Porosidad

El cave back diferencia dos zonas dentro de la columna de extracción, una sin porosidad (material in situ) sobre la superficie de cave back y otra bajo la superficie con una porosidad tal que permite la movilización del material quebrado. Además, la porosidad varía de acuerdo a la granulometría obtenida en los puntos de extracción en función de la altura de columna desde donde proviene el material debido al proceso de fragmentación secundaria. La fragmentación secundaria es un fenómeno que actualmente varía en intensidad de acuerdo a la altura de columna, es sabido que mientras más alto se encuentre el material sobre la columna, mayor será el efecto de la fragmentación secundaria y por lo tanto mayor también el efecto de reducción de su granulometría (Rojas, 2017). Se puede deducir entonces que, al reducirse la granulometría de acuerdo a la altura, la porosidad también lo hará. Este efecto se observa en una reducción del diámetro de la zona de extracción lo que se condice con una menor porosidad (menos vacíos) que permiten una mayor rapidez en la evolución de la altura de extracción.

Particularmente el algoritmo de porosidad se centra en flexibilizar el parámetro de condición de vacíos,  $C_v$ , dado que este parámetro controla la cantidad de vacíos al interior de la pila granular. La Figura N° 71, muestra como varía la altura de la pila de material quebrado en un determinado periodo en función del parámetro  $C_v$  que se ingresa a FlowSim BC, observándose que un mayor  $C_v$  representa una pila de material fragmentado con mayor porosidad.

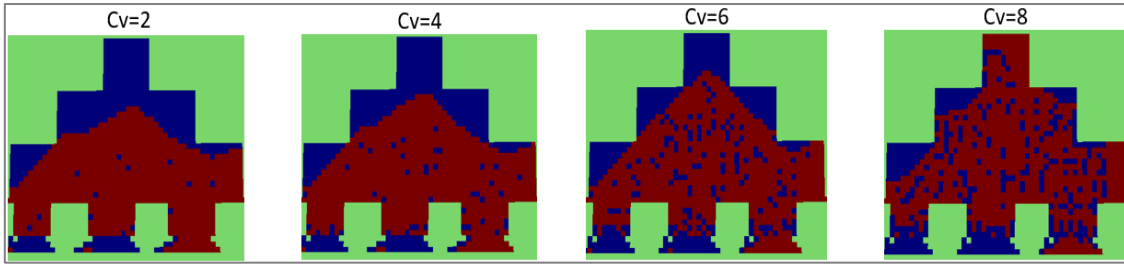


Figura N° 71. Volumen de la pila de material en función de la porosidad, variable que está controlada por el parámetro Cv en FlowSim.

FlowSim BC es capaz de identificar los estados de los bloques actualizando el valor del parámetro Cijk, dependiendo si es granular pila (Cijk = 3), vacíos interior pila (Cijk = 2), vacíos air gap (Cijk = -1), sólidos (Cijk = 1). A partir de lo anterior es posible estimar el valor de porosidad según la siguiente ecuación:

$$Porosidad = \frac{Volumen\ de\ vacíos}{Volumen\ Total} = \frac{Bloques\ vacíos\ interior\ pila}{Bloques\ granular\ pila + Bloques\ vacíos\ pila}$$

Ecuación N° 6. Relación para calcular la porosidad de la pila de material quebrado.

Como se mencionó anteriormente Cv debe depender además de la fragmentación del material. Es bien sabido que los fragmentos gruesos tienen una porosidad mayor que la roca fragmentada fina. Un parámetro relacionado a la fragmentación y porosidad es la densidad aparente de la pila de material quebrado, la cual se calcula según la Ecuación N° 7. Donde un material grueso tiene una densidad aparente mucho menor que un material fino. Por lo tanto, debe existir una relación entre Cv con el parámetro de flujo N el cual representa la fragmentación secundaria, dicha relación debe ser calibrada asignando valores de Cv para roca gruesa y para fragmentación fina (en función de n1 y n2). En la Figura N° 72, se observan los valores que puede tomar FlowSim BC en términos de porosidad y densidad aparente considerando una roca con densidad de 2.7 [t/m³] variando el parámetro Cv entre 1 y 9, los cuales corresponden al valor mínimo y máximo a ajustar.

$$\rho_{ap} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = \frac{\rho_s \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{1 + Porosidad}$$

Ecuación N° 7. Densidad aparente del material quebrado.

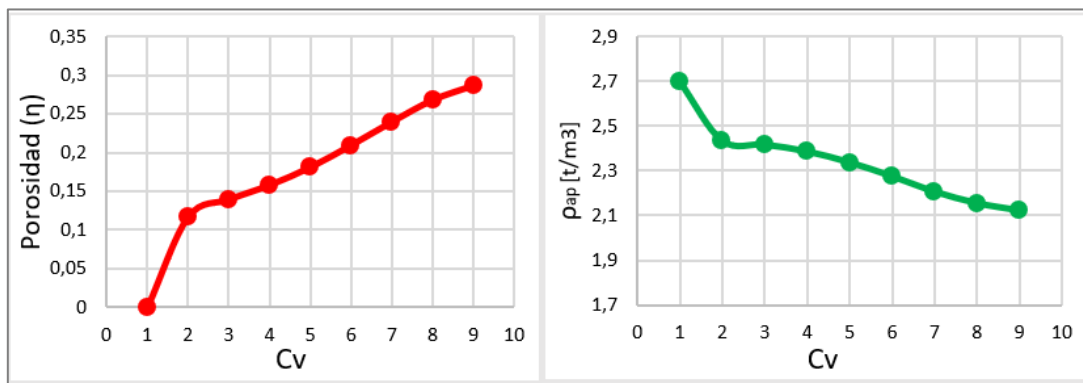


Figura N° 72. Izquierda, Variación de la porosidad en función del parámetro Cv. Derecha, Variación de la densidad aparente en función de Cv.

El siguiente esquema muestra la metodología para calibrar el parámetro  $C_v$  en función de la fragmentación. Cuando existe una variación de fragmentación en altura el parámetro  $N$  toma distintos valores dependiendo si es grueso o fino. El objetivo es ajustar valores a  $C_v$  para cada tipo de fragmentación determinado así una porosidad variable en altura de la pila de material quebrado.

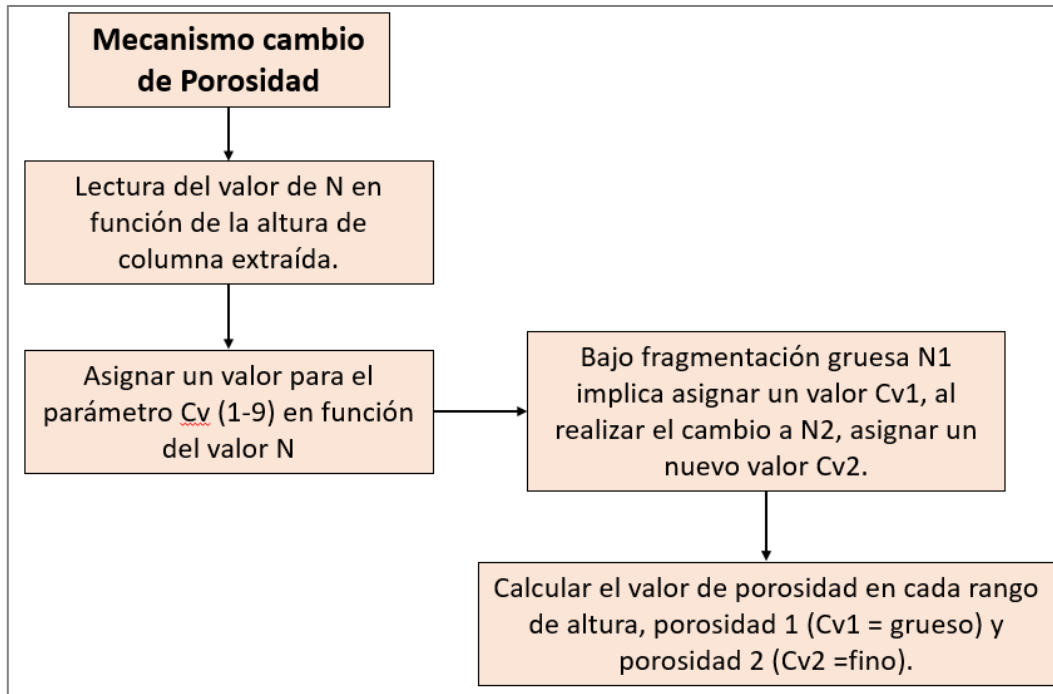


Figura N° 73. Diagrama de la metodología para la calibración y estimación de la porosidad

## 5.2. Control de air gap

Como se explicó anteriormente una de las importancias de la propagación de caving durante la fase de quiebre es controlar el espacio de aire entre el cave back y la pila de material quebrado para disminuir los riesgos de air blast. Las principales variables que influyen en el volumen de air gap son la velocidad de quiebre, la fragmentación del material y la extracción.

Gracias a la implementación del cave back FlowSim BC tiene la capacidad de estimar el volumen de air gap, en cada periodo con medición de cave back. Dicho volumen queda en función de las características del material hundido, es decir, en material con fragmentación gruesa que está asociado a una porosidad mayor, lo que significa un menor volumen de air gap y viceversa. La Figura N° 74 muestra la relación existente entre la porosidad ( $C_v$ ) y el volumen de air gap para una roca característica de fragmentación constante con densidad  $2.7 \text{ [t/m}^3\text{]}$ .

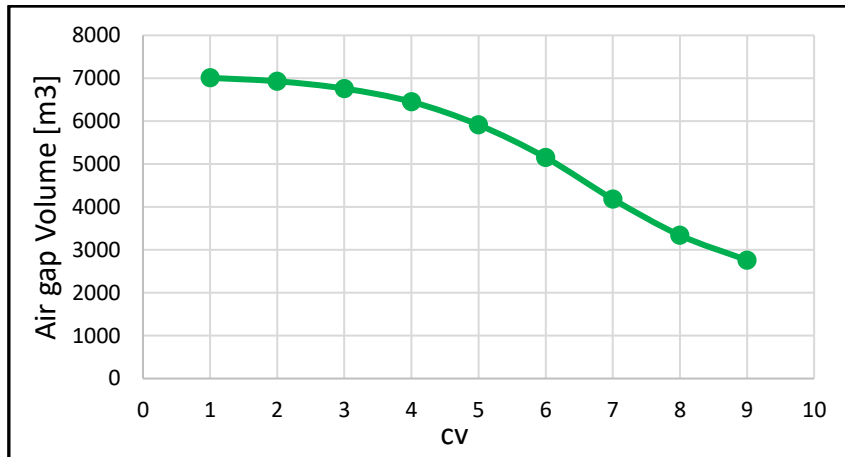


Figura N° 74. Variación del volumen de air gap en función del parámetro Cv.

Dado que el parámetro Cijk vale -1 cuando identifica vacíos pertenecientes al air gap, es posible calcular un volumen de air gap para cada periodo con extracción sumando todos los valores con código -1, debido a que para un mismo cave back existen varios periodos de extracción, se puede evaluar el aumento del volumen de air gap analizando los riesgos de air blast una vez que el espacio supera un volumen crítico de aire.

### 5.3. Cambios de topografía

Desde que el caving conecta en superficie comienza a generarse el proceso de subsidencia, el cráter originado por la extracción se comienza a rellenar con material que se desprende de la superficie, el cual se moviliza hasta alcanzar su ángulo de reposo. La nueva topografía pasa a estar formada por la pila de material granular y esta variará en función de la extracción periodo a periodo.

La Figura N° 75 muestra una sección en el software SGeMS de una simulación en FlowSim BC, se observa para un periodo el comienzo del hundimiento y la topografía inicial, y luego un periodo con el cave back conectado formándose el cráter de subsidencia. Gracias al mecanismo de Rilling es posible reposicionar de los bloques en la superficie debido al colapso de los bloques vecinos que se encuentran en las columnas que exceden la diferencia permisible en ángulos mayores al de reposo (45°).

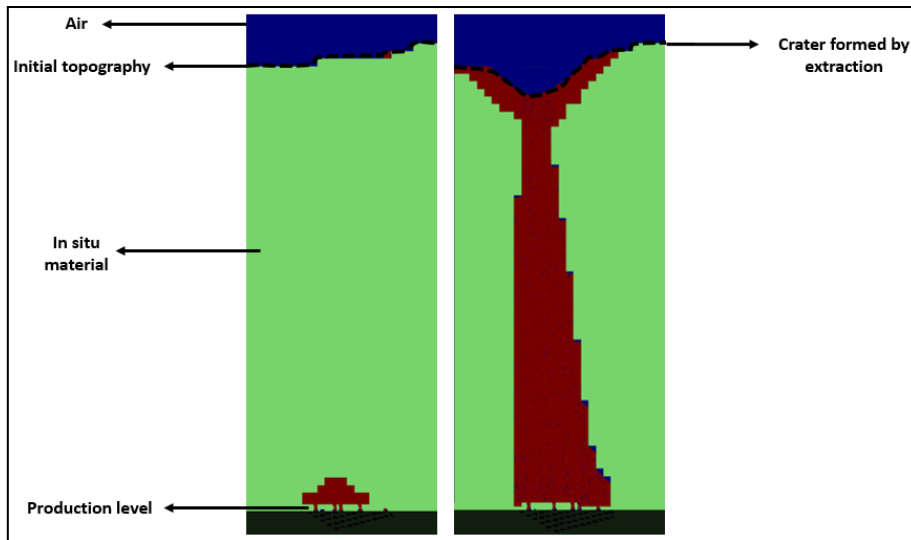


Figura N° 75. Cambio en la topografía debido a la conexión del cave back en superficie.

Una vez que la topografía conecta con el material quebrado es posible medir la altura desde los puntos de extracción hasta la superficie y calcular cuánto descende la topografía en metros por periodo en función de la extracción, aplicando el mecanismo de Rilling para acomodar los bloques. La Figura N° 76 muestra la metodología a seguir para calcular la altura hasta la topografía en cada periodo a modo de analizar el descenso de la superficie en función de la extracción.

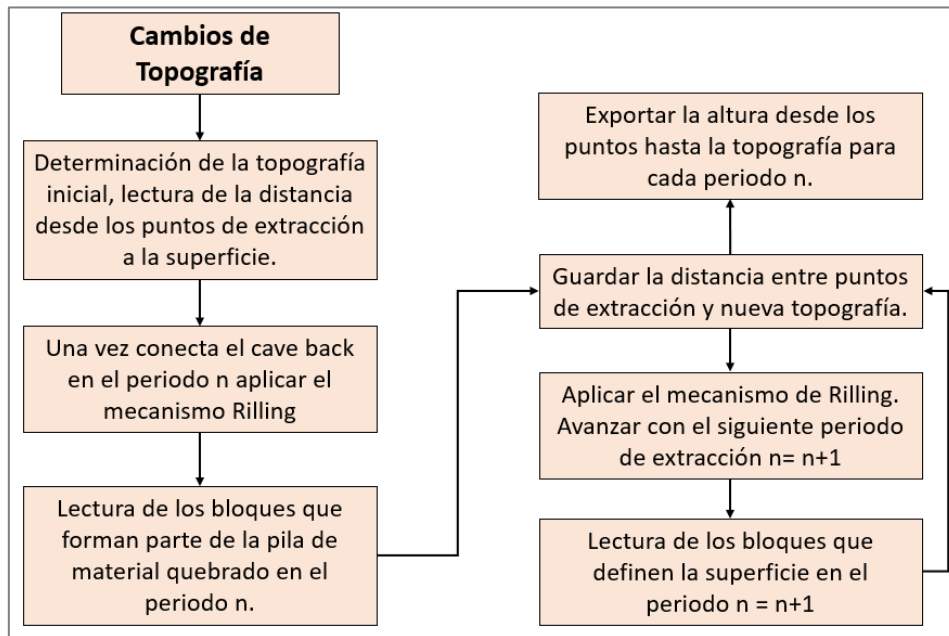


Figura N° 76. Diagrama de metodología para estimar el cambio de topografía por periodo de extracción.

#### 5.4. Limitaciones del mecanismo Cave Back en FlowSim BC

La incorporación del cave back al simulador ha ayudado a representar con mayor confiabilidad el comportamiento del flujo gravitacional y las reglas que rigen el caving, esto de acuerdo a evidencia experimental y bases de datos en terreno. Dada la rapidez de ejecución, FlowSim BC aún tiene el potencial de incorporar nuevos algoritmos y variables dentro del proceso.

Un software se hace más robusto a la vez que es más autónomo y no depende de otras herramientas para el desarrollo de sus mecanismos internos, lo anterior hace referencia a la capacidad que debería tener FlowSim para que a partir de las superficies de cave back entregue la altura HCB desde cada punto en cada periodo de forma automática sin tener que pasar por las herramientas de Sketch Up y AutoCAD para obtener dicha distancia.

Lo anterior es una corrección para el mecanismo actual de cave back, sin embargo, uno de los supuestos principales para dicha aplicación es que existen mediciones e interpretaciones sobre la posición y forma de la superficie del cave back en distintos periodos. Debido a que en muchos proyectos no existe la instrumentación suficiente para obtener las superficies como un input se hace necesario estimar la HCB de forma empírica. En base a antecedentes teóricos la extensión en altura del cave back para un determinado periodo es proporcional a 3 veces la altura de extracción (HOD) cuando no hay aplicación de PA, y proporcional a 5 veces la HOD cuando existe PA, sin embargo, como se comprobó en el Capítulo III, dicha relación no considera la presencia de estructuras o interacción entre cavidades, donde se estimaron razones de HCB:HOD de hasta 12:1.

Por lo tanto, cuando no existe la presencia de estructuras importantes o cavidades adyacentes es factible estimar la altura del cave back como un factor de 5 veces la altura de extracción cuando el macizo de encuentra pre-acondicionado. No se ha comprobado que la razón sin PA sea de 3:1, ya que de igual forma no se están considerando fenómenos externos a la extracción. Se hace necesario incorporar la información geológica y agregar la ubicación de fallas, estructuras o material quebrado de bloques previamente explotados.

#### 5.5. Conclusiones

Para construir una planificación robusta es clave poseer la mayor cantidad de información operacional y ser capaz de representar y analizar los mecanismos que rigen en la minería de hundimiento con el fin de predecir su comportamiento en base a correlaciones con datos mina. Por esto, es importante notar el valor agregado que genera integrar nuevas capacidades a las herramientas de planificación cuyo principal objetivo es entender el comportamiento de las operaciones mineras a través de simulaciones lo más cercanas a la realidad con una potente capacidad de análisis y de visualización. Al integrar los mecanismos anteriormente descritos sin duda le darán a FlowSim BC una ventaja comparativa considerable frente a otros softwares de planificación en la industria.



## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

Actualmente la limitación de la planificación minera no se encuentra en la identificación certera de las variables que deben ser consideradas para modelar y diseñar una operación de block caving, más bien se encuentra en la minería de datos, es decir, ¿de dónde obtener información?, ¿Qué y cuándo medir?, ¿Cómo medir?, ¿Qué sistema o instrumento utilizar?, son algunas de las preguntas que deben ser resueltas, además es fundamental mantener información actualizada en línea de modo que sea factible analizar datos pasados, presentes y generar proyecciones para periodos futuros. La capacidad de simular la realidad es una herramienta fundamental para la planificación mina, pero sin los datos suficientes ningún simulador, por más robusto que sea, logrará obtener resultados útiles y que aporten valor.

Una vez que la socavación inicial ha comenzado, la única variable operacional que controla la propagación del caving es la extracción. Como regla general se cumple que a mayor HCB la altura de extracción equivalente aumenta manteniendo la razón HCB : HOD = 8:1. A pesar de que en ambos casos de estudio se aplicaron distintas técnicas de PA, en términos de propagación del caving y extracción, se obtienen razones similares. De acuerdo al análisis de cave back del CASO 1 se observa que la extracción por sí sola no explica el comportamiento y forma de propagación del caving, siendo necesario incorporar las estructuras y fallas presentes en el macizo rocoso, por otro lado, a partir del análisis realizado en el CASO 2, se confirma que además de la extracción y el mapeo de fallas y estructuras se hace necesario incorporar la influencia que genera el material quebrado de una cavidad adyacente previamente explotada. Por estos motivos la razón HCB : HOD llega a ser 12:1, sin embargo, cuando no existe la presencia de estructuras importantes o cavidades adyacentes es factible estimar la altura del cave back como un factor de 5 veces la altura de extracción cuando el macizo se encuentra preacondicionado.

FlowSim BC ha demostrado ser una innovadora herramienta de flujo gravitacional aplicable a la planificación minera de block caving, la cual se ha desarrollado rigurosamente a partir de experimentos y observaciones a escala industrial. Las simulaciones son capaces de representar muchos de los fenómenos que rigen el caving, tales como la propagación, migración de finos (dilución), flujo preferencial, Rilling superficial, fragmentación secundaria, cambios de la geometría del elipsoide de extracción, los cuales han sido calibrados y validados entregando errores menores a un 5%. La incorporación del cave back al simulador ha ayudado a representar con mayor confiabilidad el comportamiento del flujo gravitacional y las reglas que rigen el caving. Se espera que este tipo de herramientas dadas sus capacidades, facilidad de uso y rapidez de ejecución logre reemplazar los actuales enfoques basados en reglas obsoletas de caving. Además, el simulador seguirá en constante evolución a medida que se obtenga una mayor comprensión del flujo gravitacional.

## 6.2. Recomendaciones

En primer lugar, con respecto a la minería de datos se recomienda instalar la instrumentación necesaria para medir la posición e interpretar la forma del cave back para cada periodo. De este modo será posible entender la forma de propagación bajo las condiciones específicas de cada mina, con distintas alturas de columnas y diferentes variantes de PA. Hoy en día solo se tiene información del inicio de la socavación y fecha de conexión del cave back, con un conocimiento muy limitado respecto a la forma en la que fue propagándose.

En base a lo anterior es que se debe buscar la relación entre las estructuras y fallas presentes en el macizo rocoso, ya que son estas las que definen tanto la forma como dirección preferencial del caving. Además, se debe realizar un estudio detallado con respecto a la interacción entre cavidades subterráneas adyacentes, ya que el material quebrado de una explotación previa puede influenciar en la dirección de propagación y por ende, el material disponible a ser extraído.

Finalmente se recomienda aprovechar las nuevas capacidades de FlowSim BC asociadas a la variación de la porosidad de la pila de material quebrado en función de la fragmentación y controlar el volumen de air gap generado por el cave back y la extracción, con el fin de evaluar riesgos de “air blast” durante la fase de quiebre, por otro lado, en la fase de régimen conocer cómo se mueve la topografía por cada periodo ayudará a definir otros riesgos operacionales conocidos como in-rushes, tal como ingreso de agua-barro y/o dilución.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arancibia, 2018. “Experimental and empirical modelling of dilution for block caving”. Master Thesis, University of Chile (under preparation).
- Atlascopco, 2007, “Mining methods in Underground Mining”, second Edition
- Board, M. and Pierce, M., 2009. “A review of recent experience in modelling of caving.” International Workshop on Numerical Modelling for Underground Mine Excavation Design, June 28, 2009. Asheville, North Carolina in conjunction with the 43rd US Rock Mechanics Symposium.
- Brown E, 2007. “Block caving Geomechanics, 2nd edition”. The International Caving Study 1997 – 2004, JKRCM University of Queensland.
- Castro, R, 2006, “Study of the mechanisms of gravity flow for block caving”, PhD thesis, University of Queensland, Australia.
- Castro, R, González, F and Arancibia, E, 2009, “Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving”, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 393-400.
- Codelco 2010, “Preacondicionamiento del macizo rocoso”, 2010.
- Cundall, P A, Mukundakrishnan, B and Lorig, L, 2000. ‘REBOP (Rapid Emulator based on PFC3D) Formulation and User’s Guide’ (JKMRC and ITASCA Consulting Group, Inc: Brisbane).
- Flores, G and Karzulovic, A, 2002. “Geotechnical guidelines from a transition from open pit to underground mining”. Benchmarking report.
- Kvapil R, 2008, “Gravity flow in Sublevel and Panel Caving – a common sense approach”.
- Laubscher, D.H., 1994. "Cave mining - the state of the art", The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, vol 94 no 10, pp 279-293.
- Lett, J, Brunton, I, G.W. Capes, A, Jager, 2016, “Undercutting to surface breakthrough Cadia East Panel Cave (Stage 1)”, MassMining 2016.
- Lowther, L, Oliver, L, J.L. Lett, I Brunton, 2016, “Implementation of a surface based hydraulic fracturing program to successfully propagate a large cave through hard competent near-Surface rock masses to achieve breakthrough”, MassMining 2016.
- Olivares, D. , 2014. “Influence of fines and humidity on confined granular flow”, Undergraduate Thesis, University of Chile (In Spanish).
- M Orellana, 2014, “Caving experiences in Esmeralda sector”, DET, Caving 2014.
- Ovalle, A, 2015, “How to improve the ramp-up of block caving mines”, Mine Planning 2015.

- Paredes, P, 2012, “Mecanismos de entrada de dilución en minas de block/panel caving”, Memoria para optar al título de Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Chile, 2012
- Rivero, V, 2017, “Análisis de interacción Rajo-Subterránea utilizando modelamiento de medios discontinuos”, Tesis de Magister en Minería, Universidad de Chile.
- Rojas, J, “Estudio del FlowSim como una herramienta de simulación de flujo gravitacional”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile 2017.
- Sánchez, Y., 2017 “Gravity Flow Characterization of Fine Granular Material for Block Caving”. Master in Mining Thesis, University of Chile (In Spanish)
- Steffen, S, Poulsen, J, Van As, A, Talu, S, Watt, G , Ooi, J, “Wireless System for Monitoring Cave-back Propagation”, MassMin 2016, pp 251.
- Valencia Vera, M E, 2014. “Desarrollo e implementación de FlowSim para su aplicación en minería de block/panel caving”, Memoria para optar al título de Ingeniera Civil de Minas, Universidad de Chile, Santiago.
- Van As, A, Davison, J. and Moss, I. (2003), “Subsidence Definitions for Block Caving Mines.” Rio Tinto Technical report. 59pp
- Vargas M, 2017, “Elementos clave de diseño subterráneo”, Universidad de Chile, Santiago.