



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
METALÚRGICA**



IMPACTO DE LOS MÉTODOS DE MEZCLA EN LAS RESERVAS EXTRAÍBLES EN OPERACIONES DE PANEL CAVING

POR

Pablo Andrés Muñoz Soto

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía
René Gómez Puigpinos

Profesor co-Guía
Raúl Castro Ruiz

Marzo 2026
Concepción (Chile)

© 2026 Pablo Muñoz Soto

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis amigos y compañeros que me acompañaron durante mi formación académica y profesional. A mi familia, que siempre ha estado ahí, por su apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso.

Quisiera agradecer a mi profesor Guía René Gómez, quien me dio la oportunidad de desarrollar esta Memoria de Título en el Laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile, así como su constante apoyo y orientación a lo largo de este trabajo. Agradezco también al profesor Raúl Castro, profesor co-Guía, por sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo del estudio.

Se agradece además el apoyo del proyecto FONDECYT regular 1230749, que financió el desarrollo de esta investigación.

RESUMEN

Los métodos de explotación subterránea han experimentado un aumento en la profundidad de sus operaciones, principalmente en métodos de *Block y Panel Caving*, los cuales se caracterizan por requerir una alta productividad. Esto ha presentado una serie de cambios en las características del macizo rocoso bajo condiciones geomecánicas complejas y con leyes cada vez más bajas en las reservas minerales. En este contexto, uno de los principales desafíos es la correcta estimación del flujo gravitacional del material dentro de las columnas de extracción, debido al impacto directo que tiene sobre la dilución, ley media y por consecuencia en la valorización económica del proyecto.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento de distintos algoritmos de mezcla utilizados en la simulación de flujo gravitacional en operaciones de *caving* para analizar su impacto en la estimación de reservas extraíbles y en los indicadores económicos de la planificación minera. Para ello, se analizó una operación subterránea real operada por el método de *panel caving*. La metodología de trabajo considera la factibilidad de integración del software Flowsim BC dentro del entorno de planificación minera Geovia Gems PCBC, la cual no fue factible, junto con el uso de herramientas como CA3D basado en autómatas celulares y la implementación del algoritmo Marker Mixing basado en trazadores. Esto con el fin de analizar los resultados y cuantificar el impacto en la ley media, dilución y la valorización económica del proyecto bajo distintos escenarios de mezcla.

Los resultados evidencian errores bajo el 5% en la estimación de la ley media, con diferencias en la forma en que cada algoritmo representa los mecanismos de flujo y mezcla, en este caso, Flowsim presentó un error del 2.58% logrando replicar correctamente el flujo preferencial al incorporar el efecto del *cave back*, aunque en periodos finales tiende a sobreestimar la ley al no simular de manera adecuada el rilling superficial. Por otra parte, CA3D mostró un error del 4.88% lo que evidencia limitaciones en periodos iniciales debido a la ausencia de una geometría definida para las columnas de extracción. Finalmente, Marker Mixing presentó un error del 4.01% caracterizado por una incorporación agresiva de material externo en el año 2023. Estas diferencias impactan en la dilución y el VAN proyectado, alcanzando diferencias de hasta 58 MMUS\$ entre los escenarios. Los resultados permiten concluir que la selección y calibración del algoritmo de mezcla tienen un impacto significativo en la estimación de las reservas y en la toma de decisiones en la evaluación de proyectos de *panel caving*.

ABSTRACT

Underground mining methods have seen an increase in the depth of the operations, mainly in block and panel caving methods, which are characterized by the needing of high productivity. This has led to a series of changes in the characteristics of the rock mass under complex geomechanical conditions and with increasingly lower grades in the mineral reserves. In this context, one of the main challenges is the accurate estimation of the gravitational flow of the material within the extraction column, due to its direct impact on dilution, average grade and the economic valuation of the project.

The objective of this study is to evaluate the performance of different mixing algorithms used in the simulation of gravity flow in caving operations, in order to analyze their impact on the estimation of recoverable reserves and on the economic indicators of mine planning. To this end, a real underground operation using panel caving method was analyzed. The methodology examines the feasibility of integrating the Flowsim BC software into the Geovia Gems PCBC mining planning environment, which was not feasible, along with the use of tools such as CA3D based on cellular automata and the implementation of Marker Mixing algorithm. This was done to analyze the results and quantify the impact on average grade, dilution and the economic valuation of the project under different mixing scenarios.

The results show errors below 5% in the estimation of the average grade, with some differences in how each algorithm represents the flow and mixing mechanisms. For this case, FlowSim had an error of 2.58% successfully replicated the preferential flow by incorporating the cave back effect, although in final periods it tends to overestimate the grade by not adequately simulating the surface rilling. CA3D showed an error of 4.88%, indicating limitations in initial periods due to the lack of a defined geometry for the extraction columns. Finally, Marker Mixing showed an error of 4.01%, characterized by an aggressive incorporation of external material in 2023. These differences impact in dilution and projected NPV, resulting in differences of up to \$58 million dollars between scenarios. The results demonstrate that the selection and calibration of the mixing algorithm have a significant impact on reserve estimation and decision making in the evaluation for panel caving projects.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Hipótesis.....	2
1.2	Objetivo general	2
1.3	Objetivos específicos.....	2
1.4	Alcances y limitaciones.....	2
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	Minería de Block Caving	3
2.1.1	Panel Caving	3
2.1.2	Diseño de malla de extracción	4
2.1.1	Inicio y Propagación del Hundimiento.....	6
2.1.2	Flujo gravitacional.....	10
2.1.3	Tipos de flujo.....	11
2.2	Tipos de Dilución en Minería de Caving.	12
2.2.1	Mezcla vertical	12
2.2.2	Mezcla Horizontal	14
2.2.3	Migración de finos	15
2.2.4	Rilling interno	16
2.2.5	Punto de entrada de dilución (PED).....	17
2.3	Principios de planificación minera en minería de Block/Panel Caving	18
2.4	FLOWSIMBC	21
2.4.1	Mecánica de FlowSim	21
2.5	GEOVIA GEMS PCBC	22
2.5.1	Slide File	23
2.5.2	Template Mixing	23

2.5.3	Marker Mixing (MMIX)	25
2.5.4	Cellular Automaton (CA3D)	25
3	METODOLOGÍA	27
3.1	Caso de estudio.....	27
3.2	Análisis y caracterización de los datos de entrada	28
3.2.1	Modelo de bloques	28
3.2.2	Malla de extracción	29
3.2.3	Carta de extracción.....	30
3.2.4	Distribución temporal.....	30
3.3	Indicadores estadísticos de error	30
3.3.1	Error Cuadrático Medio (RMSE).....	31
3.3.2	Error Relativo (RE)	31
3.4	Configuración y Calibración de los Algoritmos de Mezcla	31
3.4.1	CA3D (Autómata Celular)	32
3.4.2	Simulación Marker Mixing.....	34
3.4.3	Simulación FlowSim BC.....	35
3.5	Evaluación económica del proyecto.....	36
3.5.1	Cálculo de NSR.....	37
3.5.2	Cálculo de VAN.....	37
3.6	Propuesta de acople entre FlowSim BC y Geovia Gems PCBC.....	37
3.6.1	Identificación del punto de integración	38
3.6.2	Limitaciones de uso del diluido en PCBC	40
4	RESULTADOS.....	41
4.1	Marker Mixing	41
4.1.1	Curva Tonelaje Ley	41

4.1.2	Error relativo y cuadrático medio.....	42
4.1.3	Modelo remanente.....	42
4.1.4	Dilución.....	43
4.1.5	Evaluación económica.....	44
4.2	CA3D (Autómata Celular PCBC).....	44
4.2.1	Curva Tonelaje Ley	45
4.2.2	Error relativo y cuadrático medio.....	45
4.2.3	Dilución.....	46
4.2.4	Modelo remanente.....	47
4.2.5	Evaluación económica.....	47
4.3	FlowSim BC (Autómata Celular).....	48
4.3.1	Curva Tonelaje Ley	48
4.3.2	Error relativo y cuadrático medio.....	49
4.3.3	Dilución.....	49
4.3.4	Evaluación económica.....	50
4.4	Incorporación de FlowSim en Geovia Gems	50
5	DISCUSIÓN.....	52
5.1	Tiempos de Simulación	52
5.2	Análisis Ley Media	53
5.3	Comparativa del VAN proyectado.....	55
5.4	Integración de FlowSim a Geovia Gems.....	57
6	CONCLUSIONES	58
7	RECOMENDACIONES	61
8	REFERENCIAS	62
9	ANEXOS.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración del método de extracción <i>block caving</i> [2].	3
Figura 2. <i>Panel vs Block Caving</i> [3].	4
Figura 3. Vista en planta de dos tipos de diseño de nivel de extracción: Herringbone escalonado (a) y Teniente (b). Las ubicaciones de los puntos de extracción se muestran como líneas blancas [8].	5
Figura 4. Block Caving con LHDs, Mina el teniente [10].	5
Figura 5. Vista en planta de los layout analizados (A) El Teniente (B) Híbrido [11].	6
Figura 6. Metodología hundimiento [12].	7
Figura 7. Inicio del hundimiento y el crecimiento durante el ramp up de producción [13].	7
Figura 8. Diagrama de las zonas de hundimiento [14].	8
Figura 9. Las condiciones de esfuerzos y carga por hundimiento en una mina de caving. [16]	8
Figura 10. Gráfico temporal de la profundidad operativa en minas de block y panel caving [15].	9
Figura 11. Volumen asociado a la extracción de material desde un punto de extracción aislado [17].	10
Figura 12. Zona de flujo elipsoide [20].	10
Figura 13. Comparativa entre flujo aislado y flujo interactivo [22].	12
Figura 14. Abaco de Laubscher (HIZ) [23].	13
Figura 15. Abaco de (IEZ) [23].	13
Figura 16. Interacción entre las elipsoides de extracción (HIZ) [26].	14
Figura 17. Mezcla horizontal entre dos conos de extracción [27].	14
Figura 18. Elipsoides de extracción espaciadas 32-80mm respectivamente [28].	15
Figura 19. Migración de finos dentro de una batea [31].	15
Figura 20. Evolución de la zona de movimiento a medida que avanza la extracción [32].	16
Figura 21. Rilling dentro de la interfaz roca quebrada/intacta [33].	16
Figura 22. Escalas de tiempo para los diferentes mecanismos [25].	17
Figura 23. Secuencia en bateas de extracción a) dilución vertical b) dilución lateral [30].	17
Figura 24. Metodología Hill of Value [38].	18

Figura 25. Comparación de envolventes económicas. En la vista isométrica, la escala de colores representa la altura de las columnas, y en la vista en planta, la escala de colores representa el valor acumulado de cada columna de extracción [39].	19
Figura 26. Mapa de desarrollos colapsados en el nivel de extracción en mina El Teniente. [25]	19
Figura 27. Diagrama de flujo simplificado de FlowSimBC.	21
Figura 28. Diseño de múltiples niveles con el cuerpo mineral y topografía [43].	22
Figura 29. Creación de puntos de extracción y Slide File.	23
Figura 30. Slide file de los conos de extracción [33].	24
Figura 31. Proceso de simulación del modelo remanente [33].	26
Figura 32. Modelo de bloques “Mina A”.	28
Figura 33. Rebloqueo modelo de bloques.	29
Figura 34. Vista en planta malla de extracción “Mina A”.	29
Figura 35. Secuencia apertura de puntos (secuencia por colores).	30
Figura 36. Slice File generado para los puntos de extracción.	34
Figura 37. Diagrama de flujo de trabajo PCBC.	38
Figura 38. Secuencia de homologación del modelo diluido.	39
Figura 39. Extensión de columnas SF considerando aportes laterales.	39
Figura 40. Gráfico Tonelaje Ley por período simulado con MMIX.	42
Figura 41. Vista perfil Norte: Izquierda) Previo extracción; Derecha) Post extracción MMIX.	43
Figura 42. Curva Dilución Acumulada.	43
Figura 43. Gráfico Tonelaje Ley por período simulado con CA3D.	45
Figura 44. Curva Dilución Acumulada.	46
Figura 45. Vista perfil Norte: Izquierda) Previo extracción; Derecha) Post extracción CA3D.	47
Figura 46. Gráfico Tonelaje Ley por período simulado con FlowSim BC.	48
Figura 47. Curva Dilución Acumulada FlowSim.	49
Figura 48. Gráfico de Ley media simulada para cada algoritmo de mezcla.	53
Figura 49. Vista perfil Marker Mixing ; Material externo (color negro) migra superficialmente.	54
Figura 50. Gráfico Flujo Valor Actual Neto	55
Figura 51. Ciclo de vida de un proyecto.	57

Figura 52. Gráfico selección footprint teórico VAN vs Tonelaje.	71
Figura 53. Layout Footprint Finder.	71
Figura 54. Gráfico Comparativo Mezcla de Laubscher y Vertical.	72
Figura 55. Dilución vertical VMIX a) mineral (azul) b) estéril (verde).	72
Figura 56. Círculos definen el radio del cono de extracción en el UCL [33].	73
Figura 57. Geometría de cono Slide File.	73
Figura 58. Medidas Cono Slide File.	73
Figura 59. Lógica de movimiento Autómatas celulares.	74
Figura 60. Script Cálculo NSR.	74
Figura 61. Cálculo Horizonte de mezcla.	74
Figura 62. Ilustración mecánica de rilling y toppling.	75
Figura 63. Perfil N 3850 avance extracción CA3D.	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Discretización Modelo de bloques.	28
Tabla 2. Distribución de períodos de extracción por año.	30
Tabla 3. Parámetros de calibración según el tipo de roca.	32
Tabla 4. Lógica de movimiento del material en CA3D.....	33
Tabla 5. Parámetros Menú Perfil Avanzado Marker Mixing.....	35
Tabla 6. Parámetros Calibración FlowSim BC	35
Tabla 7. Parámetros Económicos.	36
Tabla 8. Resultados estadísticos de MMIX.	42
Tabla 9. Evaluación económica MMIX	44
Tabla 10. Resultados estadísticos de CA3D.....	46
Tabla 11. Evaluación económica CA3D.	47
Tabla 12. Error Relativo y Cuadrático Medio	49
Tabla 13. Evaluación Económica FlowSim BC	50
Tabla 14. Tiempos de Simulación.	52
Tabla 15. Análisis estadístico de algoritmos de mezcla.	54
Tabla 16. Comparación VAN.	56
Tabla 17. Mecanismos de movimiento de material Template Mixing [25].....	68
Tabla 18 Parámetros Tipos de Roca.	68
Tabla 19. Parámetros del material externo para generar rilling.	69
Tabla 20. Flujo de caja CA3D.	69
Tabla 21. Flujo de caja FlowSim.....	70
Tabla 22. Flujo de caja Marker Mixing.....	70
Tabla 20. Métodos de mezcla PCBC [33].	72
Tabla 21. Carta Gantt.....	76

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha visto un aumento de la profundidad de las operaciones mineras, acompañadas por la etapa de transición de cielo abierto hacia minería subterránea logrando prolongar la vida útil de los yacimientos. Por consiguiente, esta transición conlleva importantes desafíos técnicos y mayores costos operativos. Dentro de los métodos de extracción subterráneos utilizados en Chile destacan el Block y Panel Caving, los cuales permiten la explotación de yacimientos masivos mediante el hundimiento controlado del macizo rocoso, acompañado de una extracción continua que se caracteriza por una alta productividad y bajos costos operacionales [1].

No obstante, uno de los problemas más relevantes en las operaciones de hundimiento corresponde a su baja selectividad, lo que genera dilución del mineral extraído, impactando negativamente en la ley que alimenta las plantas de procesamiento mineral. Esto ha impulsado la aplicación de diferentes metodologías para el control de dilución, donde un manejo preciso del comportamiento del flujo gravitacional permite reducir la incertidumbre en la estimación de las reservas extraíbles, al optimizar la planificación y viabilidad del proyecto minero.

Actualmente existen diferentes metodologías para predecir el comportamiento del material que fluye dentro de las columnas de extracción. Entre ellas, el método de Laubscher es uno de los más comunes, mientras que los métodos numéricos, como FlowSim BC, CA3D y Marker Mixing permiten simular de forma detallada el flujo gravitacional.

En el presente estudio se integra la evaluación de algoritmos de flujo gravitacional dentro del software de planificación minera Geovia Gems PCBC, incorporando de manera continua los procesos de simulación en la evaluación económica de un proyecto minero. En este caso, se analiza cómo los diferentes algoritmos de mezcla influyen en los indicadores de planificación minera, tales como ley media, dilución y el valor económico de las operaciones de panel caving.

1.1 Hipótesis

La selección y calibración de los algoritmos de mezcla utilizados en la simulación de operaciones de Panel Caving tiene un impacto significativo en la estimación de la ley media y la dilución del material extraído, afectando directamente la valoración económica del proyecto.

1.2 Objetivo general

Evaluar el impacto de diferentes algoritmos de mezcla en los indicadores de en un proyecto de Panel Caving.

1.3 Objetivos específicos

- 1) Analizar el funcionamiento y parámetros clave de los diferentes simuladores de flujo gravitacional CA3D, Marker Mixing y FlowSim.
- 2) Comparar el VAN del proyecto bajo escenarios equivalentes para los distintos algoritmos de mezcla.
- 3) Evaluar el impacto de la dilución generada a través de la ley media.
- 4) Determinar la factibilidad de acople de FlowSim BC dentro del entorno de planificación de Geovia Gems PCBC.

1.4 Alcances y limitaciones

El estudio se basa en un único modelo de bloques preexistente, que representa una operación específica que se presenta como “Mina A” de Panel Caving que se encuentra operativa. Por lo tanto, los resultados y conclusiones están condicionados a las características geológicas, geometría del yacimiento y parámetros de diseño de ese caso particular. La aplicación de los resultados obtenidos a otros yacimientos con condiciones geotécnicas o de diseño podría ser diferente según la calibración del modelo.

2 MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta una recopilación bibliográfica para definir las bases de la investigación.

2.1 Minería de Block Caving

El *block caving* es un método de extracción basado en el principio de hundimiento, a través del quiebre de mineral al quitar la base de un macrobloque, provocando la pérdida de estabilidad y su posterior extracción a través de bateas ubicadas en niveles inferiores al de hundimiento. En este método de extracción el yacimiento mineralizado completo o un bloque equidimensional es socavado totalmente para el inicio del hundimiento [2], como se observa en la Figura 1.

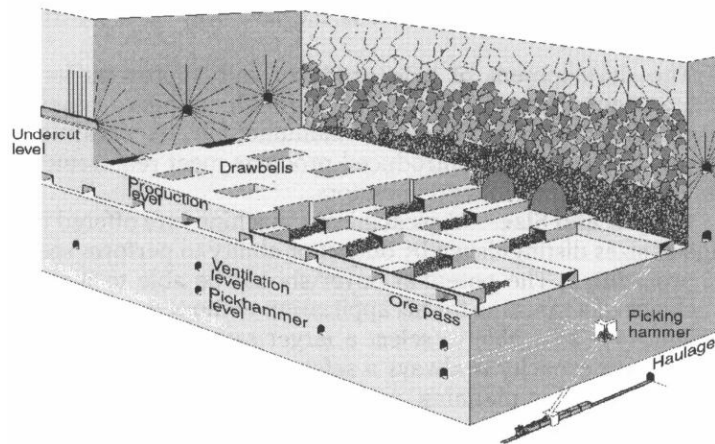


Figura 1. Ilustración del método de extracción *block caving* [2].

2.1.1 Panel Caving

A diferencia del *block caving*, en la variante Panel Caving no se explota inicialmente el nivel de hundimiento, este se subdivide en paneles consecutivos de dimensiones limitadas y es aplicado en yacimientos de mayor extensión [3] comúnmente con columna mayor altura. En este método es importante el control del hundimiento y el ritmo de extracción, siendo esencial para mantener un control en la relación estéril mineral [4], reduciendo los riesgos de dilución en los puntos de extracción. Diering [5] establece la diferencia entre la planificación de una operación de *block caving* "puro" y *panel caving*. Donde en la primera, la tasa de producción máxima está dictada por el número total de puntos de extracción y la tasa de extracción vertical, mientras que, en la segunda, depende casi exclusivamente de la tasa de desarrollo de nuevos puntos de extracción.

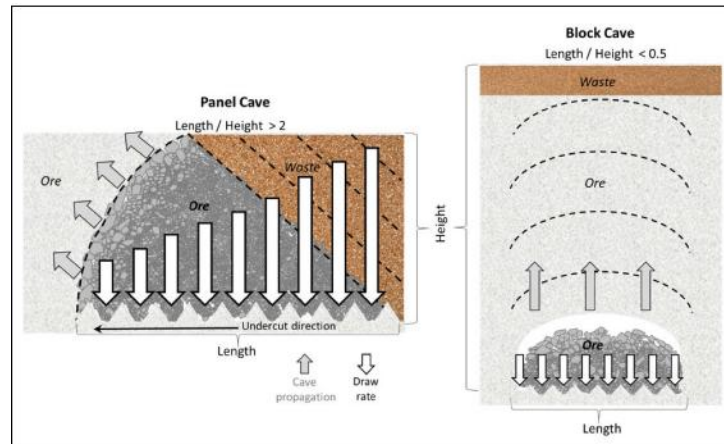


Figura 2. Panel vs Block Caving [3].

La apertura de puntos de extracción es un proceso continuo para un *panel caving*, el cual presenta un ritmo de avance relativamente más rápido que para un *block caving*, el cual presenta columnas minerales de mayor altura, las cuales requieren mayor tiempo de extracción. La tendencia actual de aplicar estos métodos a yacimientos de mayor competencia geomecánica [2] destaca la necesidad de desarrollar herramientas cada vez más precisas para estimar el comportamiento del hundimiento para garantizar la seguridad y éxito de las operaciones.

2.1.2 Diseño de malla de extracción

El diseño de la malla de extracción constituye un elemento fundamental para maximizar la recuperación de mineral a bajo costo bajo condiciones seguras y estables [6]. Esto se logra definiendo la geometría de las galerías, intersecciones y puntos de extracción que determinaran la eficiencia operacional y la estabilidad geomecánica del nivel de producción. Existen dos configuraciones ampliamente reconocidas en la industria las cuales son el diseño Offset Herringbone y el diseño El Teniente, cada uno con características distintivas que influyen en los costos de desarrollo, la logística de operación y los requerimientos de fortificación [7].

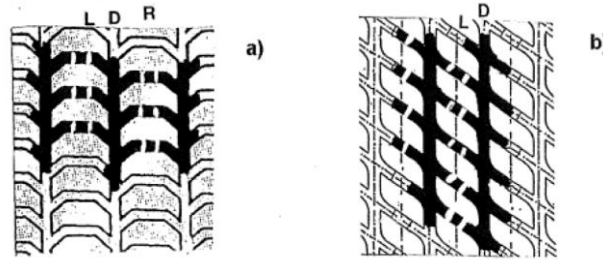


Figura 3. Vista en planta de dos tipos de diseño de nivel de extracción: Herringbone escalonado (a) y Teniente (b). Las ubicaciones de los puntos de extracción se muestran como líneas blancas [8].

La selección del diseño óptimo implica un análisis multicriterio que considera factores geológicos, operativos y de seguridad. Parámetros como el espaciamiento entre puntos de extracción, la orientación de las galerías en relación con los esfuerzos horizontales principales y las estructuras geológicas, y la selección de equipos LHD son determinantes en esta evaluación. Susaeta [9] estudió más a fondo la relación entre el flujo y la interacción entre las elipses, y mostró cómo esto puede ayudar en el diseño de una nueva malla de extracción.

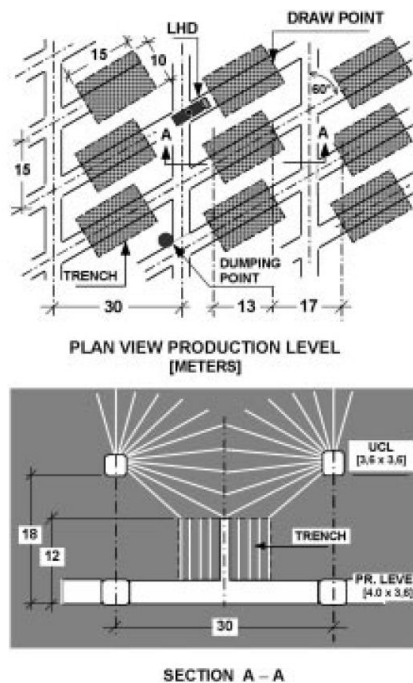


Figura 4. Block Caving con LHDs, Mina el teniente [10].

Un espaciamiento amplio reduce los costos de desarrollo y mejora la estabilidad de los pilares, pero puede comprometer la recuperación de mineral; mientras que un espaciamiento reducido favorece la recuperación, pero incrementa los riesgos geológicos y los costos asociados [7]. Chacón [10] establece que a medida que el mineral se vuelve más grueso, el diámetro del volumen que fluye

también aumenta, y por lo tanto la distancia entre puntos de extracción puede ampliarse considerablemente. Esta relación se cuantifica mediante el concepto de movimiento interactivo, donde el diámetro del material en movimiento puede alcanzar 1,5 veces el diámetro de tiraje aislado de las elipsoides de extracción, permitiendo optimizar el espaciamiento según las condiciones geomecánicas de cada sector. Es por esto que a medida que el diámetro de mineral se vuelve mayor, el diámetro del volumen del flujo aumenta y por consiguiente se tiene una mayor distancia entre los puntos de extracción [10].

Figura 5. Vista en planta de los layout analizados (A) El Teniente (B) Híbrido [11].

2.1.1 Inicio y Propagación del Hundimiento

intactas de la roca, la densidad de estructuras geológicas y el campo de esfuerzos in situ, definiendo así los criterios fundamentales para la selección de zonas que puedan ser hundidas.

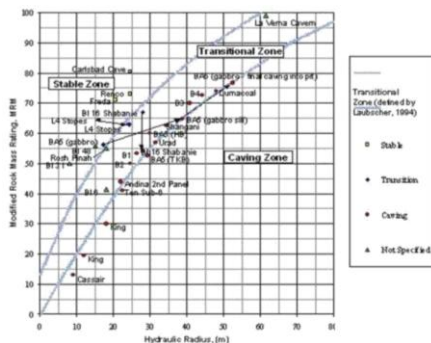


Figura 6. Metodología hundimiento [12].

Por otro lado, Karzulovic [13], describe la implementación práctica del proceso de hundimiento, destacando que la iniciación se logra mediante el diseño estratégico de una cavidad horizontal que define como “*undercut*” o nivel de hundimiento de dimensiones específicas. Este diseño debe garantizar la capacidad de desestabilizar el macizo rocoso para inducir un colapso progresivo. Karzulovic también enfatiza que la efectividad de la propagación posterior depende de la secuencia de extracción, el control de la fragmentación secundaria y la gestión de la relación entre el ritmo de hundimiento y la extracción, los cuales son aspectos operacionales clave para mantener la continuidad productiva del método.

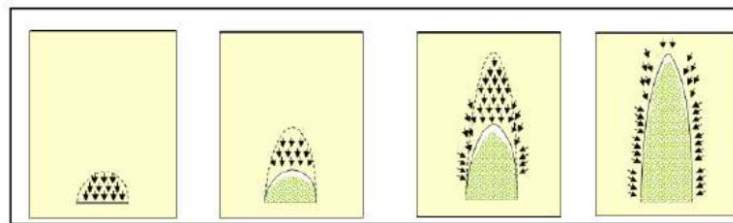


Figura 7. Inicio del hundimiento y el crecimiento durante el ramp up de producción [13].

El mecanismo de iniciación y propagación del hundimiento es el principio fundamental que diferencia al *block caving* de otros métodos de explotación. Karzulovic [13] describe que la iniciación del hundimiento se induce de manera controlada mediante la excavación de una cavidad horizontal (nivel de hundimiento), la cual elimina el soporte basal de una macro columna de mineral. El dimensionamiento de esta bóveda es crítico, ya que debe ser lo suficientemente grande para superar

la resistencia natural del macizo rocoso y permitir que se formen arcos de tensión que, al fallar, inicien el colapso.

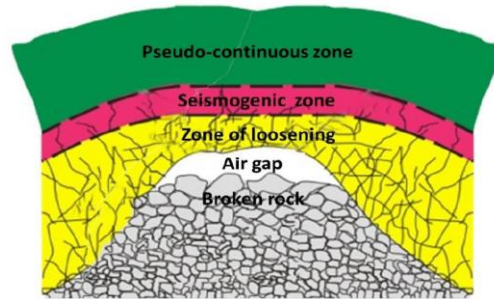


Figura 8. Diagrama de las zonas de hundimiento [14].

Una vez iniciado el hundimiento, la respuesta geotécnica del macizo rocoso durante la propagación vertical no es uniforme y está significativamente influenciada por la interacción entre el frente de avance del nivel de hundimiento y las estructuras geológicas mayores [15]. El análisis de casos de gran profundidad evidencia que la geometría del frente, junto con la tasa de avance, son parámetros operativos críticos que controlan la magnitud y distribución de los esfuerzos. La implementación de estrategias de constante monitoreo, como el análisis de datos, permite identificar zonas de alta deformación y aplicar medidas de corrección, esenciales para gestionar el daño inducido por los esfuerzos y garantizar la estabilidad a largo plazo del nivel de extracción durante esta fase crítica.

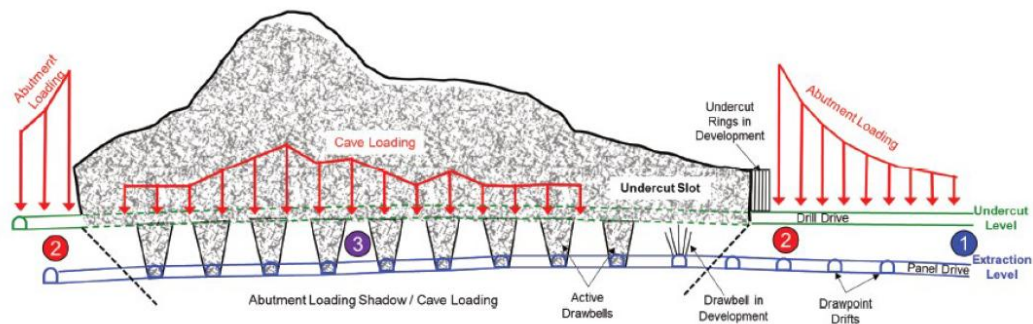


Figura 9. Las condiciones de esfuerzos y carga por hundimiento en una mina de caving. [16]

Además, la propagación del hundimiento genera una redistribución crítica de esfuerzos en zonas específicas del macizo rocoso. Hidayat [14] identifica que, en secciones con inclinaciones mayores a 40 grados, las mayores concentraciones de esfuerzo se localizan en las zonas de “abutment stress” y zona sismogénica. Según su investigación de minería a gran profundidad, la acumulación de

esfuerzo en estas zonas es resultado directo de la extracción masiva mediante hundimiento, lo que puede inducir colapsos en la pared colgante y afectar la dirección de propagación del cave back. Dentro de los factores que toman relevancia en este tipo de escenarios, tiene especial relevancia la presencia de estructuras geológicas, que influyen significativamente en la estabilidad.

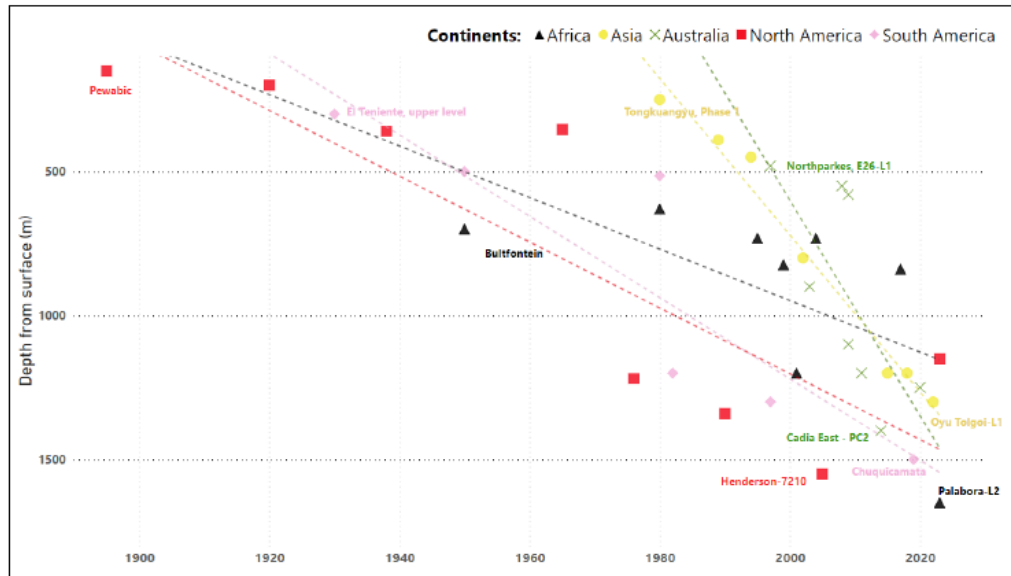


Figura 10. Gráfico temporal de la profundidad operativa en minas de block y panel caving [15].

Por otra parte, el estudio realizado por Batkhuu [15] enfatiza la integración de datos de monitoreo de variables críticas como la geometría del frente de hundimiento y velocidad de avance, reforzando la importancia de integrar las bases empíricas con las condiciones geotécnicas bajo condiciones de alta concentración de esfuerzos, donde se observan dos fenómenos importantes tales como el *squeezing* y *rock burst*. Por consiguiente, se deben desarrollar de herramientas predictivas de modelamiento numérica considerando las limitaciones en la calidad de la información medida, donde se enfatiza la validación de la información mediante monitoreos en terreno para la correcta calibración del yacimiento con observaciones reales, que dan seguridad y eficiencia al hundimiento de las operaciones.

2.1.2 Flujo gravitacional

La comprensión del comportamiento del flujo de rocas fragmentadas representa el fundamento para el diseño eficiente de operaciones de hundimiento por gravedad. El concepto de flujo gravitacional se basa en comprender como se está moviendo el material quebrado dentro de la columna a medida que avanza la extracción, el cual ocurre durante el proceso de hundimiento el mineral se fragmenta debido al fracturamiento del macizo rocoso y los fragmentos resultantes descienden hasta los puntos de extracción.

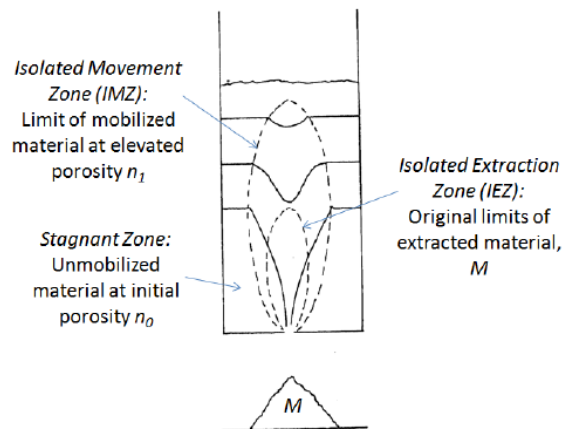


Figura 11. Volumen asociado a la extracción de material desde un punto de extracción aislado [17].

Janelid y Kvapil [18] desarrollaron la teoría clásica del flujo en elipsoides, postulando que el material extraído proviene de un volumen con forma elipsoidal que se expande hacia arriba desde el punto de extracción. Este modelo inicial ha sido refinado por investigaciones posteriores que reconocen la existencia de múltiples patrones de flujo. La trayectoria del flujo depende de varios factores, los cuales incluyen la fragmentación del material, la interacción entre partículas, la geometría de la columna de extracción y la secuencia de extracción [19].

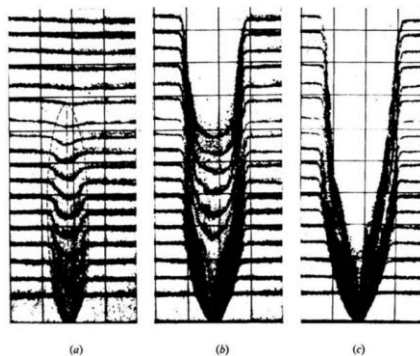


Figura 12. Zona de flujo elipsoide [20].

Kvapil [20] establece que el volumen de material movilizado sobre un punto de extracción individual, denominado Zona de Movimiento Aislada (IMZ), presenta una forma que evoluciona en forma de elipsoide en el campo cercano a una cilíndrica en el campo lejano. La comprensión de la forma y la dinámica interna de la IMZ es fundamental para determinar el espaciamiento óptimo entre puntos de extracción, buscando la superposición de estas zonas para lograr un hundimiento uniforme y maximizar la recuperación de mineral minimizando la entrada de dilución [17].

2.1.3 Tipos de flujo

La comprensión de la dinámica del flujo gravitacional de material fragmentado es fundamental para el diseño y operación en *block caving*. Pierce [17] establece que el volumen de material movilizado sobre cada punto de extracción individual, denominado Zona de Movimiento Aislado (IMZ), interactúa con las zonas estancadas circundantes, dando lugar a distintos regímenes de flujo. Estos incluyen el flujo masivo, donde todo el material dentro de un bloque definido se mueve hacia los puntos de extracción; El flujo de tipo embudo o “Funnel Flow” el cual se caracteriza por la formación de un flujo vertical rodeado de material aislado y, por último, el flujo expandido, que combina características de los dos anteriores. La transición entre estos regímenes depende críticamente de las propiedades geomecánicas del material fragmentado, la geometría de la elipse de extracción y la estrategia operacional.

Desde una perspectiva operativa, estos factores se manifiestan en dos tipos principales de flujo. Los que se dividen principalmente en dos tipos:

- Flujo aislado: El material dentro de la columna se mueve de manera independiente a los otros puntos de extracción por lo tanto no se comparte material fragmentado entre las elipses. Este flujo puede generar zonas de mineral sin extraer y zonas con acumulación de estéril, aumentando la dilución [4] [21].
- Flujo interactivo: Los puntos de extracción vecino tienen influencia entre sí, permitiendo un movimiento de material entre los puntos y una mejor recuperación del mineral. Se prioriza este flujo debido al control que otorga para retrasar el ingreso de la dilución [4] [21].

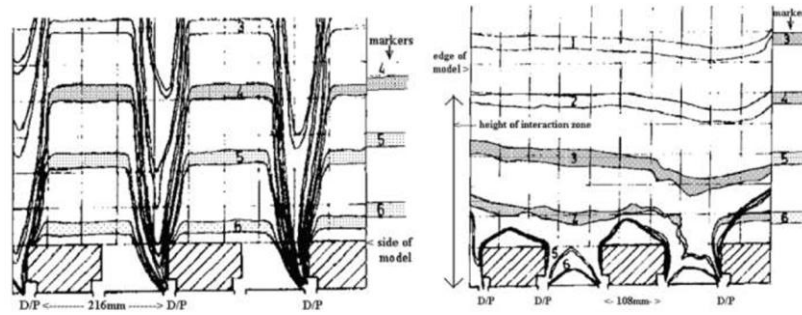


Figura 13. Comparativa entre flujo aislado y flujo interactivo [22].

Según lo propuesto por Susaeta [9] el comportamiento del flujo que depende de tres variables clave: la estrategia de extracción, que define la uniformidad de la secuencia y la transición entre flujo aislado e interactivos; las propiedades del material, como la densidad aparente, la fragmentación y el ángulo de fricción interna, que condicionan el diámetro de la columna de extracción y la velocidad de flujo; y la geometría del diseño, donde la distancia entre puntos de extracción y la topografía del macizo regulan el grado de interacción y propagación del flujo entre columnas.

2.2 Tipos de Dilución en Minería de Caving.

La dilución en minería de Caving se define como la mezcla de material estéril no planificado con el mineral de interés, lo que resulta en una disminución de la ley del material extraído. Este fenómeno es uno de los aspectos más críticos en la gestión de operaciones, ya que impacta directamente en el retorno económico y la recuperación de las reservas mineras.

2.2.1 Mezcla vertical

Laubscher [23] Define la metodología de mezcla vertical, que ocurre principalmente por debajo de la Zona de Interacción (HIZ), estando influenciada por factores como la fragmentación del macizo rocoso, su homogeneidad y el espaciamiento entre puntos de extracción. El rango en la distribución del tamaño de fragmentos y el espaciamiento mínimo entre las zonas de extracción a lo largo del eje principal determinan la Altura de la Zona de Interacción.

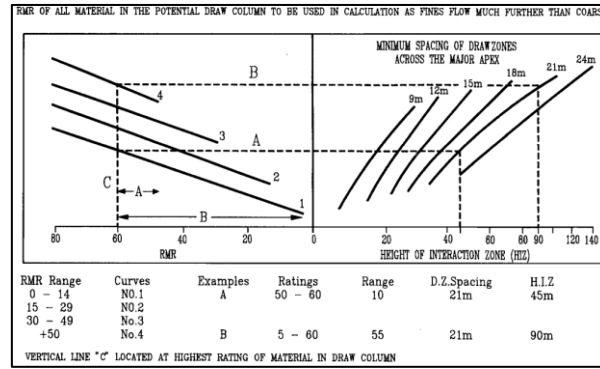


Figura 14. Abaco de Laubscher (HIZ) [23].

El ábaco IEZ como se observa en la Figura 15 es utilizado para estimar diámetro de la elipsoide, en base al tipo de roca y espaciamiento entre los puntos de extracción. Se debe considerar que los tamaños de partícula más pequeños mejoran la fluidez de las partículas, lo que lleva a zonas de extracción más grandes [24].

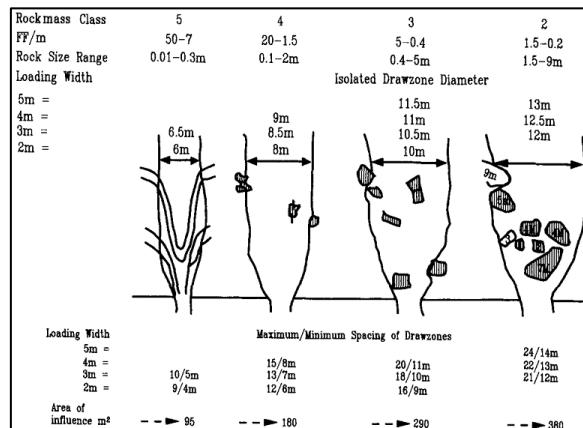


Figura 15. Abaco de (IEZ) [23].

Este se ha considerado generalmente como el mecanismo principal de ingreso de dilución a la zona mineral en operaciones de *block caving*. Cuando el material fracturado se desplaza hacia abajo, las distintas partículas se moverán a diferentes velocidades y, por lo tanto, el orden en que llegan a los puntos de extracción será diferente de sus posiciones originales en la roca intacta [25]. Es razonable afirmar que todo *block caving* estará sujeto a mezcla vertical, y que este efecto normalmente resultará en un 5 a 15% (o más) de material de dilución [25]. Aunque cualquier material fracturado en movimiento se mezcla en cierta medida, se ha encontrado que la mezcla vertical ocurre principalmente por debajo de lo que se denomina la HIZ (Altura de la Zona de Interacción) [23].

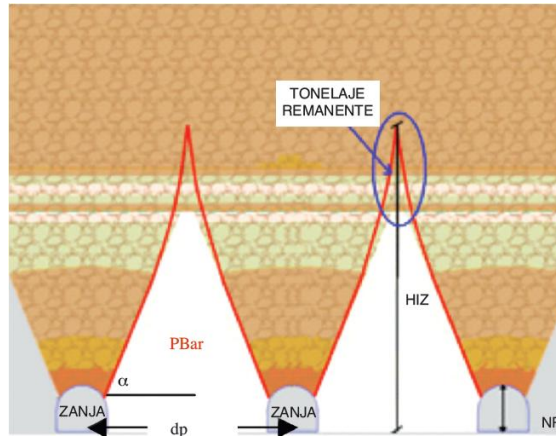


Figura 16. Interacción entre las elipsoides de extracción (HIZ) [26].

2.2.2 Mezcla Horizontal

El movimiento de material ocurre en dirección horizontal dentro de un entorno confinado, típicamente por debajo de la superficie superior del hundimiento [27]. Generalmente, se considera que su efecto es mucho menos relevante que el de la mezcla vertical. La mezcla horizontal se entiende que ocurre en las zonas más bajas del bloque hundido, por debajo del horizonte de mezcla.

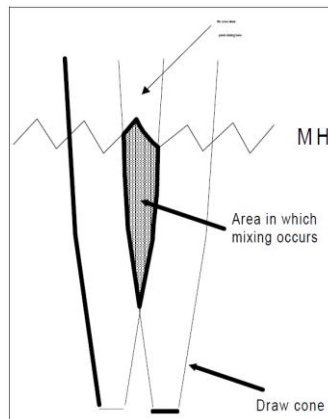


Figura 17. Mezcla horizontal entre dos conos de extracción [27].

La mezcla horizontal ocurre cuando las zonas de extracción (EZ) de puntos de extracción adyacentes interactúan y se superponen. En el modelo propuesto por Palma [28] también se produce un efecto no lineal de interacción en las EZ de cada abertura, que puede describirse como un alargamiento de las EZ con un espaciamiento intermedio como se observa en la Figura 18, lo que describe precisamente cómo las zonas de extracción se deforman e interactúan cuando las aperturas están a distancias intermedias.

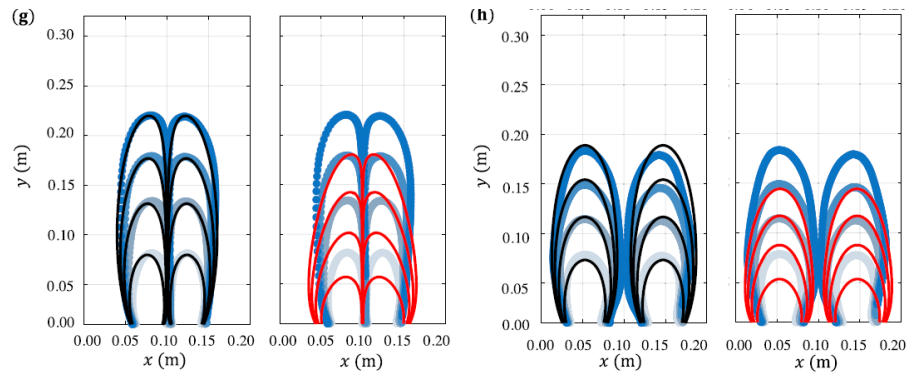


Figura 18. Elipsoides de extracción espaciadas 32-80mm respectivamente [28].

2.2.3 Migración de finos

En minería subterránea corresponde al movimiento de material granular de tamaño pequeño. Este material se dirige hacia los puntos de extracción, causando dilución del mineral valioso y problemas de seguridad debido a la formación de arcos cohesivos [29]. La dilución es una parte importante en una operación minera de Caving y por lo tanto el control y comprensión de sus principales fuentes son cruciales en la gestión de una operación de caving. La dilución puede tener diversas fuentes, incluyendo la posición del mineral/estéril, la percolación de finos y el control de extracción en la mina [30].



Figura 19. Migración de finos dentro de una batea [31].

En experimentos físicos tal como lo muestra Diaz [32] se puede observar la migración del material fino de manera horizontal en la superficie de hundimiento, contaminando los puntos de extracción con material no planificado, en la Figura 20.

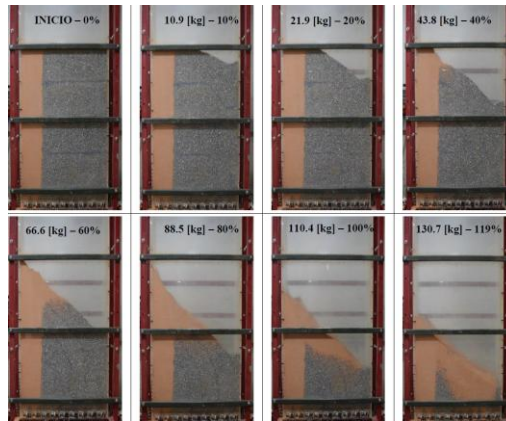


Figura 20. Evolución de la zona de movimiento a medida que avanza la extracción [32].

2.2.4 Rilling interno

El material puede migrar pendiente abajo entre el airgap que ocurre específicamente entre la roca fraturada y la roca intacta. La magnitud del Rilling depende del grado en que se forme en esta interfaz, si el ángulo de la roca intacta es empinado y el ángulo de reposo del material fracturado es bajo, existe mayor oportunidad para la formación de vacíos de aire que facilitarían el proceso de rilling. Se cree que el rilling explica el fenómeno frecuentemente observado en que los marcadores se mueven distancias horizontales considerables.

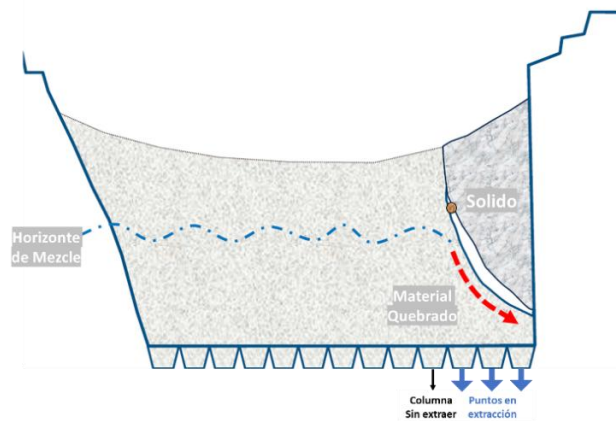


Figura 21. Rilling dentro de la interfaz roca quebrada/intacta [33].

Como plantea Valencia [34] en su estudio, al tener rilling superficial a medida que las superficies del Cave Back ascienden se tendrán nuevas superficies granulares por las cuales el material rodara hacia zonas específicas con menor calidad de roca o presencia de estructuras como fallas, propiciando un flujo que no es totalmente vertical. Con relación a lo anterior, la influencia del flujo

de material pueden inducir a una dilución temprana, disminuyendo la ley obtenida en los puntos de extracción.

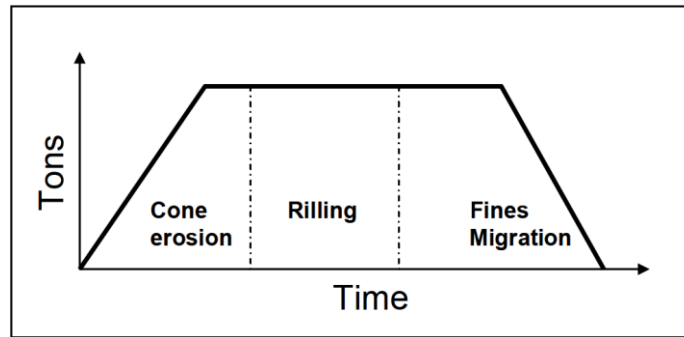


Figura 22. Escalas de tiempo para los diferentes mecanismos [25].

2.2.5 Punto de entrada de dilución (PED)

El termino PED corresponde al porcentaje de la columna de mineral que ha sido extraída previo a la aparición de dilución en el punto de extracción [23]. Este valor es en función de la cantidad de mezcla que ocurra dentro de las columnas. Castro [35] demostró que mediante modelamiento numérico de flujo gravitacional la entrada de dilución se ve directamente afectada por el espaciamiento entre puntos de extracción y la geometría de la zona de flujo, donde un diseño que promueva la interacción temprana de las columnas mediante el flujo interactivo puede retrasar significativamente la llegada de material estéril.

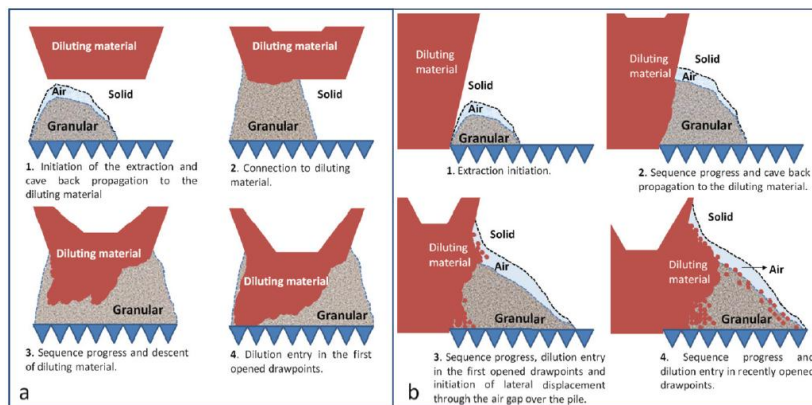


Figura 23. Secuencia en bateas de extracción a) dilución vertical b) dilución lateral [30].

2.3 Principios de planificación minera en minería de Block/Panel Caving

La planificación de una operación de Caving es un ejercicio complejo que requiere integrar criterios geotécnicos, operativos y económicos desde las etapas iniciales del diseño para definir la envolvente económica inicial optima o footprint, que establece el volumen mineral que será explotado y todo lo que esta fuera es considerado como dilución. Según Laubscher [36], la viabilidad del método depende críticamente de una clasificación rigurosa del macizo rocoso donde el MRMR el cual es ajustado a partir del RMR que define parámetros clave como la fragmentación primaria y secundaria, los ángulos de quiebre y subsidencia, la estabilidad de los pilares y el diseño de la fortificación. Complementariamente, Pourrahimian [37] propone que la secuencia óptima de la producción puede resolverse mediante modelos de Programación Lineal Entera Mixta (MILP), los cuales permiten maximizar el Valor Actual Neto (VAN) sujeto a restricciones de capacidad de producción, tasa de extracción, dirección del frente de avance y el número máximo de puntos de extracción activos.

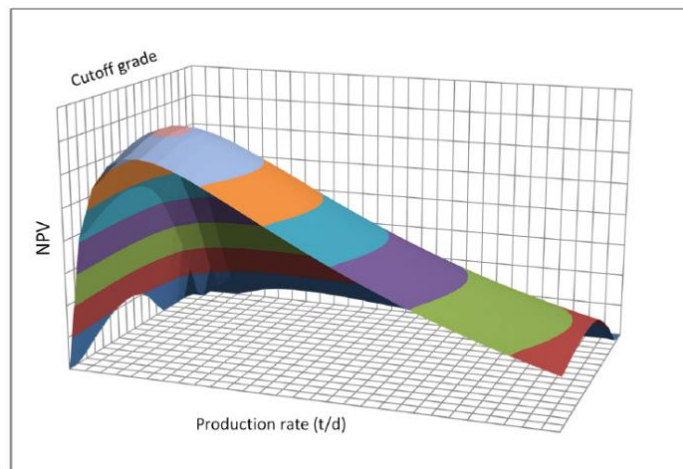


Figura 24. Metodología Hill of Value [38].

En esta misma línea, Vera [38] destaca que el VAN óptimo para un proyecto de *block caving* se obtiene en la mayoría de los casos con leyes de corte superiores a la marginal, lo cual refuerza la importancia de integrar criterios económicos tempranos en el diseño. Es por esto que la consideración de apertura de los puntos de extracción y de múltiples direcciones de avance son esenciales para generar planes realistas y computacionalmente operativos, asegurando una explotación continua, controlada y económicamente viable a lo largo de la vida útil de la mina.

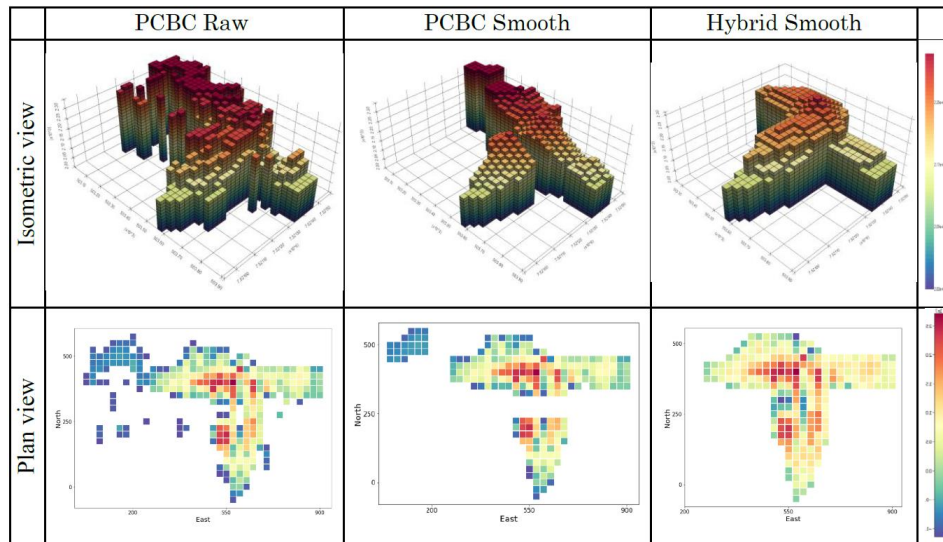


Figura 25. Comparación de envolventes económicas. En la vista isométrica, la escala de colores representa la altura de las columnas, y en la vista en planta, la escala de colores representa el valor acumulado de cada columna de extracción [39].

Mientras que la metodología Hill of Value se centra en optimizar la ley de corte y la tasa de producción para maximizar el VAN [40], es fundamental que la envolvente económica resultante presente una geometría operativa. Es así como Saavedra [39] propone una adaptación del algoritmo de pit final, formulando un "rajo invertido" donde se incorporan explícitamente restricciones de suavizado en el contorno horizontal y en las diferencias de altura entre columnas de extracción mediante arcos de precedencia. Esta metodología integrada asegura que, desde el primer momento, la reserva minera no solo maximice el valor, sino que también posea una geometría que mitigue riesgos geomecánicos, como la concentración de esfuerzos en el frente de hundimiento y la dilución al realizar una extracción irregular, para lograr así, una planificación de producción y control de hundimiento más robustos y alineados con el VAN óptimo del proyecto.

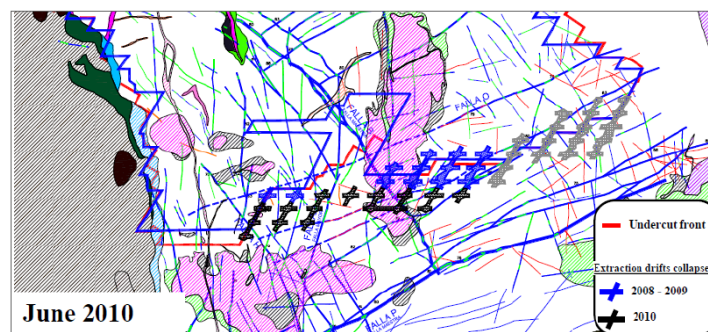


Figura 26. Mapa de desarrollos colapsados en el nivel de extracción en mina El Teniente. [25]

Además de los criterios económicos, la planificación debe gestionar una serie de riesgos operacionales y geotécnicos asociados. Dentro de los riesgos identificados como los estallidos de aire, los daños por concentración de esfuerzos y los flujos de barro o agua. En relación con esto, Batkhuu [15] destaca que una planificación deficiente puede generar una propagación irregular del frente de hundimiento, dejando columnas remanentes que interrumpen el flujo de mineral y requieren intervenciones operacionales. Además, se señalan los riesgos de una fragmentación mal controlada, que puede resultar en bloques de gran tamaño que obstruyen los puntos de extracción o, por otra parte, un exceso de finos que aumente el potencial de flujos de barro.

La inestabilidad del nivel de producción debido a las altas cargas inducidas y esfuerzos no controlados que afectan la infraestructura, completan un panorama de riesgos que deben ser mitigados desde la etapa de diseño de la envolvente económica y la secuencia de extracción.

2.4 FLOWSIMBC

FlowSim corresponde a una herramienta de simulación de flujo gravitacional basado en autómatas celulares, desarrollado para estimar las reservas mineras en una mina operada mediante *block/panel caving* [41] [34]. Un autómata celular corresponde a un modelo matemático que simula un sistema de elementos el cual evoluciona a pasos discretos el cual es adecuado para modelar sistemas naturales que puedan ser descritos como una colección de objetos simples que interactúen localmente unos con otros [42]. Dentro de las principales ventajas de autómatas celulares es la simpleza para implementar el modelo, al tener rapidez en las simulaciones al ser un sistema discreto y no es necesario recurrir a la resolución de ecuaciones diferenciales como ocurre en los modelos dinámicos [34].

2.4.1 Mecánica de FlowSim

La simulación del flujo gravitacional dentro de Flowsim, se define como un proceso estocástico de partículas que descienden a medida que se crean vacíos a causa de la extracción de material en los puntos de extracción [42]. Desde su desarrollo ha sido testeado mediante modelos físicos a escala de laboratorio para diferentes operaciones de Caving, utilizando leyes, trazadores para observaciones de tipo de roca y marcadores inteligentes. Las simulaciones de FlowSim han sido comparadas con datos reales de grandes operaciones de hundimiento, reportando errores bajo el 5% [41]. Este proceso de simulación depende de una serie de parámetros de entrada los cuales se presentan en el diagrama de la Figura 27.

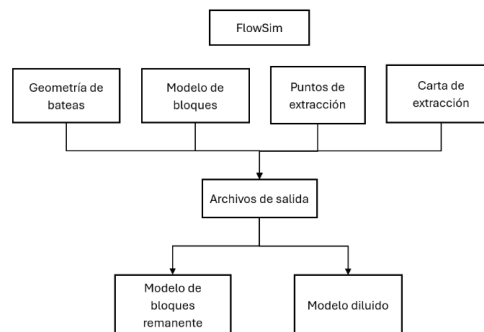


Figura 27. Diagrama de flujo simplificado de FlowSimBC.

Entre las variables que incorpora el software se incluye la definición del Air Gap, forma de la topografía y dilución. Estos datos se consideran relevantes debido a que incorpora la geometría de hundimiento, rilling interno y superficial, migración de finos y fragmentación secundaria [41].

2.5 GEOVIA GEMS PCBC

El programa GEOVIA PCBC es un software desarrollado por Tony Diering en el año 1988 específicamente para la planificación y programación de operaciones mineras que utilizan métodos de hundimiento (*block caving*, *panel caving* y *sub level caving*).

PCBC se distingue de otras herramientas de planificación al abordar una serie de fenómenos complejos del hundimiento como el flujo gravitacional del mineral, mezcla de materiales y la propagación del Caving [43]. Su aplicación va desde estudios de factibilidad hasta el control diario de extracción. El propósito central de PCBC es la reducción de riesgos en proyectos de gran capital mediante la evaluación de múltiples escenarios optimizando la inversión antes de su ejecución. Destacando la integración completa lo que simplifica la importación de datos reduciendo los tiempos de configuración, con la posibilidad de generar reportes para el monitoreo de las situaciones dinámicas en la mina.

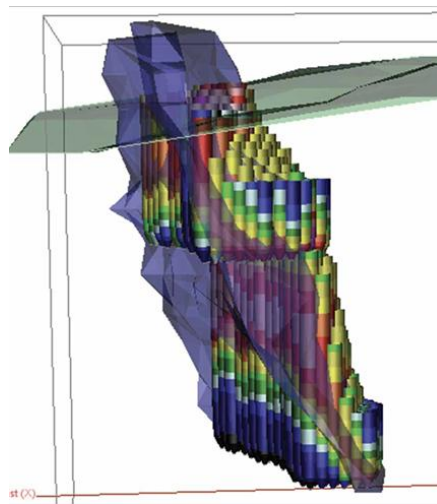


Figura 28. Diseño de múltiples niveles con el cuerpo mineral y topografía [43].

Actualmente existen diversas herramientas de flujo gravitacional en el mercado, tales como Rebop [44], Autómatas Celulares [45] [46], Flowsim [47] y CA3D [48]. Las cuales trabajan diferente con la discretización del modelo de bloques en bloques de dimensiones reducidas, la división o fraccionamiento a través de elipses y en otros casos mediante el uso de trazadores para comprender el comportamiento del flujo de las partículas.

2.5.1 Slide File

Formato utilizado para definir el área de influencia en base a los puntos de extracción vecinos para el modelo diluido calculando el porcentaje de ley que se utiliza de cada fracción de los bloques mediante la superposición de elipses, asegurando que el material no se cuente 2 veces.

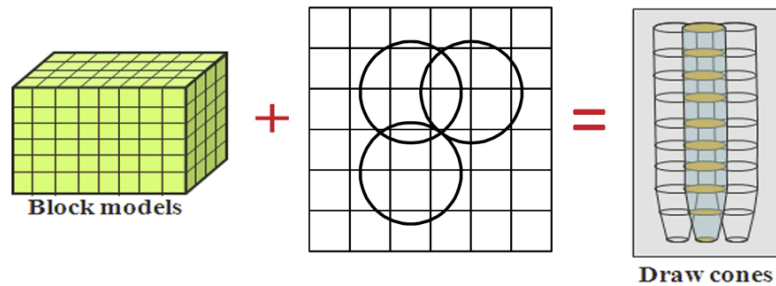


Figura 29. Creación de puntos de extracción y Slide File.

2.5.2 Template Mixing

Esta herramienta de mezcla se desarrolló específicamente para predecir el material que se extraerá en los puntos de extracción en un plan de producción, dado un conjunto de condiciones de flujo [27]. Un objetivo adicional del algoritmo es separar los diferentes mecanismos de flujo del *panel caving* y estudiar la sensibilidad de cada uno de ellos para evaluar el impacto en el plan de producción y en los parámetros económicos asociados [25]. Además, el algoritmo de Template Mixing se diseñó para superar las limitaciones de los métodos de mezcla lineales, introduciendo la capacidad de simular mecanismos de flujo complejos y no lineales. A diferencia de métodos como Laubscher o Pre Vertical mixing, Template Mixing puede modelar de manera explícita fenómenos como el toppling, la migración de finos y el flujo preferencial de rilling [49]. Dicha capacidad es relevante para predecir el impacto en la producción causado por una geometría de caving irregular, caracterizada por la formación de arcos, colgaduras y airgaps. Esto se observa en proyectos donde la propagación vertical del hundimiento puede verse comprometida por condiciones geomecánicas desfavorables [50].

Esta flexibilidad se logra mediante el uso de slices que representan los diferentes mecanismos de movimiento, permitiendo una simulación más fiel a la propagación irregular y asimétrica que suele observarse en un hundimiento real a través de un motor de agotamiento, a diferencia de métodos que realizan la mezcla de manera in situ. Si bien su configuración es más compleja que la de los métodos lineales dada su calibración, su implementación dentro del programador de producción de PCBC

permite que la reserva extraíble y la planificación final reflejen de forma dinámica el impacto de la secuencia de extracción en la mezcla de materiales, siendo esto un diferenciador del software.

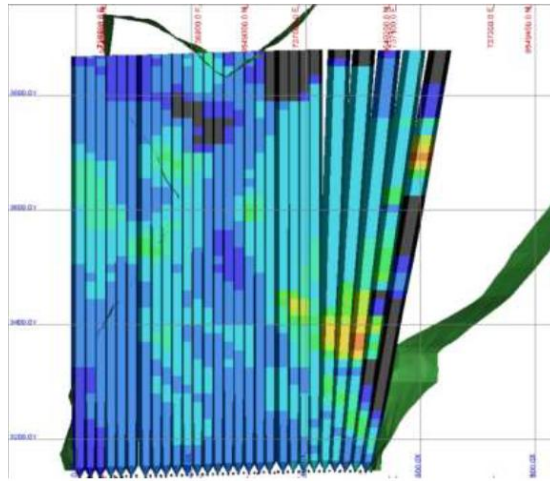


Figura 30. Slide file de los conos de extracción [33].

El algoritmo de Mezcla de Template mixing utiliza un tamaño de elemento que coincide con el espaciamiento entre puntos de extracción, que es típicamente de 15 x 15 x 15 m. Esto da tamaños de alrededor de $2000 \times 50 = 100,000$ elementos [25].

Las reglas básicas del flujo de material son descritas a detalle dada una visión general y simplificada del proceso:

- La gravedad es la fuerza impulsora principal (La cual actúa verticalmente hacia abajo).
- El material solo puede moverse hacia un espacio vacío dejado por otro material (es decir, no puede haber superposición de material).
- El material fragmentado generalmente es menos denso que el material intacto, debido al factor de esponjamiento.
- El material sólido o intacto no se mueve.

El algoritmo define cómo el material llena los vacíos mediante reglas que conectan elementos vecinos, combinando factores espaciales, geotécnicos y cierto grado de aleatorización.

En el proceso de minería por hundimiento (*block caving* y *panel caving*, pero no *Sub level Caving*), se han identificado una serie de mecanismos para describir las diferentes formas en que el

material puede moverse [25]. Los mecanismos clave identificados hasta la fecha se muestran en la Tabla 17.

Normalmente se aplican técnicas de programación lineal o cuadrática para calcular las toneladas requeridas en cada paso, mientras que las técnicas de simulación de flujo se aplican con el motor de agotamiento [25].

2.5.3 Marker Mixing (MMIX)

La herramienta *marker mixing* o también llamada “*fully template mixing using markers*” sigue los mismos conceptos básicos de modelamiento de flujo gravitacional mediante el motor de agotamiento de PCBC para la creación de un plan de producción, la principal diferencia con *template mixing* es que en vez de trabajar con fracciones de material que se mezcla durante el proceso de flujo, *marker mixing* utiliza trazadores discretos para seguir el movimiento del material que fluye dentro de las columnas de extracción [33].

2.5.4 Cellular Automaton (CA3D)

Esta herramienta de mezcla se implementa en PCBC como un modelo basado en autómatas celulares para simular de manera eficiente el flujo, agotamiento y mezcla de material fragmentado directamente en el modelo de bloques. Su aplicación está particularmente orientada a la estimación de modelos remanentes, ya que puede replicar la interacción del material entre distintos puntos y niveles de extracción, así como la secuencia histórica de la mina [48].

El núcleo de CA3D es un autómata celular donde el modelo de bloques se discretiza en un gran número de celdas para simular un sistema complejo que puede trabajar a multinivel [51]. La evolución del sistema se rige por la aplicación de un conjunto de reglas locales que determinan cómo se mueve el material entre celdas vecinas, simulando el proceso de extracción y mezcla. Como se describe a continuación.

- Discretización del Modelo de Bloques: CA3D utiliza un modelo de bloques con la información geológica del yacimiento y lo puede dividirlo en sub bloques para obtener una mayor resolución durante la simulación de extracción y mezcla.

- Extracción Multinivel: La herramienta permite trabajar con múltiples niveles de extracción de forma continua. Una vez que se completa la simulación de la extracción en un nivel superior, el modelo remanente resultante está listo para ser el modelo remanente de la extracción en el nivel inferior, controlado siempre por la secuencia de extracción previamente definida.

CA3D sigue reglas de flujo similar que Template y Marker Mixing para movimiento del material con algunas variaciones como se presentan a continuación:

- La gravedad es la fuerza impulsora principal, pero también se permite el movimiento horizontal basado en probabilidades.
- El material solo se mueve para llenar vacíos (sin posibilidad de superposición).
- El material fragmentado es menos denso que el material intacto.
- El material sólido o intacto no se mueve.
- Se puede aplicar un factor de esponjamiento, diferente según el tipo de roca definida.
- Existen diferencias en el comportamiento de flujo para material fino y grueso.

Dentro de los valores típicos de fragmentación se encuentran:

Proceso de Simulación

El modelo funciona mediante la mezcla secuencial, donde el proceso de extracción y mezcla se calcula según su ubicación y orden de la secuencia minera. Esto permite replicar la dinámica y complejidad de la extracción real desde diferentes bloques de producción, generando al final del proceso de simulación un modelo de bloques remanente que representa la distribución de leyes final y tonelajes tras la mezcla [48].

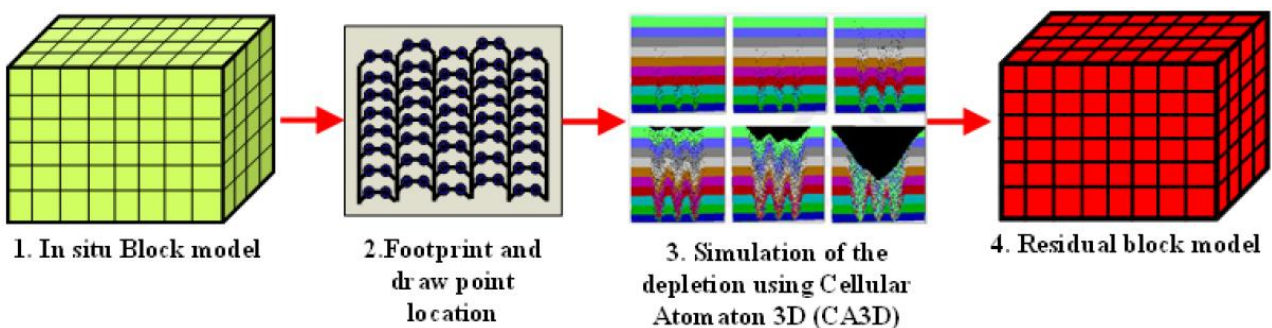


Figura 31. Proceso de simulación del modelo remanente [33].

3 METODOLOGÍA

El presente estudio corresponde a una investigación de tipo cuantitativa y comparativa, orientada a evaluar el impacto de la selección de distintos algoritmos de mezcla en la distribución y evolución temporal de las leyes minerales extraídas en un proyecto de *panel caving*, así como a analizar la factibilidad técnica del acople de modelos de bloques diluidos generados en FlowSim dentro del entorno de planificación minera Geovia Gems PCBC.

La metodología se fundamenta en la simulación numérica de los mecanismos de mezcla mediante la aplicación de tres algoritmos con lógicas conceptuales y esquemas de discretización distintos: FlowSim BC, CA3D y MMIX. FlowSim se utiliza como herramienta principal para la generación de modelos de bloques diluidos a partir de la simulación del flujo gravitacional del material, mientras que los algoritmos CA3D y MMIX, implementados en PCBC, se emplean para evaluar y contrastar el comportamiento de la mezcla bajo enfoques alternativos. Los parámetros de cada algoritmo fueron calibrados utilizando criterios geológicos y propiedades físicas del material, con el fin de asegurar condiciones comparables entre escenarios.

El enfoque comparativo considera un modelo de bloques base y una configuración de extracción comunes para todos los escenarios. De este modo, las diferencias observadas en los resultados se atribuyen al tipo de algoritmo de mezcla utilizado y, principalmente, a la calibración de los parámetros asociados a cada herramienta, los cuales reflejan distintas representaciones del flujo gravitacional y de los mecanismos de redistribución del material.

3.1 Caso de estudio

Para realizar las simulaciones experimentales, se utiliza un modelo a escala mina, identificado como “Mina A”. El cual representa una operación subterránea explotada mediante el método de *panel caving* la cual previamente era operada mediante el método cielo abierto.

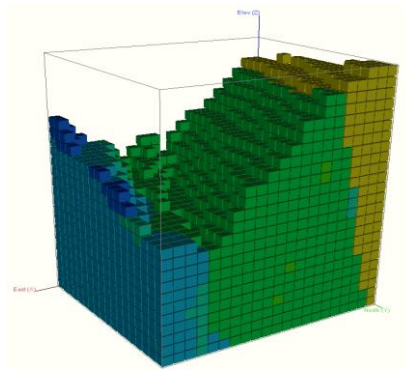
El yacimiento presenta una geometría y configuración de extracción previamente definidas, incluyendo una carta de extracción utilizada como base para la evaluación comparativa de los distintos escenarios.

El estudio se basa en un caso de estudio único, por lo que las conclusiones obtenidas están condicionadas a las características particulares del yacimiento y al diseño operacional analizado.

3.2 Análisis y caracterización de los datos de entrada

3.2.1 Modelo de bloques

El modelo utilizado corresponde a la representación de un macrobloque con una discretización de $20 \times 20 \times 20 \text{ m}^3$ por bloque, formato común en todos los escenarios evaluados. El modelo incorpora una base de datos con información geológica del yacimiento, la configuración inicial viene dada con coordenadas X,Y,Z y parámetros físicos según el tipo de roca (RMR, UCS, d_{20} , d_{50} , d_{80}).



**Figura 32. Modelo de bloques
“Mina A”.**

En la Figura 32, se puede observar la caracterización del tipo de roca en base a parámetros geotécnicos, estos serán utilizados para diferenciar el comportamiento físico y restricciones que tendrá cada bloque.

Tabla 1. Discretización Modelo de bloques.

	Este (x)	Norte (y)	Elevación (z)
Tamaño de bloques [m]	20	20	20
Dimensiones [m]	400	340	1240
Número de bloques	21	18	63

En la Figura 2 se muestra el proceso de rebloqueo del modelo, realizado a partir de las dimensiones y tamaños de bloque.

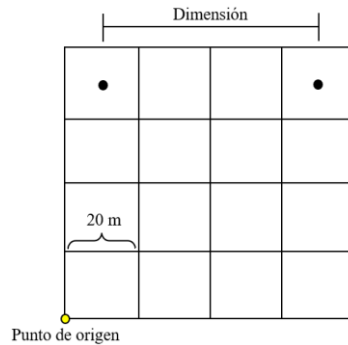


Figura 33. Rebloqueo modelo de bloques.

El número de bloques en cada dirección se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Nº de bloques} = \frac{(\text{Coordenada máxima} - \text{Coordenada mínima})}{\text{Tamaño de bloques}} + 1$$

El punto de origen del modelo de bloques para cada eje (X, Y o Z) se define según:

$$\text{Punto de origen (X, Y o Z)} = \text{Cordenada mínima} - \frac{\text{Dimensión}}{2}$$

3.2.2 Malla de extracción

El nivel de producción se organiza mediante una malla de extracción tipo El Teniente de 16 m × 20 m, compuesta por 294 puntos de extracción. La separación vertical entre el nivel de hundimiento y el nivel de producción es de 18 m, condición que define la geometría de las columnas de extracción

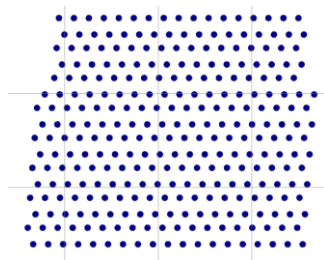


Figura 34. Vista en planta malla de extracción “Mina A”.

3.2.3 Carta de extracción

La carta de extracción indica el tonelaje extraído por período para cada punto de extracción, representando la secuencia de apertura de los puntos y la velocidad de extracción. El plan considera un total de 72 períodos de extracción, equivalentes a 7 años de operación.

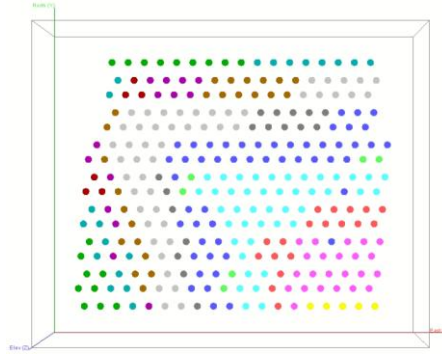


Figura 35. Secuencia apertura de puntos (secuencia por colores).

3.2.4 Distribución temporal

La planificación de la extracción se distribuye temporalmente según se muestra en la Tabla 2, considerando el período comprendido entre los años 2019 y 2025.

Tabla 2. Distribución de períodos de extracción por año.

Periodo [año]	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Meses	8	12	12	12	12	12	4

3.3 Indicadores estadísticos de error

Con el fin de evaluar los resultados de los modelos de simulación y de los algoritmos de mezcla implementados, se emplearon métricas estadísticas orientadas a cuantificar la diferencia entre los valores simulados y los valores observados de la operación. Estas métricas permiten analizar tanto la magnitud absoluta del error como su comportamiento relativo respecto al valor real, entregando una base objetiva para la comparación de resultados.

3.3.1 Error Cuadrático Medio (RMSE)

El Error Cuadrático Medio (RMSE) fue utilizado como indicador de precisión global del modelo, dado que cuantifica la desviación promedio entre los valores simulados y observados, penalizando de manera más severa los errores de mayor magnitud. Esta propiedad resulta particularmente relevante en planificación minera, donde desviaciones significativas en variables como ley o tonelaje pueden tener un impacto directo en la toma de decisiones operacionales.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Vsim - Vobs)^2}{N}} \quad (1)$$

Donde:

Vsim= valor simulado

Vobs= valor observado

N= número de datos

3.3.2 Error Relativo (RE)

El Error Relativo es utilizado con el objetivo de evaluar la diferencia entre el valor simulado y el valor real en términos porcentuales, permitiendo una interpretación directa del error respecto a la magnitud de la variable analizada. Esta métrica facilita la comparación del resultado del modelo entre distintos escenarios y algoritmos de mezcla, independientemente de la escala absoluta de los datos.

$$RE \text{ [\%]} = \frac{Vsim - Vreal}{Vreal} \cdot 100 \quad (2)$$

3.4 Configuración y Calibración de los Algoritmos de Mezcla

Para la evaluación comparativa se configuraron y calibraron los tres algoritmos de mezcla disponibles en Geovia Gems PCBC, CA3D y Marker Mixing. Cada uno fue ajustado utilizando parámetros específicos recomendados por la documentación del software y calibrados contra la carta de tiraje histórica de la operación.

3.4.1 CA3D (Autómata Celular)

La calibración del algoritmo CA3D aplica parámetros diferenciales según el tipo de roca, el cual se divide en siete códigos de roca presentes en el dominio geológico de la “Mina A”. Además, se definieron valores específicos de probabilidades para la lógica de movimiento del material, ángulos de reposo, quiebre y factor de esponjamiento en el modelo de formato de rocas de PCBC, partiendo de correlaciones empíricas basadas en propiedades geotécnicas previamente medidas y visibles en los atributos del modelo de bloques (RMR, UCS, d_{20} , d_{50} y d_{80}).

El modelo se calibro mediante un proceso iterativo a partir de un escenario inicial. La validación se realiza una vez que se logra replicar el comportamiento de mezcla esperado, a partir de los valores medidos del material extraído y los datos de la carta de extracción histórica. Debemos recordar que dentro de las ventajas de este método esta la independencia frente a las herramientas utilizadas previamente las cuales trabajan a nivel de Slide File. Los atributos físicos originales del modelo (coordenadas, densidad, ley, propiedades geotécnicas) no fueron modificados, únicamente se ajustaron las variables de control propias del algoritmo CA3D, resultando en la configuración observada en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de calibración según el tipo de roca.

Código de roca	Angulo de reposo [°]	Angulo de quiebre [°]	Factor de esponjamiento	Porcentaje de finos [°]
1	37	47	1.24	0.5
5	38	48	1.22	0.5
6	35	45	1.24	0.5
7	34	44	1.22	0.6
8	38	48	1.21	0.5
9	37	47	1.25	0.7
99	36	46	1.30	0.8

Los parámetros son calibrados según el tipo de roca, los cuales se fundamentan por el comportamiento del material y atributos geotécnicos, teniendo gran influencia el porcentaje de

material fino y esponjamiento, que influirá en los valores de ley media estimados, tal como lo demuestra la literatura, por lo que se asigna un porcentaje alto de finos en el material 99 y 9 al estar ubicado en capas superiores de la mina y factores comunes para el resto del material que se encuentra en cotas inferiores.

En el menú de Perfiles Avanzados se ajusta la lógica de movimiento que seguirá cada celda de material. La determinación de estos parámetros se realizó mediante una serie de simulaciones iterativas, permitiendo calibrar el modelo de manera precisa, con relación a los datos disponibles. Durante este proceso, se evaluó el nivel de influencia de cada parámetro sobre los resultados, seleccionando finalmente aquellos que produjeron la mejor concordancia con el comportamiento esperado en la migración y mezcla del material.

Tabla 4. Lógica de movimiento del material en CA3D.

Parámetros	Valor
Fines [%]	0.8
Subblock_size [m]	4
Rilling_angle [°]	35
Setmh	180

Fines: Probabilidad de que el material fino remplace una celda vacía.

Horizonte de mezcla (MH): altura que determina el límite de los fenómenos de mezcla horizontal y vertical. A mayor altura, existe mayor mezcla y sobre este seguirán ocurriendo fenómenos de migración de finos (rilling y toppling).

A diferencia de la HIZ (altura de interacción) el horizonte de mezcla fue creado para material fragmentado dentro de PCBC.

El cálculo del Horizonte de mezcla viene dado por la siguiente formula:

$$MH = (H (Undercut)) + \frac{HIZ}{DCF} * Swell \quad (3)$$

Donde:

H (Undercut): es la altura del nivel de hundimiento medida desde el nivel de producción

HIZ: altura de interacción

DCF: Factor de control de tiraje

Swell: es el factor de esponjamiento

3.4.2 Simulación Marker Mixing

Dado que la mina del estudio corresponde a una operación existente, se dispone de una malla y carta de extracción histórica previamente definidas. En este contexto, se realiza el proceso de calibración del algoritmo, el cual, a diferencia del descrito previamente, en este se discretiza el modelo de bloques a través de “slices” o “laminas” que dividen el material y permiten representar la influencia de la extracción entre puntos vecinos a través del desplazamiento de trazadores para las partículas.

Para la construcción del Slide File se consideró la geometría del elipse en base a supuestos propuestos por el manual técnico del software, donde se utiliza la herramienta “Plot Draw Circles” la cual muestra la superposición de las elipses de los conos de extracción, asegurando que exista un comportamiento interactivo entre las columnas y evita la pérdida de material que deba ser considerado en la simulación de flujo gravitacional tal como se muestra en la Figura 56.

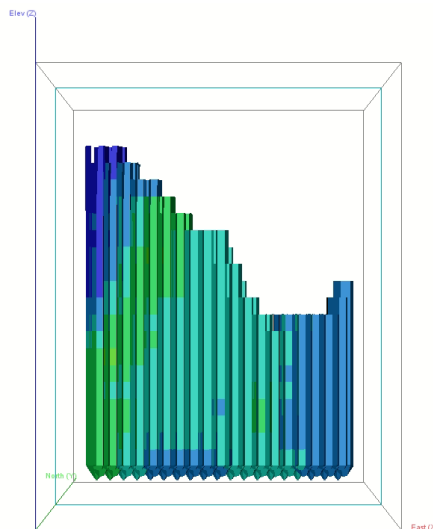


Figura 36. Slice File generado para los puntos de extracción.

En la Figura 36 se observa la geometría de los conos de extracción, los cuales contienen la información discretizada del modelo utilizada por Marker mixing para aplicar fenómenos como el

rilling y toppling, además, es necesario incorporar material externo correspondiente a cotas superiores que actúa como material diluyente que migra hacia los puntos de extracción.

Luego se calibran los parámetros que controlan la lógica de movimiento del material mezclado, incorporando mecanismos tales como: congelamiento de columna, erosión, mezcla vertical, horizontal, rilling, toppling, mezcla secuencial y migración de finos. Estos parámetros son modificados en el menú de perfil avanzado.

Tabla 5. Parámetros Menú Perfil Avanzado Marker Mixing.

Parámetro	Valor
Topple_slope	35
Rill_slope	35
Erosion	0.02
Fines	0.8
Base_frozen	0.5
Ht_frozen	180

En la Tabla 5 se observan los valores asignados en el menú de perfil avanzado que, fueron obtenidos tras un proceso iterativo de calibración, los cuales permiten reproducir de mejor manera el comportamiento de mezcla observado mediante la ley media y tonelaje histórico extraído.

3.4.3 Simulación FlowSim BC

En esta sección se presentan los parámetros calibrados y los mecanismos incorporados en la simulación de flujo gravitacional disponibles en el software de FlowSim, además, en la Tabla 6 se muestran las variables consideradas con el fin de obtener resultados representativos.

Tabla 6. Parámetros Calibración FlowSim BC

Parámetro	Valor
Cave back	Activo
Factor de ajuste n	7
Factor de ajuste m	0.5
Discretización [m]	4
Angulo de reposo [°]	35

La metodología de calibración de los parámetros n y m se basa en criterios propuestos por Valencia [34]. En el proceso de calibración se utiliza el factor de ajuste n , el cual está relacionado con el diámetro de la zona de extracción (IEZ), donde se considera que bajos valores de n están relacionados con una fragmentación gruesa y valores sobre 9 asociados a una fragmentación fina, lo que se traduce en una mayor zona de extracción.

El factor m maneja la probabilidad de mayor o menor mezcla de bloques lejanos o cercanos para reemplazar un bloque vacío en relación con la calidad de roca RMR. Debido a que el flujo de material granular tiende privilegiar zonas de menor calidad de roca, dando una mayor probabilidad de flujo a los bloques de menor calidad geomecánica y un mayor valor de m intensifica el flujo preferencia de finos hacia esa zona. Para el caso del estudio presente predominan condiciones de una fragmentación media fina y flujo de material preferencial.

3.5 Evaluación económica del proyecto

En esta etapa del estudio, se realiza la evaluación económica del proyecto mediante el cálculo del valor actual neto (VAN), el cual se utiliza como indicador para comparar el impacto de los diferentes escenarios simulados. Los parámetros económicos considerados fueron definidos a partir de un benchmarking de valores comúnmente empleados en estudios de *panel caving*, los cuales se presentan en la Tabla 7 y se mantienen constantes para todas las evaluaciones.

Tabla 7. Parámetros Económicos.

Parámetro	Valor
Precio de Cu [USD/lb]	3
Costo Mina [USD/t]	8
Costo Planta [USD/t]	20
Costos de desarrollo [USD/por punto de extracción]	200.000
Tasa de Descuento [%]	10
Recuperación Metalúrgica [%]	85

3.5.1 Cálculo de NSR

A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas para el cálculo del Net Smelter Return (NSR) para el mineral de Cu, considerando el ingreso por venta del mineral y los costos operacionales asociados al proceso de extracción minero y de planta.

$$NSR = Ingreso - Costos \quad (4)$$

$$Ingresos = Ley (\%) \cdot Precio \left(\frac{\$}{lb} \right) \cdot Recuperación Met. (\%) \cdot Factor conversión = [\$ / t] \quad (5)$$

$$Costos = Costos operativos + Costos de procesamientos \quad (6)$$

3.5.2 Cálculo de VAN

Para el cálculo del VAN se muestra el procedimiento utilizado por el software PCBC, considerando una tasa de descuento de un 10% y aplicando la siguiente formula:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} \quad (7)$$

Donde:

n: Número total de periodos

t: Periodo de tiempo

r: Tasa de descuento

Ft: Flujo de caja

3.6 Propuesta de acople entre FlowSim BC y Geovia Gems PCBC

El modelo diluido generado por FlowSim representa la discretización y simulación del flujo gravitacional en las columnas de extracción, proporcionando la distribución de leyes minerales por cada punto de extracción, la cual define las reservas efectivamente extraíbles del proyecto.

La finalidad de incorporar estos modelos diluidos en PCBC es evaluar la factibilidad de su integración en el flujo de planificación, utilizando distintas secuencias de extracción simuladas en FlowSim para su utilización en procesos de planificación productiva.

3.6.1 Identificación del punto de integración

Se analizó el flujo de planificación de PCBC, identificándose la etapa posterior a la definición de los puntos de extracción como el único punto donde el modelo diluido puede ser incorporado sin modificar la lógica de planificación interna del software.

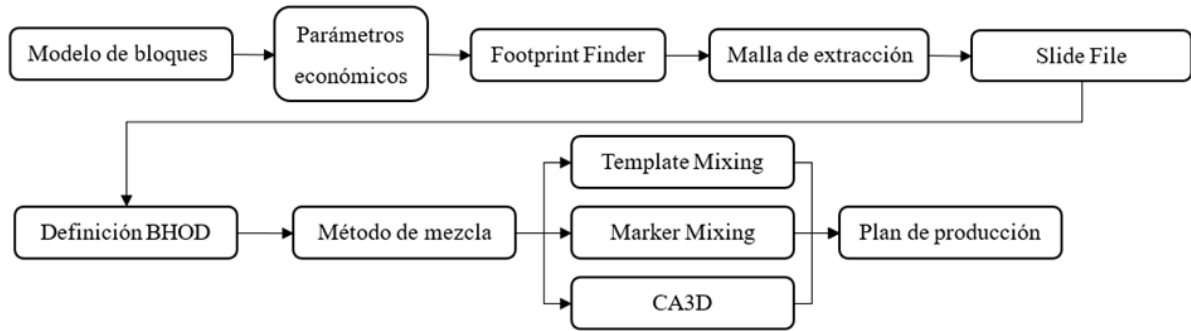


Figura 37. Diagrama de flujo de trabajo PCBC.

En esta etapa del flujo de trabajo, PCBC genera archivos denominados Slide files como se observa en el capítulo 2.5.1, los cuales representan la discretización del modelo de bloques en columnas de extracción asociadas a cada punto de extracción. Tanto los Slide files de PCBC como los resultados generados por FlowSim comparten una estructura conceptual similar, basada en parámetros comunes de construcción, tales como la ley mineral, altura de columna, el área basal de cada UBC y el tonelaje asociado a cada por punto de extracción. Este modelo diluido generado en FlowSim es importado en PCBC con el objetivo de aplicar el Slide file en la evaluación económica sin incorporar métodos de mezcla adicionales, considerando que los efectos de mezcla y dilución ya han sido integrados previamente a través de la simulación realizada en FlowSim.

3.7.2 Importación del modelo diluido

Para permitir su incorporación en Geovia Gems PCBC, fue necesario adaptar la estructura de este archivo de salida al formato requerido por los Slide file. Esta adaptación consistió en reorganizar y transformar las variables de FlowSim de modo que coincidieran con la estructura y atributos utilizada por PCBC, manteniendo la correlación directa entre punto de extracción, columna de extracción y ley diluida.

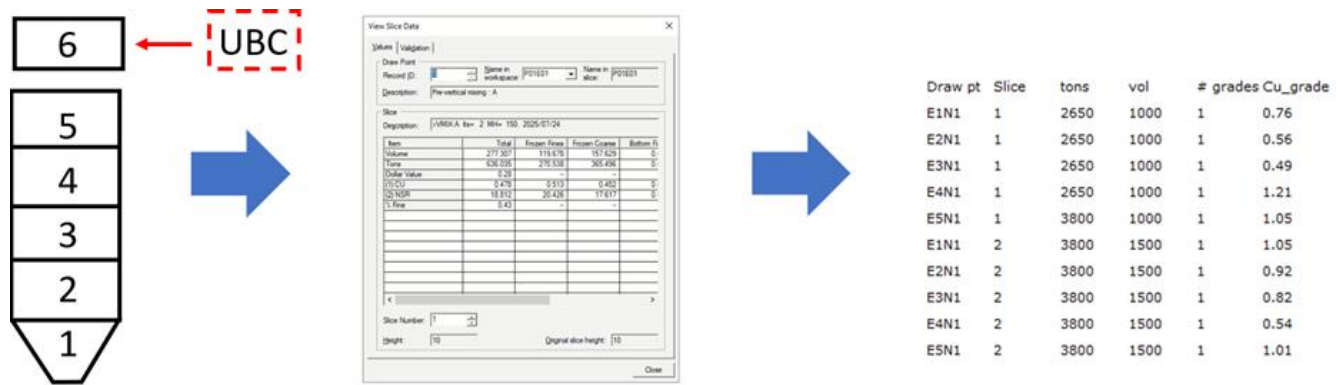


Figura 38. Secuencia de homologación del modelo diluido.

Cabe destacar que, en PCBC, la geometría de los Slide files, particularmente la altura de la columna y el área basal puede variar según los criterios de construcción definidos durante la preparación del modelo. En algunos casos, para ajustar la altura total de la columna o incorporar contribuciones laterales, se agrega una extensión del modelo de bloques considerando aportes sobre la topografía de la operación. A través de un script se incluye este modelo adicional con densidad genérica para la definición del HOD (Height of Draw). El volumen de material extraído se importa al Slide File y se valorizan las columnas de extracción, asegurando el cumplimiento de los requerimiento de geometría de la altura columna sin alterar la distribución de leyes diluidas generada por FlowSim como se muestra en la Figura 39.

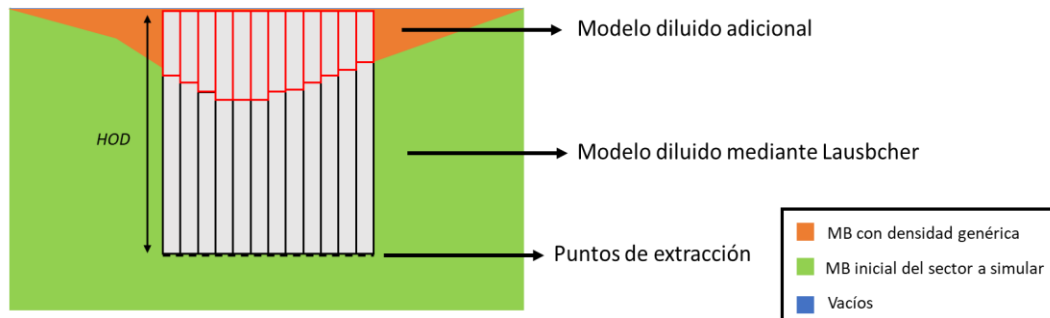


Figura 39. Extensión de columnas SF considerando aportes laterales.

Una vez realizada esta modificación estructural, el modelo diluido fue importado en PCBC como un Slide file equivalente, permitiendo la visualización y evaluación de las columnas de extracción en base a las leyes diluidas generadas por FlowSim, sin alterar la distribución de leyes definida por la simulación de flujo gravitacional.

Una vez realizadas las modificaciones y validada la correcta carga de la información dentro del módulo, los Slide files debieron ser guardados en formato nativo.dsf, dado que PCBC no permite la lectura de archivos en formato Excel para su uso en los módulos de planificación y evaluación económica. Este paso resulta crítico para asegurar la compatibilidad del modelo diluido con el flujo de trabajo interno del software.

3.6.2 Limitaciones de uso del diluido en PCBC

Al evaluar el acople entre el modelo diluido generado por FlowSim BC, dentro del entorno de planificación de Geovia Gems PCBC se verificó que PCBC aplica mecanismos internos de mezcla vertical y horizontal sobre el material fragmentado de manera automática al ejecutar la secuencia de extracción. Lo que implica que cualquier plan de producción ejecutado dentro de PCBC modificaría la distribución de leyes diluidas previamente importadas desde FlowSim, alterando los resultados obtenidos de la simulación de flujo gravitacional. Por consiguiente, la distribución de material obtenidos en estas condiciones no serían comparables en el mismo escenario.

Debido a la limitación en la mezcla aplicada, no se ejecutaron planes de extracción, ya que incorporan procesos adicionales de mezcla que afectan la integridad de los datos simulados. Por otra parte, se verificó que la estructura del Slide file puede ser modificada e importada correctamente dentro del software corroborando que la información proveniente del modelo diluido de FlowSim es reconocida por PCBC sin alterar la distribución de leyes definida por la simulación de flujo. Por lo tanto, PCBC se utilizó únicamente para comprobar la factibilidad del acople con el fin de validar la compatibilidad estructural de los Slide files y la lectura correcta del tonelaje y ley dentro de cada UBC. Por último, se identificó que PCBC no realiza el cálculo del VAN cuando se trabaja con una secuencia de extracción previamente definida e importada, limitando la posibilidad de evaluar el desempeño económico de los modelos diluidos provenientes de FlowSim dentro del entorno de planificación.

4 RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados a partir de las simulaciones realizadas previa calibración con los parámetros discutidos en el capítulo anterior, utilizando los distintos algoritmos de mezcla implementados en los softwares PCBC (CA3D / MMIX) y FlowSim BC.

Los resultados se exponen de manera comparativa, considerando indicadores de mezcla y económicos tales como la ley media extraída, dilución y VAN. Las simulaciones fueron ejecutadas bajo escenarios equivalentes, manteniendo los principales parámetros de entrada y discretización dentro de las limitaciones de configuración para cada método de mezcla.

4.1 Marker Mixing

En la sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones mediante el algoritmo MMIX, utilizando el caso de estudio base, con los mismos valores asignados en términos geotécnicos y económicos. La herramienta utilizada modela el flujo del material por medio del seguimiento con trazadores discretos dentro de cada cono de extracción discretizado, lo que permite comprender el comportamiento del material gracias al seguimiento de desplazamiento de cada partícula de material.

4.1.1 Curva Tonelaje Ley

Se presenta el gráfico de tonelaje ley por período, mostrando el tonelaje extraído y el impacto en la estimación leyes minerales en base a la calibración. Lo que permite el análisis de la mezcla proporcionada por MMIX. Donde en el año 2023 hay una subestimación en la ley media y en el año inicial y final se observa la tendencia a sobreestimar las leyes simuladas.

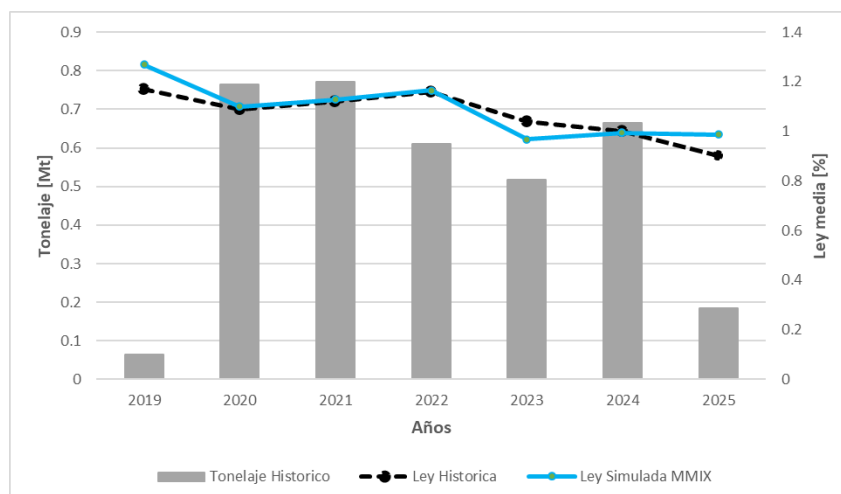


Figura 40. Gráfico Tonelaje Ley por período simulado con MMIX.

4.1.2 Error relativo y cuadrático medio

En la Tabla 8 se presentan los resultados de las simulaciones, donde se obtiene un error relativo medio de 4.01 % y un error cuadrático medio de 0.058 %, lo que indica una baja desviación global entre las leyes simuladas y las históricas. En los períodos iniciales y finales de la simulación se observa una baja desviación, mientras que en los períodos intermedios los valores se mantienen cercanos a la ley esperada.

Tabla 8. Resultados estadísticos de MMIX.

Periodo	Ley Media Histórica [%]	Ley Media Simulada [%]	Error relativo [%]
2019	1.17	1.27	8.55
2020	1.09	1.1	0.92
2021	1.12	1.13	0.89
2022	1.16	1.16	0.00
2023	1.04	0.97	6.73
2024	1.00	0.99	1.00
2025	0.9	0.99	10.00

4.1.3 Modelo remanente

Para la generación del modelo remanente con la herramienta Marker Mixing se divide el material por capas de diferentes colores con el fin de representar mejor el movimiento de partículas

de capas superiores hacia cotas inferiores, tal como se muestra en la Figura 41, donde las partículas de color verde están compuestas principalmente por material diluyente que es casi en su totalidad.

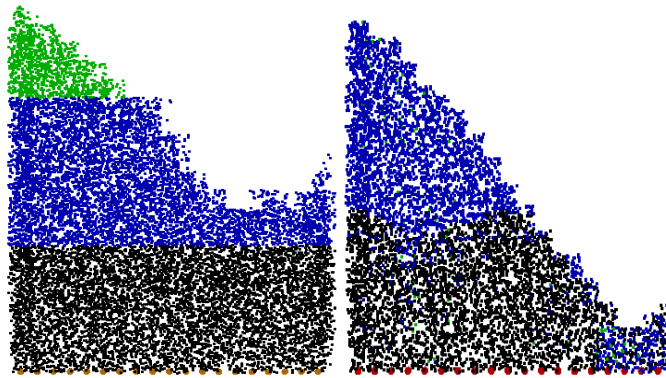


Figura 41. Vista perfil Norte: Izquierda) Previo extracción; Derecha) Post extracción MMIX.

Como resultado de la simulación con trazadores visualmente se observa menor volumen de material extraído remanente, esto al no contemplar el material fuera de los límites de los conos de extracción. Por esta razón fue relevante la incorporación previa de material externo en el proceso de calibración.

4.1.4 Dilución

En la Figura 42 se observa la entrada de material diluyente de manera significativa desde el periodo 38 que alcanza hasta un 41% de dilución alcanzada en el periodo final.

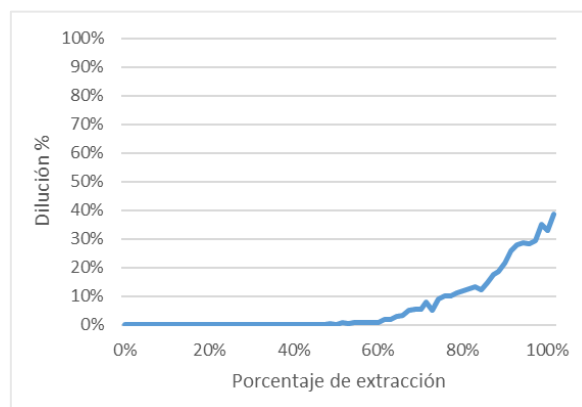


Figura 42. Curva Dilución Acumulada

4.1.5 Evaluación económica

Se evaluó el desempeño económico del caso de estudio a través del cálculo del VAN acumulado a partir de los resultados de tonelaje y ley media obtenidos en la simulación del plan de producción. La Tabla 9 entrega los resultados por período incluyendo el NSR estimado y los flujos de caja, lo que permite analizar el impacto económico de la mezcla simulada durante la evaluación económica del proyecto.

Tabla 9. Evaluación económica MMIX

Año	Tonelaje extraído [kt]	Ley media [%]	NSR del período [MMUS\$]	Costo de desarrollo por punto de extracción [MMUS\$]	Flujo de caja [MMUS\$]	Flujo descontado [MMUS\$]	VAN acumulado [MMUS\$]
2019	649	1.27	\$ 28.18	\$ 21.20	\$ 6.98	\$ 6.98	\$ 6.98
2020	7,648	1.1	\$ 258.80	\$ 37.60	\$ 221.20	\$ 201.09	\$ 208.06
2021	7,705	1.13	\$ 273.74	\$ -	\$ 273.74	\$ 226.24	\$ 434.30
2022	6,109	1.16	\$ 227.32	\$ -	\$ 227.32	\$ 170.79	\$ 605.09
2023	5,172	0.97	\$ 137.22	\$ -	\$ 137.22	\$ 93.72	\$ 698.81
2024	6,643	0.99	\$ 183.71	\$ -	\$ 183.71	\$ 114.07	\$ 812.88
2025	1,836	0.99	\$ 50.78	\$ -	\$ 50.78	\$ 28.66	\$ 841.55

Se observa que el mayor aporte al VAN acumulado se concentra en los períodos intermedios de la simulación en los cuales coinciden mayores leyes medias, dado que no se incorporan costos de desarrollo por punto de extracción, al no requerir la apertura de nuevos puntos en dichas etapas.

4.2 CA3D (Autómata Celular PCBC)

El algoritmo CA3D modela el flujo de material utilizando reglas de autómata celular, permitiendo reproducir interacciones locales y la evolución de la ley mineral obtenida durante el proceso de extracción. Los resultados fueron obtenidos tras un tiempo de simulación de 1400 segundos y muestran el comportamiento del material influenciado por el factor de esponjamiento y propiedades geotécnicas de los distintos tipos de roca, evidenciando las variaciones espaciales y temporales en la distribución del material extraído.

4.2.1 Curva Tonelaje Ley

El gráfico de tonelaje ley por período permite analizar el impacto del mecanismo de mezcla simulado sobre la estimación de ley media. Los resultados evidencian una sobreestimación de la ley durante el período 2019 como resultado de la falta de erosión del elipsoide de extracción en la base de la columna, limitando la incorporación de mineral de menor ley en etapas tempranas. Asimismo, se observan ligeras variaciones en los resultados obtenidos en los periodos de los años 2022, 2023 y 2024. Producto de la naturaleza de los mecanismos de migración de finos y rilling que tienen gran en estas etapas.

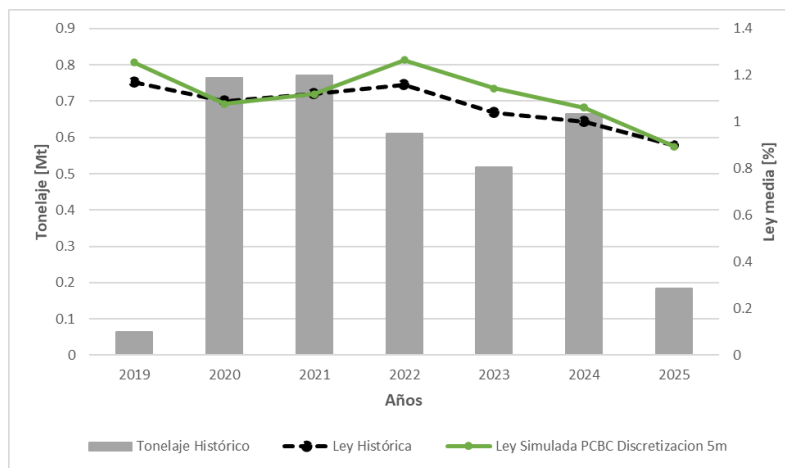


Figura 43. Gráfico Tonelaje Ley por período simulado con CA3D.

4.2.2 Error relativo y cuadrático medio

Los resultados muestran un error relativo medio de un 4.88% y un error cuadrático medio de 0.068%, lo que indica la capacidad del modelo de autómatas celulares presente en PCBC de reproducir el comportamiento de la ley media extraída a lo largo de los periodos evaluados como se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados estadísticos de CA3D.

Periodo	Ley Media Histórica [%]	Ley Media Simulada [%]	Error relativo [%]
2019	1.17	1.25	7.16
2020	1.09	1.08	1.24
2021	1.12	1.12	0.01
2022	1.16	1.26	9.01
2023	1.04	1.14	10.02
2024	1.00	1.06	6.04
2025	0.9	0.89	0.67

4.2.3 Dilución

La Figura 44 muestra la evolución de la dilución acumulada en función del avance de la extracción. Los resultados indican que la dilución se manifiesta de forma relevante a partir del período 44 de un total de 72 períodos simulados, lo que corresponde aproximadamente al 60 % del material total extraído.

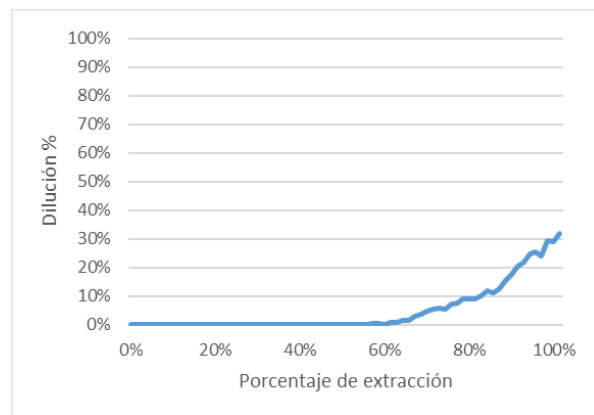


Figura 44. Curva Dilución Acumulada.

La dilución aumenta de manera progresiva, evidenciando una mayor contribución de material estéril que migra de cotas superiores, mediante el fenómeno “toppling” alcanzando valores de hasta un 32% de dilución.

4.2.4 Modelo remanente

Se presenta una vista en perfil del modelo previo y posterior a la extracción, donde es posible observar la distribución del material remanente y la generación de flujo gravitacional producto del avance de la extracción. CA3D permite identificar zonas con mayor concentración de material estéril o de baja ley, evidenciando diferencias en el flujo según las características físicas del tipo de roca presentes en el yacimiento.

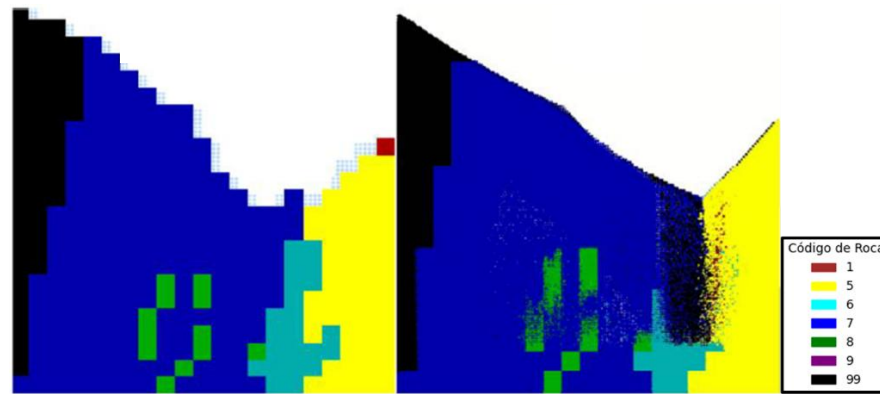


Figura 45. Vista perfil Norte: Izquierda) Previo extracción; Derecha) Post extracción CA3D.

4.2.5 Evaluación económica

A partir de los resultados de tonelaje y ley obtenidos con el algoritmo de CA3D, se realizó la evaluación económica utilizando los parámetros económicos definidos en la metodología, como se observa a continuación en la Tabla 11

Tabla 11. Evaluación económica CA3D.

Año	Tonelaje extraído [kt]	Ley media [%]	NSR del período [MMUS\$]	Costo de desarrollo por punto de extracción [MMUS\$]	Flujo de caja [MMUS\$]	Flujo descontado [MMUS\$]	VAN acumulado [MMUS\$]
2019	649	1.25	\$ 27.58	\$ 21.20	\$ 6.38	\$ 6.38	\$ 6.38
2020	7,648	1.08	\$ 248.70	\$ 37.60	\$ 211.10	\$ 191.91	\$ 198.29
2021	7,705	1.12	\$ 269.37	\$ -	\$ 269.37	\$ 222.62	\$ 420.91
2022	6,109	1.26	\$ 263.23	\$ -	\$ 263.23	\$ 197.77	\$ 618.68
2023	5,172	1.14	\$ 187.89	\$ -	\$ 187.89	\$ 128.33	\$ 747.01
2024	6,643	1.06	\$ 210.00	\$ -	\$ 210.00	\$ 130.39	\$ 877.40
2025	1,836	0.89	\$ 40.86	\$ -	\$ 40.86	\$ 23.07	\$ 900.47

El VAN total del proyecto obtenido es de 900.47 MMUSD\$, el cual corresponde a la suma de los flujos de caja descontados por periodo, calculados a partir del NSR y los costos de desarrollo por punto de extracción. Los resultados muestran cómo los periodos con mayor extracción y ley simulada, reflejando el impacto de una sobreestimación de leyes del algoritmo en la rentabilidad proyectada.

4.3 FlowSim BC (Autómata Celular)

En esta sección se presentan los resultados de la simulación del flujo gravitacional del algoritmo de autómatas celulares de FlowSim aplicados al caso de estudio bajo las mismas condiciones de entrada definidas para los demás algoritmos, para el caso de FlowSim el tiempo de simulación fue de 3 días, tiempo bastante superior a diferencia de las otras herramientas. A continuación, se presentan los resultados que se centra en la reproducción de la ley media y tonelaje por período, como también la evaluación de los errores estadísticos, dilución, vista del modelo remanente e impacto económico en el cálculo del VAN.

4.3.1 Curva Tonelaje Ley

El gráfico de tonelaje ley por período evidencia que FlowSim reproduce de manera fiel la ley media estimada, con una baja desviación frente a otros algoritmos. Únicamente en el período final se observa una ligera variación, que se puede atribuir al efecto del rilling del material diluyente.

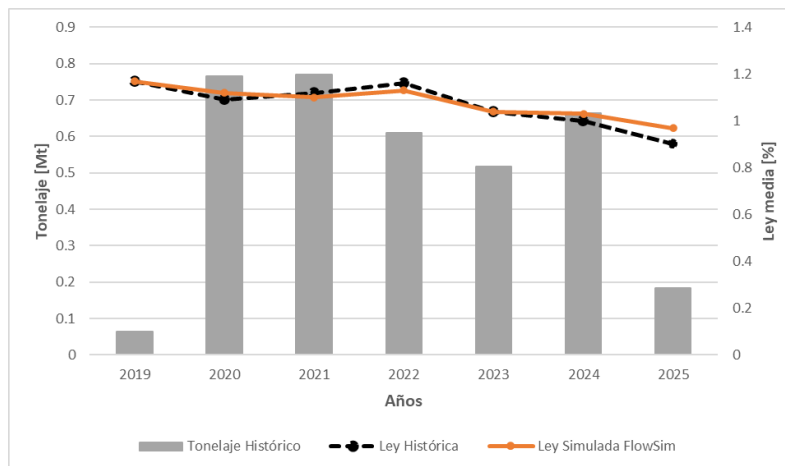


Figura 46. Gráfico Tonelaje Ley por período simulado con FlowSim BC.

4.3.2 Error relativo y cuadrático medio

Los errores relativo y cuadrático medio observados en la Tabla 12 se mantienen bajos, lo que demuestra alta certeza para replicar la ley media extraída a lo largo de los períodos simulados. Se tiene un error relativo medio bajo el 2.58% y un error cuadrático medio del 0.035% lo que representa una menor desviación respecto de otros algoritmos.

Tabla 12. Error Relativo y Cuadrático Medio

Periodo	Ley Media Histórica [%]	Ley Media Simulada [%]	Error relativo [%]
2019	1.17	1.17	0.00
2020	1.09	1.12	2.89
2021	1.12	1.11	1.07
2022	1.16	1.14	1.72
2023	1.04	1.04	0.05
2024	1	1.04	3.97
2025	0.9	0.98	8.36

4.3.3 Dilución

La Figura 47 muestra la evolución de la dilución acumulada en función del avance de la extracción. Los resultados indican que la dilución se manifiesta de forma relevante a partir del 60 % del material total extraído, la dilución alcanza el valor máximo de un 18% de dilución.

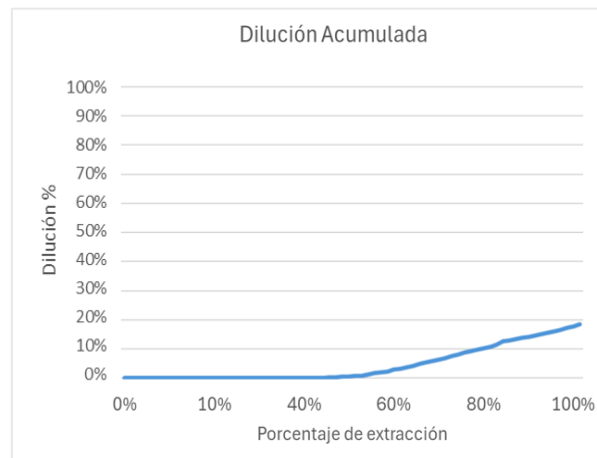


Figura 47. Curva Dilución Acumulada FlowSim.

4.3.4 Evaluación económica

En este apartado se muestran los resultados económicos obtenidos basados en parámetros base para todos los algoritmos, mostrando la diferencia en las leyes simuladas, obteniendo valores más cercanos al caso real del proyecto, es importante considerar que es un cálculo simplificado con valores promedio en base a un benchmarking, para comparar el impacto teórico del VAN a través de las estimaciones obtenidas.

Tabla 13. Evaluación Económica FlowSim BC

Año	Tonelaje extraído [kt]	Ley media [%]	NSR del período [MMUS\$]	Costo de desarrollo por punto de extracción [MMUS\$]	Flujo de caja [MMUS\$]	Flujo descontado [MMUS\$]	VAN acumulado [MMUS\$]
2019	649	1.17	\$ 24.53	\$ 21.20	\$ 3.33	\$ 3.33	\$ 3.33
2020	7,648	1.12	\$ 268.06	\$ 37.60	\$ 230.46	\$ 209.51	\$ 212.83
2021	7,705	1.11	\$ 264.20	\$ -	\$ 264.20	\$ 218.35	\$ 431.18
2022	6,109	1.14	\$ 220.48	\$ -	\$ 220.48	\$ 165.65	\$ 596.83
2023	5,172	1.04	\$ 157.43	\$ -	\$ 157.43	\$ 107.52	\$ 704.36
2024	6,643	1.04	\$ 202.27	\$ -	\$ 202.27	\$ 125.59	\$ 829.95
2025	1,836	0.98	\$ 49.25	\$ -	\$ 49.25	\$ 27.80	\$ 857.75

En la Tabla 13 se visualizan valores más conservadores frente a resultados obtenidos por CA3D, con un VAN proyectado de 857.75 MMUSD\$, resultado de una baja desviación en los valores simulados frente a los valores de ley media reales de la carta de extracción histórica de la “Mina A”.

4.4 Incorporación de FlowSim en Geovia Gems

Luego de descartar el uso del modelo diluido debido a las limitaciones del software, se opta por el acople del modelo remanente rebloqueado de FlowSim, lo que permite trabajar en la misma escala del modelo inicial. La importación requiere el ingreso de inputs mínimos para la carga del modelo de bloques, con las coordenadas geoespaciales X, Y, Z y atributos según el tipo de roca, designando densidad y ley mineral.

El proceso sigue el mismo flujo de trabajo para iniciar cualquier proyecto dentro de Geovia Gems, donde se comienza con la carga del archivo en formato ASCII o CSV. junto con la definición de atributos y variables correspondientes. La ventaja del acople del modelo remanente es que este entra en el flujo de Gems, permitiendo la evaluación de prefactibilidad a nivel de bloques, evaluando reservas extraíbles a través del tiempo y realizar simulaciones de flujo con las herramientas presentadas previamente.

5 DISCUSIÓN

El análisis comparativo entre los tres algoritmos de mezcla evaluados da cuenta de las diferencias en la forma en que cada herramienta representa el flujo gravitacional del material con parámetros calibrados, basados en diferentes fenómenos obtenidos a través de una serie de iteraciones en las simulaciones donde se logra replicar o constatar de mejor forma la distribución de leyes extraídas históricamente el en macrobloque evaluado para este estudio. Estas diferencias están relacionadas con el nivel de discretización del modelo, los mecanismos físicos incorporados y el grado de interacción entre puntos de extracción que cada algoritmo es capaz de reproducir.

Los resultados reafirman que la selección del algoritmo de mezcla tiene un impacto directo tanto en la estimación de la ley media extraída como también en los indicadores económicos, particularmente el NSR y VAN. No obstante, la interpretación de estos resultados debe ser realizada considerando el objetivo específico de cada herramienta y las limitaciones propias a su implementación dentro del entorno de planificación minera.

5.1 Tiempos de Simulación

La herramienta MMIX demostró ser el algoritmo más eficiente simulando la secuencia de extracción y evolución de la ley media en el tiempo, con bajos tiempos de simulación como se muestra en la Tabla 14 debido al nivel de discretización mediante trazadores, lo que permite, evaluar diferentes secuencias de extracción en cortos periodos de tiempo al simplificar los fenómenos de mezcla.

Tabla 14. Tiempos de Simulación.

Herramienta	Tiempo de simulación [s]
Marker Mixing	460
CA3D	1400
FlowSim BC	10,000>

Es importante mencionar que, en los algoritmos de MMIX y CA3D no fueron incorporados mecanismos asociados al cave back, a diferencia de FlowSim, lo que justifica el tiempo de cómputo en la simulación, que además genera un flujo preferencial que condiciona la dilución y ley obtenida en los periodos finales, debido a limitaciones en el acceso de información técnica para la aplicación del mecanismo.

5.2 Análisis Ley Media

Los software PCBC y FlowSim BC entregaron errores en las estimaciones de ley media bajo el 5% en relación con datos de la carta de extracción histórica. FlowSim fue el que entregó el valor más bajo, con un error relativo promedio del 2.58% lo cual se asocia a la incorporación de fenómenos como el cave back y flujo preferencial definidos a partir de parámetros geotécnicos de la roca, permitiendo una representación realista del comportamiento de flujo gravitacional. Sin embargo, en el periodo finales de la extracción, la dilución alcanza valores cercanos al 18% lo que tiende a sobreestimar la ley media, lo que sugiere limitaciones en la representación de mecanismos como el rilling superficial y la incorporación tardía de material externo definido como dilución.

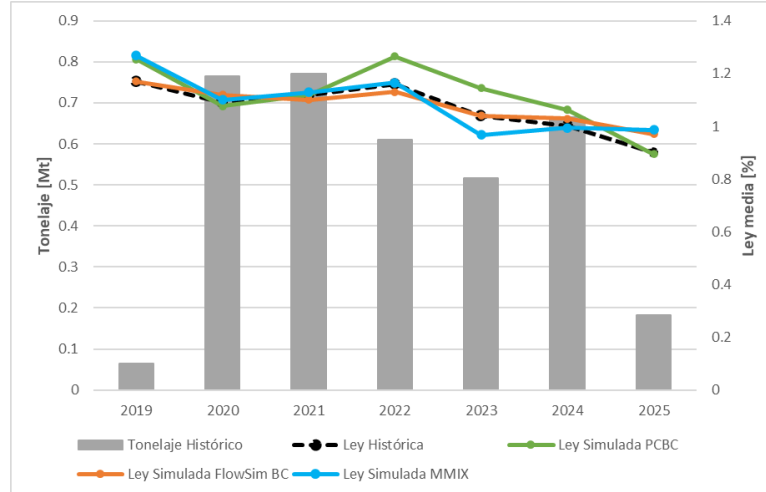


Figura 48. Gráfico de Ley media simulada para cada algoritmo de mezcla.

En el gráfico de la Figura 48 se puede observar una disminución en la ley media simulada para Marker Mixing, con un error del 4.01%, asociado a la entrada repentina de material diluyente en el año 2023. Efecto del material externo incorporado sobre las columnas de extracción que simulan el material fuera de los límites de las columnas de extracción discretizadas a nivel de slide file como se

observa en la Figura 49 y esto impacta directamente en el periodo final donde hay una sobreestimación de la ley. Este fenómeno está relacionado con la evidencia reportada en la literatura, donde la migración de finos tiene mayor influencia en periodos finales y para este caso migra el material fino de la operación de cielo abierto.

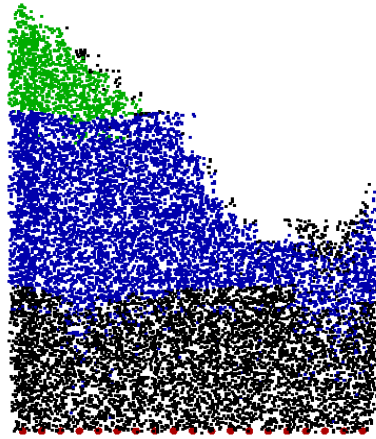


Figura 49. Vista perfil Marker Mixing ; Material externo (color negro) migra superficialmente.

Para el caso de CA3D que tiene un error del 4.88% como se muestra en la Tabla 15, los resultados evidencian una sobreestimación de la ley media en los períodos iniciales de la simulación en CA3D la cual se atribuye principalmente a la ausencia de una geometría definida para la base de las columnas de extracción como incorpora FlowSim en la geometría de bateas, limitación que impide la incorporación temprana de material de menor ley desde niveles superiores y en periodos posteriores al año 2022 se observa una sobreestimación asociada a la limitación de capacidad al replicar el fenómeno del cave back al conectar con la superficie.

Tabla 15. Análisis estadístico de algoritmos de mezcla.

Ley de cobre	CA3D	FlowSim BC	Marker mixing
Error relativo medio [%]	4.88	2.58	4.01
Ley Media	1.12	1.08	1.09
Desviación estándar	0.13	0.07	0.11
Correlación	93%	97%	85%

Finalmente, los resultados pueden verse condicionados por la capacidad de calibración del software y limitación de información geotécnica obtenida para la simulación del cave back en PCBC.

5.3 Comparativa del VAN proyectado

Desde el punto de vista económico, para la comparación del Valor Actual Neto obtenido de cada algoritmo de mezcla, se tienen diferencias relevantes. En la simulación con Marker mixing el VAN alcanza un valor de 841.55 MMUS\$, donde se observa que los mayores aportes económicos se concentran en los períodos intermedios de la simulación, como muestra la Figura 50. Un comportamiento asociado a la combinación de leyes medias levemente elevadas y la falta de costos de desarrollo por punto de extracción en dichas etapas, al no incorporar nuevos puntos de extracción. MMIX tiende a sobreestimar las leyes de los períodos iniciales y finales, así también, como la subestimación en el año 2023 que genera una incertidumbre puntual en la proyección económica en relación con la evolución real de la dilución en dicho periodo.

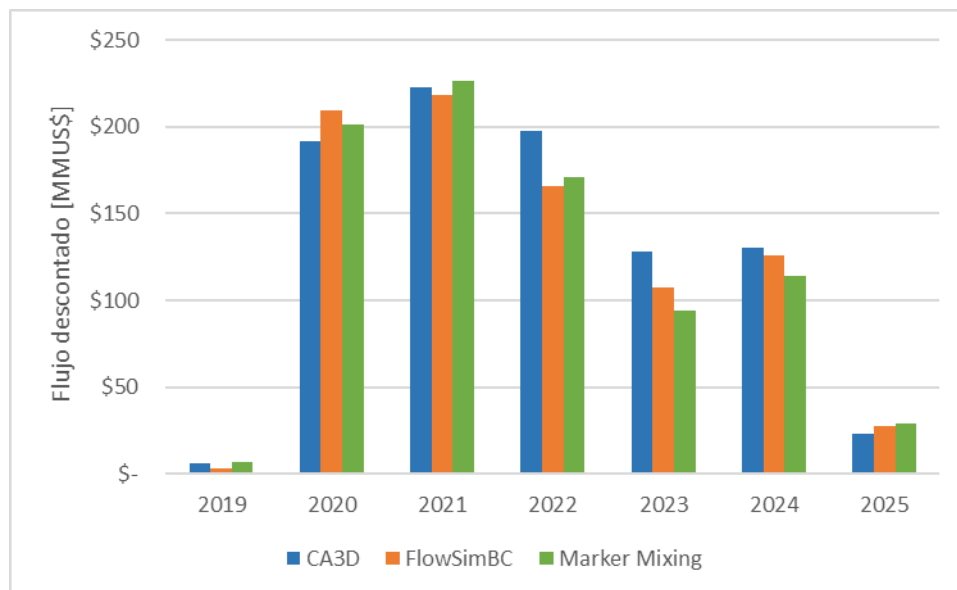


Figura 50. Gráfico Flujo Valor Actual Neto

El algoritmo de CA3D arroja el VAN más alto de la comparativa, con un valor de 900.47 MMUS\$. Como consecuencia de la sobreestimación de las leyes simuladas en varios períodos, principalmente entre los años 2022 y 2024. A pesar de lograr capturar con mayor detalle fenómenos físicos como el esponjamiento, migración de finos y toppling, una mayor cantidad de variables para calibrar no siempre garantiza una mayor precisión en términos económicos. Por eso el VAN debe interpretarse con cuidado, ya que, refleja un escenario optimista que podría faltar a la representatividad del caso de estudio.

Finalmente, FlowSim entrega un VAN con un valor de 857.75 MMUS\$ que tiene mayor relación con leyes extraídas entregadas por carta de extracción histórica del proyecto. Resultado que esta alineado con los bajos errores relativos y cuadráticos medios, lo que indica un proceso de mezcla y dilución que se ajusta mejor a la realidad. La naturaleza más conservadora de FlowSim responde a la lógica de movimiento del flujo granular que replica fielmente fenómenos de migración de finos y rilling.

Tabla 16. Comparación VAN.

	CA3D	FlowSim BC	Marker mixing
VAN acumulado [MMUS\$]	900.47	857.75	841.55

En términos económicos, las diferencias observadas en el VAN entre los algoritmos evaluados se explican principalmente por la forma en que cada modelo representa la evolución de la dilución y de la ley media que alimenta la planta. Para el caso de Geovia Gems sus algoritmos de mezcla concentran leyes más altas en los períodos iniciales del proyecto. Marker Mixing y CA3D generan flujos de caja más elevados en etapas tempranas, generando mayor impacto en el cálculo del VAN debido al efecto de la tasa de descuento. Por otra parte, el modelo de FlowSim tiene un comportamiento más conservador y estable. Al distribuir los beneficios económicos de manera más homogénea a lo largo de los años, dando como resultado potencialmente un VAN más representativo del desempeño real del proyecto. Es por esto que el VAN no refleja únicamente el beneficio final del proyecto, también nos permite analizar la sensibilidad del resultado frente a la calibración y resultados en las simulaciones de las reservas extraíbles del yacimiento.

5.4 Integración de FlowSim a Geovia Gems

El acople de FlowSim permite comprobar si es posible integrar el modelo remanente generado a partir de una simulación dentro del flujo de planificación minera de PCBC conservando la geometría de las reservas y la distribución geoespacial de leyes a nivel de bloques. Por otra parte, al ejecutar una secuencia de extracción en PCBC con un modelo diluido previamente simulado se modifican los indicadores de ley y tipo de material extraído por periodo por los mecanismos internos de mezcla horizontal y vertical que el software aplica de forma automática y que no pueden ser desactivados. Esto impide la obtención de los resultados económicos de las reservas extraíbles simuladas por FlowSim, condición que limita su uso para la evaluación de indicadores como el VAN, ya que, los resultados dejan de representar correctamente el proceso de flujo gravitacional y dilución modelada en la simulación.

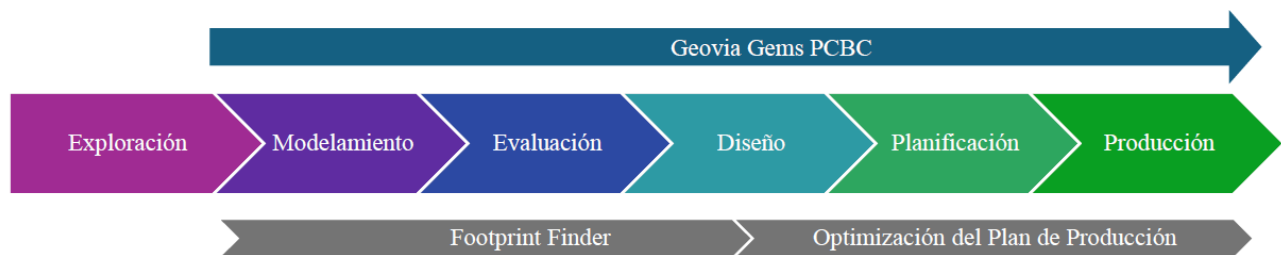


Figura 51. Ciclo de vida de un proyecto.

El valor del acople está en la posibilidad de utilizar FlowSim BC como una herramienta de validación de los mecanismos de mezcla, complementando su uso con Geovia Gems como plataforma de prefactibilidad con la herramienta Footprint Finder y planificación. La integración debe entenderse como un esquema complementario al ciclo de vida de la mina como se muestra en la Figura 51, donde cada software cumple un rol diferente. FlowSim BC incorpora el modelamiento físico y reducción de incertidumbre asociada a la dilución de las reservas extraídas y PCBC define si las reservas son económicamente extraíbles, para la posterior planificación del proyecto. De esta forma, la integración del Flowsim dentro del entorno de planificación minera de PCBC no es técnicamente posible.

6 CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el impacto de los distintos algoritmos de mezcla en los indicadores de un proyecto de *panel caving*, lo que permitió demostrar los criterios de selección de cada algoritmo de mezcla, evidenciando la forma en que se representan los mecanismos físicos de mezcla y flujo gravitacional para cada caso. El cual fue abordado mediante el análisis comparativo entre los algoritmos: CA3D, Marker Mixing y FlowSim BC, aplicados bajo escenarios equivalentes de planificación basados en información histórica de extracción para el caso de una operación subterránea real y parámetros económicos basados en *benchmarking*. Los resultados obtenidos confirman que la elección del algoritmo de mezcla y nivel de calibración tiene un efecto relevante sobre el flujo gravitacional y los indicadores económicos del proyecto. Con relación a lo anterior, la calibración de cada herramienta busca reducir el error en la planificación, el cual está limitado por la cantidad de iteraciones que sean requeridas, dependiendo del criterio del usuario y tiempos de cómputo, proceso que a medida que se incorporan mayor cantidad de información muestra una reducción de errores como también simulaciones más largas y complejidad de uso.

Para el flujo de trabajo, se utilizó el programa Geovia Gems PCBC, software de planificación minera que integra múltiples funcionalidades para la evaluación de las reservas extraíbles de un proyecto minero, y que ha sido validado durante años en diversos casos de estudio de la industria. El uso de estos métodos numéricos demostró ser útil para simular condiciones operativas a escala mina, donde se comprendió el modelamiento del hundimiento de un macrobloque, que da origen a estimaciones de las leyes minerales, dejando atrás a métodos empíricos, que pierden representatividad a medida que cambian las condiciones geotécnicas del macizo a mayor profundidad.

A partir de los resultados presentados en el estudio, se establecen las limitaciones y ventajas. Para las herramientas que funcionan a través del software de PCBC, se observó que el algoritmo de MMIX con trazadores destaca su versatilidad en la variación de las condiciones del material granular, el cual tiene una independencia total frente a CA3D, facilitando el proceso de calibración y mostró errores de 4.01% y 4.88% en la estimación de ley media respectivamente. En relación con los objetivos específicos planteados, se logró analizar el funcionamiento y los principales parámetros de entrada para cada simulador, identificando diferencias relevantes en los mecanismos físicos considerados. A nivel de discretización y los tiempos de simulación, destacó la herramienta Marker Mixing

demostrando ser eficiente para evaluaciones a nivel macro con tiempos reducidos de simulación. Por otra parte, CA3D permitió una representación más detallada de ciertos fenómenos físicos para la obtención del modelo remanente de las reservas extraíbles al considerar la totalidad del modelo para la simulación del material diluyente y con FlowSim BC se logró replicar fielmente los fenómenos de minería subterránea de *panel caving* tales como el rilling, migración de finos y cave back, el cual mostró una mejor evolución de la ley media extraída.

Bajo escenarios equivalentes, se evidenciaron diferencias significativas en la valorización del proyecto, CA3D arrojó el VAN más alto el cual va asociado a una sobreestimación de leyes en algunos periodos. Mientras que FlowSim entregó un VAN menor, lo que refuerza la importancia de interpretar los resultados económicos considerando el modelamiento numérico y no únicamente el valor final del indicador. Además, el impacto de la dilución a través de la ley media permitió constatar que los períodos finales de la extracción son particularmente sensibles según el modelo de mezcla utilizado para la entrada de dilución en periodos finales. FlowSim mostró una mejor capacidad para representar la entrada de dilución al incluir el Cave Back, el cual por otra parte no pudo ser aplicado en el estudio a PCBC por limitaciones en el acceso de documentos técnicos.

En términos de factibilidad del acople de FlowSim dentro del entorno de planificación de Geovia Gems en su versión 6.9, se comprobó que no es posible integrar el modelo diluido de flowsim dentro del entorno de planificación minera de PCBC al tener limitaciones importantes en su uso para la creación de planes de producción, debido a la aplicación de mecanismos internos de mezcla que PCBC aplica de forma automática.

Únicamente es posible evaluar el modelo remanente de un proyecto manteniendo la geometría y la distribución espacial de leyes a nivel de bloques para la evaluación de un flujo de trabajo normal. En este sentido, el uso en conjunto de ambas herramientas resulta complementario, ya que permite mejorar la interpretación técnica de los resultados y reducir la incertidumbre en la planificación, siempre que se respeten las limitaciones propias de cada software.

Las conclusiones de este estudio están condicionadas al caso particular analizado, correspondiente a una operación específica de *panel caving* denominada “Mina A”. Por tanto, la extrapolación de los resultados a otros yacimientos debe realizarse con cuidado, considerando las

diferencias geológicas, geotécnicas y de diseño, así como la necesidad de una calibración específica para cada caso.

7 RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en el estudio y contemplando las diferencias observadas en el comportamiento en los algoritmos de mezcla como también las limitaciones identificadas en los procesos de calibración, discretización y evaluación económica, se proponen las siguientes recomendaciones para futuros trabajos y ampliaciones del alcance del estudio. Estas sugerencias buscan mejorar la representatividad de los modelos y contribuir a una mejor toma de decisiones, como se describe a continuación:

- Se recomienda cuantificar el impacto de los mecanismos de mezcla para otros métodos de hundimiento como *Sub Level Caving* o presentando diferente geometría de yacimiento con el fin de evaluar la selección del footprint y las reservas extraíbles teóricas frente a condiciones reales. Por otra parte, este análisis queda fuera de los alcances del estudio, ya que, la evaluación se basa únicamente en el macrobloque de una operación subterránea a multinivel, lo que limita la definición de un nivel superior o inferior.
- Mejorar el modelo remanente de los simuladores de mezcla actuales mediante la incorporación de la topografía real posterior a la extracción, con la finalidad de calibrar el ángulo de reposo del material, permitiendo ajustar la geometría del cráter de subsidencia generado por los procesos de hundimiento y mejorar el modelamiento numérico del toppling con la geometría observada en terreno.
- Profundizar en la caracterización de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso a modo de fortalecer la calibración de los modelos de mezcla y mejorar la representación del avance del *cave back* asociados al hundimiento.
- Futuros trabajos podrían incorporar técnicas de *machine learning* (IA) en la lectura y asignación de los atributos del modelo de bloques, orientados en la automatización de los procesos de calibración de los simuladores en función de parámetros en tiempo real asociados a la geología presente en los yacimientos.

8 REFERENCIAS

- [1] G. Chitombo, «Cave mining — 16 years after Laubscher's 1994 paper "Cave mining – state of the art",» de *Caving 2010: Proceedings of the Second International Symposium on Block and Sublevel Caving*, Y. Potvin, Ed., Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2010, pp. 45-61.
- [2] E. Brown, *Block Caving Geomechanics*, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2003.
- [3] A. & G. A. van As, The design & operating philosophies of panel vs block caving, in R Castro, F Báez & K Suzuki (eds), *MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining*, University of Chile, Santiago, 2020, pp. 207-220.
- [4] R. H. & R. K. H. & R. Kvapil, «Sublevel Caving – Past and Future,» de *Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining (MassMin 2008)*, Littleton, Colorado, USA, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2006, pp. 129–153.
- [5] Diering, «Block cave scheduling with a piece of paper,» de *Proceedings of Massmin*, Canada, 2008, pp. 303-312.
- [6] R. E. S. K. P. N. L. E. & M. E. Gómez, «Analysis of extraction level layouts for block caving,» de *MassMin 2020*, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2063_53, 2020, pp. 773-786.
- [7] M. J. S. a. W. S. D. Haitham M. Ahmed*, «A comparison between Offset Herringbone and El Teniente underground cave mining extraction layouts using a discrete event simulation technique,» de *International Journal of Mining, Vancouver,, Reclamation and Environment*, 2014, p. p 71–91.
- [8] R. Kvapil, «Gravity Flow in Sublevel and Panel Caving - A Common Sense Approach,» *Book/CD published with limited circulation.*, 2004.
- [9] A. Susaeta, «Theory of gravity flow,» de *MassMin 2004*, Santiago, Chile, 2004, pp. 167-172.

- [10] A. O. H. G. Jaime Chacón, «Thirty years evolution of block caving in Chile,» de *Massmin 2004*, Santiago, Chile, 2004, pp. 388-392.
- [11] R. C. D. C. R. G. & D. S. Rene Le-Feaux, «A hybrid extraction level layout design for block caving,» de *Mining Technology (Trans. Inst. Min. Metall. A)*, 2022, pp. 51-65.
- [12] D. H. Laubscher, A practical manual in block caving, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2000.
- [13] A. Karzulovic, «Block Caving: The Efficient Mining Method,» de *in MassMin 2008*, Lulea, Sweden, 2008.
- [14] W. Hidayat, D. Sahara, S. Widiyantoro, S. Suharsono, R. Wattimena, S. Melati, I. Putra, S. Prahastudhi, E. Sitorus y E. Riyanto, «Testing the Utilization of a Seismic Network Outside the Main Mining Facility Area for Expanding the Microseismic Monitoring Coverage in a Deep Block Caving,» *applied sciences MDPI*, vol. <https://doi.org/10.3390/app12147265>, p. 12, 2022.
- [15] B. Batkhuu, «OPERATIONAL BENCHMARKING AND GROUND RESPONSE ANALYSIS FOR UNDERCUTTING IN HIGH-STRESS CAVE MINES,» *The University of Queensland*, p. 186, 2025.
- [16] J. P. A. E. E. & B. R. Roy, «Abutment loading in deep cave mines: towards understanding susceptibility to strainbursts,» 2022.
- [17] M. Edward, «A MODEL FOR GRAVITY FLOW OF FRAGMENTED ROCK IN BLOCK CAVING MINES,» *thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, The University of Queensland*, 2010.
- [18] I. J. a. R. KvHPm, «SUBLEVEL CAVING,» de *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Stockholm, Sweden, 1966, pp. 129-153..
- [19] R. Gómez, «GRAVITY FLOW AND FRAGMENTATION MODELING IN BLOCK CAVING,» 2022.
- [20] R. Kvapil, «Gravity flow of granular materials in hoppers and bins - Part I,» *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 2, nº 1, pp. 35–41, 1965.

- [21] T. Heslop, «Understanding the flow of caved ore and its influence on ore recoveries and dilution in a block cave,» de *Y Potvin (ed.), Caving 2010: Proceedings of the Second International Symposium on Block and Sublevel Caving*, Perth, Australian Centre for Geomechanics, T.G. Heslop, pp. 539-551.
- [22] G. Marano, «The interaction between adjacent draw points in free flowing materials and its application to mining,» de *Chamber of Mines Journal*, vol. vol. 22, 1980, pp. 25–32.
- [23] D. Laubscher, «Cave mining: The state of the art,» *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 1994, pp. 279-293.
- [24] C. L. G. G. D. C. R. L. H. & G. R. Yang, «Particle-scale insights into extraction zone development during block caving: Experimental validation and PFC3D simulation of gradation-dependent flow characteristics,» *Applied Sciences*, vol. 15, n° 7916, 2025.
- [25] T. Diering, «TEMPLATE MIXING : A DEPLETION ENGINE FOR BLOCK CAVE,» Gemcom Software International, Vancouver, Canada, 2007.
- [26] R. V. R. & d. I. H. F. Castro, «Determination of drawpoint spacing in panel caving: a case study at the El Teniente Mine,» de *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2012, pp. pp 871-876.
- [27] T. Diering, «PC-BC:A Block Cave Design and Draw Control System,» de *Proceedings* , Brisbane, MassMin 2000, 2000, pp. 469-484.
- [28] F. J. V.-A. S. P. Rodolfo Morales, «A novel mathematical approach for gravity-driven granular flows,» *Applied Mathematical Modelling*, p. 756–771, 2023.
- [29] M. P. S. V.-A. F. J. & N. G. Aravena, «Quantification of fines migration in block caving mining through laboratory experiments,» *Results in Engineering*, vol. 25, 2025.
- [30] R. L. & P. P. S. Castro, «Empirical observations of dilution in panel caving,» *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 114, pp. 455-462, 2014.
- [31] L. A. R. G. Raúl Castro, «Quantifying fines migration in block caving through 3D experiments,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 151, pp. 8-10, 2022.

- [32] T. Díaz, «ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MIGRACIÓN LATERAL DE FINOS EN MINERÍA DE CAVING,» *Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas*, 2024.
- [33] GEOVIA GEMS , PCBC training Version 6.9, Dassault Systèmes , 2023.
- [34] M. VALENCIA, «DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE FLOWSIM PARA SU APLICACIÓN EN MINERÍA DE BLOCK/PANEL CAVING,» MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS, SANTIAGO DE CHILE, 2014.
- [35] R. G. F. & A. E. Castro, «Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving,» *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 109, pp. 393-400, 2009.
- [36] D. Laubscher, «Planning Mass Mining Operations,» Steffen, Robertson & Kirsten, Johannesburg,, South Africa, 1993.
- [37] Y. & A. N. H. & T. D. Pourrahimian, «Mixed Integer Linear Programming Formulation for Block Cave Sequence Optimization,» *International Journal of Mining and Mineral Engineering.*, vol. 4, pp. 26-49, 2012.
- [38] M. Vera, A. Ovalle y R. Castro, «A New Methodology Based on Hill of Value for Ore Reserve Selection in Long-Term Planning for Block Caving,» de *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2020, p. Vol 37. 187–196.
- [39] F. J. S. D. POZO, «MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DE ENVOLVENTE ECONÓMICA SUAVIZADA PARA BLOCK Y PANEL CAVING,» *UNIVERSIDAD DE CHILE*, vol. TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA, 2023.
- [40] M. V. & A. O. & R. Castro, «A New Methodology Based on Hill of Value for Ore Reserve Selection in Long-Term Planning for Block Caving,» *Mining, Metallurgy & Exploration (2020)*, n° <https://doi.org/10.1007/s42461-019-00152-1>, p. 187–196, 2020.
- [41] D. Cortez, *Manual de Usuario FlowSim BC v6.3*, BCTEC, 2023.

- [42] M. FUENTES, «CALIBRACIÓN Y DESARROLLO DE FLOWSIM MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE TRAZADORES INTELIGENTES,» MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS, SANTIAGO DE CHILE, 2015.
- [43] Dassault Systèmes GEOVIA, « Leading Block Cave Planning and Scheduling Application,» www.3ds.com/GEOVIA/PCBC, 2023.
- [44] Itasca Consulting Group, Inc, REBOP (Rapid Emulator Based On PFC3D) — User's Guide., Minneapolis, 2000.
- [45] G. B. D. B. G. a. S. M. Sharrock, «Simulating gravity flow in sub-level caving with cellular automata,» de *Proceedings Fourth International Conference and Exhibition on Mass Mining*, Santiago de Chile, MassMin, 2004, p. 189–194.
- [46] M. a. S. J. Alfaro, «Predictive models for gravitational flow,» de *Proceedings Fourth International Conference and Exhibition on Mass Mining*, Santiago de Chile, MassMin , 2024, p. 179–184.
- [47] W. w. R. castro, «A new cellular automaton to model gravity flow in block caving based on physical modelling observations,» de *APCOM 33*, Santiago Chile, 2007.
- [48] D. V. a. F. Farías, «Remanent ore model generation and categorization post-block caving extraction at El Salvador Mine,» de *SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION ON MASS MINING*, SYDNEY, MassMin, 2016, p. 461–470.
- [49] T. Diering, O. Richter y D. Villa, «BLOCK CAVE PRODUCTION SCHEDULING USING PCBC,» de *SME Annual Meeting and Exhibit*, Phoenix, Arizona, USA, 2010.
- [50] N. &. D. T. Burgio, «Simulating irregular cave propagation using PCBC,» de *MassMin 2008*, Luleå Sweden, 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, 2008, pp. 1033-1042.
- [51] GEOVIA GEMS, CA3D Training, Dassault Systèmes , 2016.
- [52] A. Campbell, «Recovery and flow in cave mining: current knowledge gaps and the role of technology in the future,» de *Proceedings of the Second International*

- Conference on Underground Mining Technology (UMT 2020)*, J. Wesseloo, Ed., Perth, Australia, Australian Centre for Geomechanics, 2020, pp. 77–104.
- [53] R. A. L. G. D. & H. J. Castro, «Experiments and simulation of gravity flow in block caving,» de Y Potvin & J Jakubec (eds), *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*, Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2018, pp. 313-322.
- [54] R. a. T. U. Nedderman, «A kinematic model for the flow of granular materials,» *Powder Technology*, vol. 22, pp. 243-253, 1979.
- [55] F. B. R. G. O. S. & J. Z. R Castro, «Experimental study of mudrush mechanisms under different moisture contents in block caving,» *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2023.
- [56] Q. L. L. Wang, «Modelling rockbursts around a deep tunnel based on the particle finite element method: From progressive degradation to catastrophic ejection,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 191, 2025.
- [57] M. C. R. & M. F. Pereira, «Improving block caving production by incorporating operational risks in short-term scheduling,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 170, nº 105537, 2023.
- [58] E. V. D. B. a. A. B. Cesar Pardo, «BACK ANALYSIS OF INTENSIVE ROCK MASS DAMAGE AT THE EL TENIENTE MINE,» 2015.

9 ANEXOS

Tabla 17. Mecanismos de movimiento de material Template Mixing [25].

Mecanismo	Versión Anterior	Template mixing	Dirección	Ejemplo
Mezcla vertical	Sí	Sí	Vertical	Diferentes velocidades para el material fragmentado
Mezcla horizontal	Mínima	Sí	Horizontal	Cerca de pilares y conos, y entre límites de desarrollo principales
Toppling	Sí	Sí	Horizontal	En la superficie del hundimiento
Rilling	No	Sí	Horizontal	En la interfaz roca fragmentada/sólida
Movimiento lateral regional	Sí	Sí	Horizontal	Principalmente en límites geológicos muy marcados (ej. En una chimenea de kimberlita)
Erosión del cono	No	Sí	Vertical	Radio del cono variable (en aumento)
Estancamiento	No	No	Vertical	Radio del cono variable (en disminución)
Migración de finos	Algo	Sí	Vertical	Descenso rápido de material fino dentro de una matriz más gruesa
Piping	No	No	¿Vertical?	Pequeña ruta directa para la migración de finos
Estallidos de barro	No	No	Ambas	¿Flujo de fluido dentro de la matriz de roca?
Fallas en Open Pit	Algo	Sí	Vertical	Falla repentina en un período dado
Cave back variable en el tiempo	No	Sí	Vertical	Cambios en el Cave Back a medida que se propaga.

Tabla 18 Parámetros Tipos de Roca.

Input	PCBC: CA3D	FlowSim BC
Modelo de bloques	SI	SI
Puntos de extracción	SI	SI
Ley mineral	SI	SI
Código de roca	SI	SI
Tipo de roca	SI	SI
Densidad	SI	SI
Factor Esponjamiento	SI	SI
Porcentaje de finos (10cm<)	SI	SI
Angulo de reposo	SI	SI

Angulo de quiebre	SI	SI
Estructuras	SI	SI
Geometría de bateas	NO	SI
Incluye fragmentación	SI	SI
D20/d50/d80	NO	SI
RMR/UCS	NO	SI
Primario/Secundario/Quebrado	SI	SI
Horizonte de mezcla	SI	SI
Angulo de rilling	SI	SI

Tabla 19. Parámetros del material externo para generar rilling.

Period	Date	Bin#	External_tons	External_vol	Dolval	CUT
1	1	1	5000000	1923077	0	0

Tabla 20. Flujo de caja CA3D.

Año	Tonelaje extraído [kt]	Ley media [%]	NSR del período [MMUS\$]	Costo de desarrollo por punto de extracción [MMUS\$]	Flujo de caja [MMUS\$]	Flujo descontado [MMUS\$]	VAN acumulado [MMUS\$]
2019	649	1.25	\$ 27.58	\$ 21.20	\$ 6.38	\$ 6.38	\$ 6.38
2020	7,648	1.08	\$ 248.70	\$ 37.60	\$ 211.10	\$ 191.91	\$ 198.29
2021	7,705	1.12	\$ 269.37	\$ -	\$ 269.37	\$ 222.62	\$ 420.91
2022	6,109	1.26	\$ 263.23	\$ -	\$ 263.23	\$ 197.77	\$ 618.68
2023	5,172	1.14	\$ 187.89	\$ -	\$ 187.89	\$ 128.33	\$ 747.01
2024	6,643	1.06	\$ 210.00	\$ -	\$ 210.00	\$ 130.39	\$ 877.40
2025	1,836	0.89	\$ 40.86	\$ -	\$ 40.86	\$ 23.07	\$ 900.47

Tabla 21. Flujo de caja FlowSim.

Año	Tonelaje extraído [kt]	Ley media [%]	NSR del período [MMUS\$]	Costo de desarrollo por punto de extracción [MMUS\$]	Flujo de caja [MMUS\$]	Flujo descontado [MMUS\$]	VAN acumulado [MMUS\$]
2019	649	1.17	\$ 24.53	\$ 21.20	\$ 3.33	\$ 3.33	\$ 3.33
2020	7,648	1.12	\$ 268.06	\$ 37.60	\$ 230.46	\$ 209.51	\$ 212.83
2021	7,705	1.11	\$ 264.20	\$ -	\$ 264.20	\$ 218.35	\$ 431.18
2022	6,109	1.14	\$ 220.48	\$ -	\$ 220.48	\$ 165.65	\$ 596.83
2023	5,172	1.04	\$ 157.43	\$ -	\$ 157.43	\$ 107.52	\$ 704.36
2024	6,643	1.04	\$ 202.27	\$ -	\$ 202.27	\$ 125.59	\$ 829.95
2025	1,836	0.98	\$ 49.25	\$ -	\$ 49.25	\$ 27.80	\$ 857.75

Tabla 22. Flujo de caja Marker Mixing.

Año	Tonelaje extraído [kt]	Ley media [%]	NSR del período [MMUS\$]	Costos de desarrollo por puntos de extracción [MMUS\$]	Flujo de caja [MMUS\$]	Flujo descontado [MMUS\$]	VAN acumulado [MMUS\$]
2019	649	1.27	\$ 28.18	\$ 21.20	\$ 6.98	\$ 6.98	\$ 6.98
2020	7,648	1.1	\$ 258.80	\$ 37.60	\$ 221.20	\$ 201.09	\$ 208.06
2021	7,705	1.13	\$ 273.74	\$ -	\$ 273.74	\$ 226.24	\$ 434.30
2022	6,109	1.16	\$ 227.32	\$ -	\$ 227.32	\$ 170.79	\$ 605.09
2023	5,172	0.97	\$ 137.22	\$ -	\$ 137.22	\$ 93.72	\$ 698.81
2024	6,643	0.99	\$ 183.71	\$ -	\$ 183.71	\$ 114.07	\$ 812.88
2025	1,836	0.99	\$ 50.78	\$ -	\$ 50.78	\$ 28.66	\$ 841.55

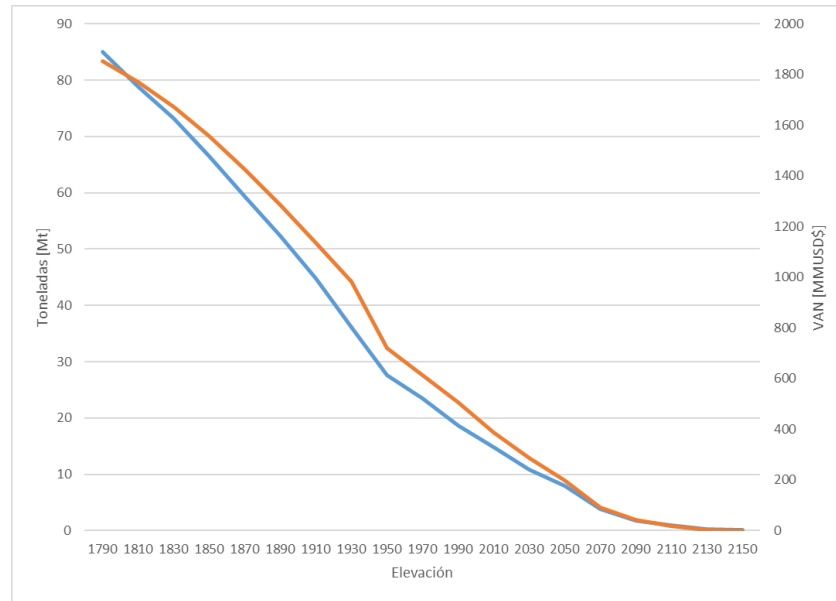


Figura 52. Gráfico selección footprint teórico VAN vs Tonelaje.

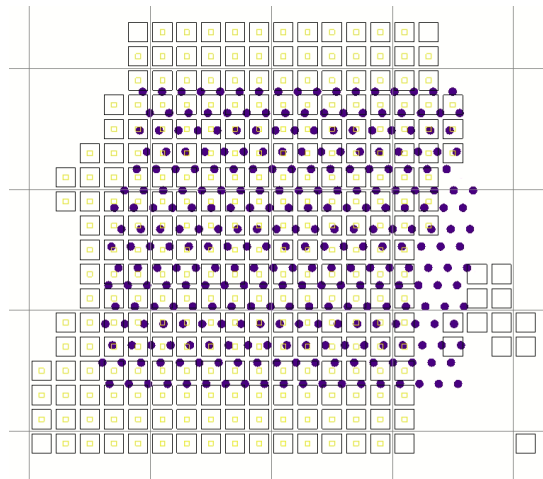


Figura 53. Layout Footprint Finder.

Tabla 23. Métodos de mezcla PCBC [33].

Method	Ease of use	Linear?	Slice File/ Block model	Comment
No mixing	Easy	Yes	Slice File	No mixing base case (In-situ)
Pre-Vertical mixing	Easy	Yes	Slice File	PCBC “Default” (includes pre-erosion)
Laubscher mixing	Easy	Yes	Slice File	Uses Laubscher tables
Sequential mixing	Harder	No	Slice File	Older method, includes toppling
Template Mixing	Harder	No	Slice File/ Block Model	Most flexible option available
REBOPT™ interface	Harder	No	Block Model	Not yet generally available
Cellular automaton (CA3D)	Harder	No	Block Model	Multiple flow and domain control

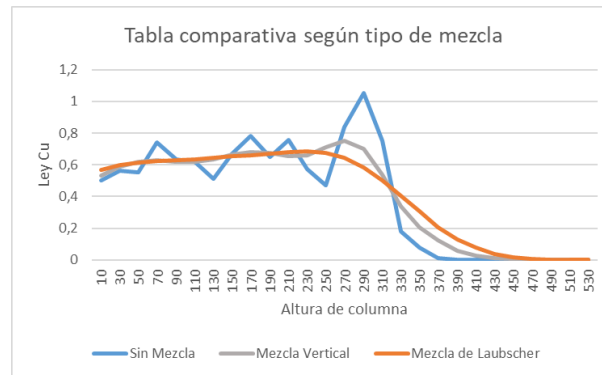


Figura 54. Gráfico Comparativo Mezcla de Laubscher y Vertical.

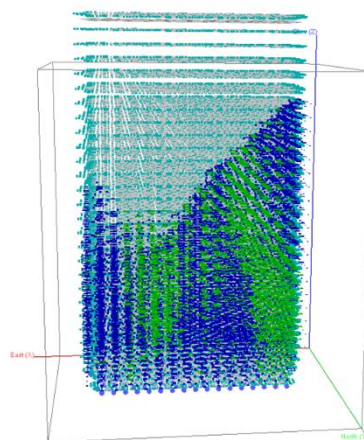


Figura 55. Dilución vertical VMIX a) mineral (azul) b) estéril (verde).

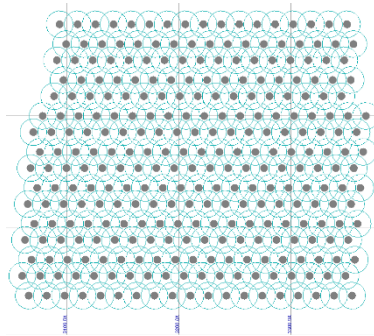


Figura 56. Círculos definen el radio del cono de extracción en el UCL [33].

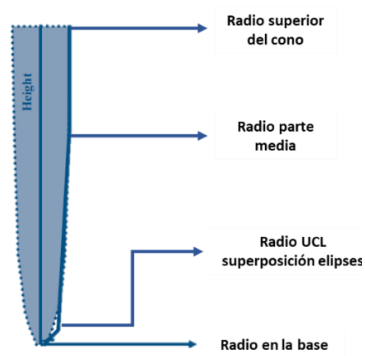


Figura 57. Geometría de cono Slide File.

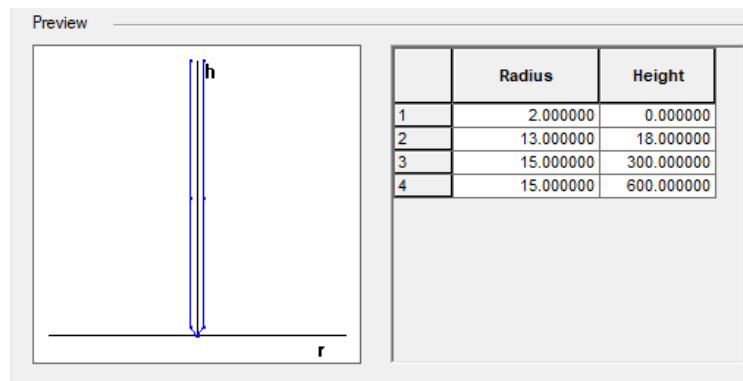


Figura 58. Medidas Cono Slide File.

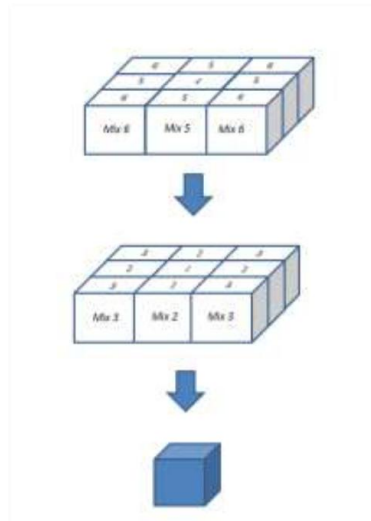


Figura 59. Lógica de movimiento Autómatas celulares.

```
cut=BlockModel.Model("Standard","cut", Column, Row, Level)
cu_price=3
cu_rec=0.85
cu_conv=2204.62

Costo_operacional=8
Costo_procesamiento=20
Costos=Costo_operacional+Costo_procesamiento

cu_rev=(cu_price*cu_rec*cu_conv)/100
cu_rev=cut*cu_rev
NSR=cu_rev-Costos

BlockModel.Model("Standard","NSR", Column, Row, Level)=NSR
```

Figura 60. Script Cálculo NSR.

Altura UCL	18
HIZ	28
DFC	0.6
Swell Factor	1.2
Ore Heigh	400
MH	77.6
DE	58.5

Figura 61. Cálculo Horizonte de mezcla.

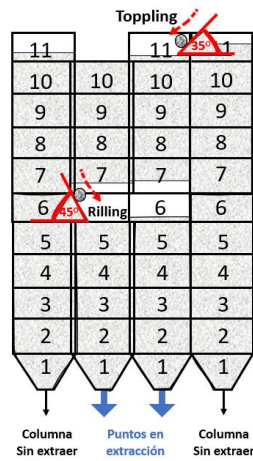


Figura 62. Ilustración mecánica de rilling y toppling.

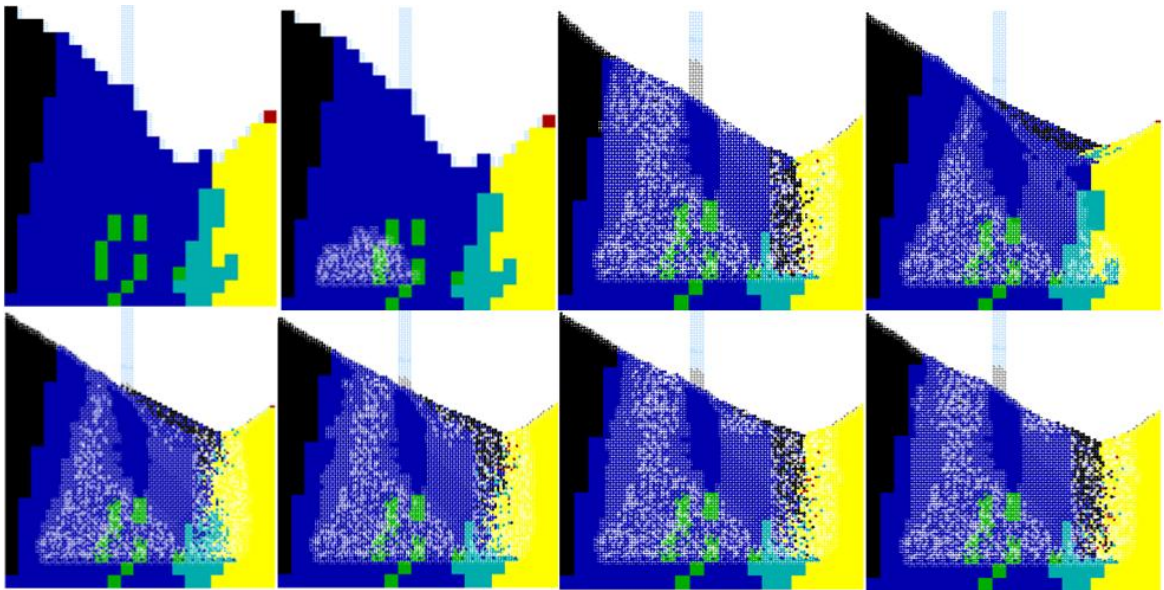


Figura 63. Perfil N 3850 avance extracción CA3D.

Tabla 24. Carta Gantt

TAREAS	Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero			
Semanas	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Investigacion																								
Revision manual FlowSimBC																								
Integración FlowSimBC																								
Estado del arte Block/Panel Caving																								
Estado del arte Geovia Gems PCBC																								
Revision manual PCBC																								
Simulaciones PCBC																								
Simulación con modelo académico.																								
Simulacion VMIX																								
Simulacion Laubscher																								
Simulacion Template Mixing																								
Simulacion CA3D																								
Simulacion Marker Mixing																								
Presentacion de resultados y conclusiones																								
Evaluacion de los resultados																								
Conclusiones, recomendaciones y anexos																								
Revision y corrección de errores																								

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO

Departamento	:	Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Carrera	:	Ingeniería Civil de Minas
Nombre del memorista	:	Pablo Muñoz Soto
Título de la memoria	:	
Fecha de la presentación oral	:	
Profesor(es) Guía	:	
Profesor(es) Revisor(es)	:	
Concepto	:	
Calificación	:	

Resumen (máximo 200 palabras)

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: IMPACTO DE LOS MÉTODOS DE MEZCLA EN LAS RESERVAS EXTRAÍBLES EN OPERACIONES DE PANEL CAVING		
Nombre Memorista: PABLO ANDRÉS MUÑOZ SOTO		
Modalidad	INVESTIGACIÓN	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof. René Gómez Puigpinos
Calificación	6.8	
Fecha	31-03-2026	
 Prof. Ramón Díaz N.		Ingeniero Supervisor: Raúl Castro Ruiz
		Institución: Laboratorio de Block Caving Universidad de Chile
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Roberto Fustos		
Resumen		
Los métodos de explotación subterránea han experimentado un aumento en la profundidad de sus operaciones, principalmente en métodos de Block y Panel Caving, los cuales se caracterizan por requerir una alta productividad. Esto ha presentado una serie de cambios en las características del macizo rocoso bajo condiciones geomecánicas complejas y con leyes cada vez más bajas en las reservas minerales. En este contexto, uno de los principales desafíos es la correcta estimación del flujo gravitacional del material dentro de las columnas de extracción, debido al impacto directo que tiene sobre la dilución, ley media y por consecuencia en la valorización económica del proyecto. El presente estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento de distintos algoritmos de mezcla utilizados en la simulación de flujo gravitacional en operaciones de caving para analizar su impacto en la estimación de reservas extraíbles y en los indicadores económicos de la planificación minera. Para ello, se analizó una operación subterránea real operada por el método de panel caving. La metodología de trabajo considera la factibilidad de integración del software Flowsim BC dentro del entorno de planificación minera Geovia Gems PCBC, la cual no fue factible, junto con el uso de herramientas como CA3D basado en autómatas celulares y la implementación del algoritmo Marker Mixing		

basado en trazadores. Esto con el fin de analizar los resultados y cuantificar el impacto en la ley media, dilución y la valorización económica del proyecto bajo distintos escenarios de mezcla.

Los resultados evidencian errores bajo el 5% en la estimación de la ley media, con diferencias en la forma en que cada algoritmo representa los mecanismos de flujo y mezcla, en este caso, Flowsim presentó un error del 2.58% logrando replicar correctamente el flujo preferencial al incorporar el efecto del cave back, aunque en periodos finales tiende a sobreestimar la ley al no simular de manera adecuada el rilling superficial. Por otra parte, CA3D mostró un error del 4.88% lo que evidencia limitaciones en periodos iniciales debido a la ausencia de una geometría definida para las columnas de extracción. Finalmente, Marker Mixing presentó un error del 4.01% caracterizado por una incorporación agresiva de material externo en el año 2023. Estas diferencias impactan en la dilución y el VAN proyectado, alcanzando diferencias de hasta 58 MMUS\$ entre los escenarios. Los resultados permiten concluir que la selección y calibración del algoritmo de mezcla tienen un impacto significativo en la estimación de las reservas y en la toma de decisiones en la evaluación de proyectos de panel caving.