

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Sr. René Gómez

Ingeniero Supervisor

Sr. Leonardo Dorador

**SIMULACIÓN DE ALTURAS DE INTERACCIÓN ENTRE
PUNTOS DE EXTRACCIÓN A TRAVÉS DE AUTOMATAS
CELULARES**



MATÍAS DAMIÁN PEREIRA MEDEL

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil de Minas

SEPTIEMBRE 2020

RESUMEN

El Block Caving es un método de explotación subterránea por hundimiento utilizado por muchos proyectos mineros alrededor del mundo, esto se debe a que posee una alta productividad y bajos costos de operación. Este método se basa en inducir el quiebre del macizo rocoso de manera natural, generando una socavación inicial en la base del cuerpo mineral por medio de perforación y tronadura. El material quebrado en la base del cuerpo mineral es retirado a través de un punto de extracción, produciendo un vacío que da lugar al descenso del mineral que se encuentra sobre él por acción del flujo gravitacional permitiendo su extracción.

La comprensión del flujo de material, durante la extracción de mineral, es una de las tareas más desafiantes para el diseño de una mina de Block Caving. Un pobre entendimiento del flujo gravitacional puede afectar el éxito económico de este tipo de operaciones, además, de traer problemas operacionales como colgaduras, dilución y estallidos de barro. Las problemáticas mencionadas anteriormente han motivado el estudio del flujo gravitacional mediante la realización de modelos físicos y numéricos. Entre los modelos numéricos se encuentran los modelos de autómatas celulares (AC), cuya aplicación en el modelamiento de flujo gravitacional se basa en el uso de reglas simples que permiten la simulación de un gran número de partículas.

En el presente trabajo, se realizó un estudio del flujo de mineral, haciendo uso de un código de autómatas celulares. Para ello se llevó a cabo un proceso de calibración y optimización donde se validó la capacidad del algoritmo para replicar la zona de movimiento. Posteriormente se simuló y calculó la altura de interacción entre dos puntos de extracción, con el fin de proponer una ecuación capaz de predecir la altura de interacción entre dos puntos de extracción, en función del espaciamiento y el parámetro N , este último vinculado a la probabilidad de descenso de un bloque y a la fragmentación de la roca.

Con base en la información obtenida, se pudo concluir que el algoritmo de AC empleado es capaz de simular el comportamiento de las zonas de movimiento, y por lo tanto, es una herramienta útil para estudiar el fenómeno del flujo gravitacional. Adicionalmente se llegó a la conclusión de que la ecuación propuesta realiza un buen ajuste de los valores de altura de interacción, en función del parámetro N y el espaciamiento, ya que posee un R^2 cercano a 1, lo que es de suma importancia, puesto que permite obtener una aproximación de la altura de interacción, sin necesidad de ejecutar el código de autómatas celulares.

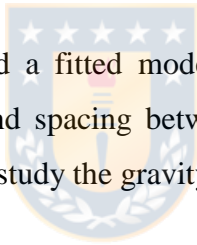
ABSTRACT

Block Caving is an underground mining method used by several mines around the world. This mining method is characterized by high productivity and low operational cost. In Block Caving, a large section of ore is initially undercut by drilling and blasting, creating a large unsupported roof that will start to collapse under its own weight and instability. The broken ore then breaks apart and falls into a drawpoint, where it is removed by the loading equipment.

The understanding of gravity flow is a challenging task for the block caving design. A poor knowledge or even control of the flow process can result in a range of scenarios which can affect the economic success and operation safety. This **predicament** raises the need to achieve a better understanding of the gravitational flow process.

The present report used a numerical model based on Cellular Automata (AC) to study the ore flow process. In order to study the gravity flow, it was necessary to calibrate the model and corroborate the AC ability to match isolated movement zone behavior (IMZ). Once the model was calibrated, it was used to simulate the extraction of two drawpoints in an attempt to estimate the height of the interaction zone.

Finally, this research proposed a fitted model which was able to predict the height of interaction based on the N value and spacing between drawpoints. Overall, the collected data concluded that AC is a useful tool to study the gravity flow process and match IMZ behavior.



Índice

1. Introducción	1
1.1. Objetivos:	2
1.1.1. Objetivos General.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos:.....	2
1.2. Alcances:	2
1.3. Metodología:	3
2. Antecedentes	4
2.1. Flujo Granular:	4
2.2. Difusión de vacíos:	5
2.3. Flujo en masa:	6
2.4. Tipos de tiraje:.....	6
2.5. Interacción entre las zonas movimiento y dilución:.....	7
2.5.1. Porcentaje de entrada de la dilución (PED):	8
2.6. Propiedades el material quebrado y flujo gravitacional	8
2.6.1. Fragmentación y tamaño de fragmento:.....	9
2.6.2. Presencia de humedad:	9
2.6.3. Densidad y empaquetamiento:	9
2.6.4. Esfuerzos:.....	10
2.6.5. Forma de los fragmentos:.....	11
2.6.6. Presencia de Finos:.....	11
2.7. Modelación de Flujo.....	12

2.7.1.	Modelo empírico de Laubscher:.....	12
2.7.2.	Modelamiento Físico:.....	13
2.7.3.	Modelamiento Numérico de Flujo	15
2.7.3.2.1.	Altura de interacción y PC-BC:	16
2.7.3.5.1.	Flowsim:.....	19
3.	Desarrollo Experimental.....	22
3.1.	Descripción del código de Autómatas celulares:	22
3.2.	Calibración del algoritmo de AC	25
3.3.	Casos de Estudio	26
3.3.1.	Caso de estudio 1: Modelo físico de Castro 2006[6].	26
3.3.2.	Caso de estudio 2: Modelo Físico Castro et al[7].	27
3.4.	Influencia del parámetro N en la altura de interacción.....	27
3.4.1.	Influencia del tipo de malla de extracción en la altura de interacción	28
4.	Resultados.....	30
4.1.	Resultados de la Calibración:.....	29
4.1.1.	Influencia del tamaño de celda y d_{50} en la geometría del elipsoide de movimiento:	30
4.2.	Calibración con los Casos de Estudio	31
4.3.	Altura de interacción:	36
5.	Análisis de Resultados.....	41
6.	Conclusiones.....	43
7.	Referencias.....	44

Índice de Ilustraciones:

Ilustración 1 Elipsoide límite y de extracción [10]	4
Ilustración 2 Difusión de vacíos, a la izquierda extracción de material de un punto de extracción aislado y a la derecha la extracción de distintos PE de forma simultánea[12].....	5
Ilustración 3 Mecanismo de flujo granular, a la izquierda un punto de extracción aislado y a la derecha la interacción entre múltiples PE[12]	6
Ilustración 4 Representación del comportamiento de flujo de material	7
Ilustración 5 Modelos de dilución según el modelo de Susaeta[15]	8
Ilustración 6 Forma de la Zona de extracción con forma a) EZ elipsoidal, b) EZ elipsoidal truncada y c) EZ drop shape [31].....	11
Ilustración 7 Ancho de elipsoide Laubscher[8].....	12
Ilustración 8 Altura de interacción.....	13
Ilustración 9 Ejemplo de Modelo Físico de grava[36]	14
Ilustración 10 Modelo de mezcla PC-BC[45].....	16
Ilustración 11 Discretización en REBOP[46].....	17
Ilustración 12 Modelo cinemático[47].....	18
Ilustración 13 Esquema del modelo estocástico 2D[51]	19
Ilustración 14 Funcionamiento de Flowsim[47]	20
Ilustración 15 Esquema del código de Autómatas Celulares	23
Ilustración 16 Ascenso de vacíos.....	24
Ilustración 17 Diagrama de flujo FlowmarkIII	24
Ilustración 18 Modelo Físico Castro[6]	26
Ilustración 19 Modelo Físico Castro et al[7]	27
Ilustración 20 Calibración con la ecuación de Nedderman[48]	29
Ilustración 21 Influencia del tamaño de celda en el ajuste para un N y MV iguales a 2.....	30

Ilustración 22 Influencia del d_{50} en el ajuste	31
Ilustración 23 Simulación del experimento IS-T1, IZQ: Vista en planta del IMZ DER: Vista en perfil del IMZ. La barra de color indica la masa extraída [kg].....	32
Ilustración 24 Resultados de simulación, IZQ: ancho de IMZ [mm] vs masa[kg], DER: ancho IMZ[mm] vs altura IMZ[mm]	33
Ilustración 25 Simulación IS-T1, A: Altura IMZ vs masa extraída[t], B: Ancho/d50 vs Altura/d50	34
Ilustración 26 Simulación IS-T4 Escala Mina, A: Altura IMZ vs masa extraída[t], B: Ancho/d50 vs Altura/d50	35
Ilustración 27 Simulación Modelo Físico Castro et al[7], A: Altura IMZ vs masa extraída[t], B:Ancho/d50 vs Altura/d50	35
Ilustración 28 Simulación PE1 y PE2	36
Ilustración 29 Altura de interacción en función del parámetro N	37
Ilustración 30 Altura de interacción en función del espaciamiento	37
Ilustración 31 Zona de movimiento Malla Cuadrada	38
Ilustración 32 Zona de movimiento Malla Teniente	38
Ilustración 33 Zona de movimiento Malla Henderson	39
Ilustración 34 Altura de interacción vs Espaciamiento	41
Ilustración 35 Tiempo de ejecución vs N° de extracciones	57
Ilustración 36 Tiempo de ejecución modificando el mv(N° de vacíos)	58
Ilustración 37 Tiempo de ejecución en función del tamaño del modelo de bloques	58
Ilustración 38 Elipsoide de extracción	59
Ilustración 39 Mezcla de material, cada color representa una material con distinta ley, mientras que los cubos negros representan los vacíos.	60
Ilustración 40 Distribución de vacíos, el color rojo indica la cantidad de vacíos presentes en esa cota, mientras más rojo menor el n° de vacíos	61

Ilustración 41 Interfaz gráfica preliminar	72
Ilustración 42 Interfaz gráfica resultados	72
Índice de tablas:	
Tabla 1 Valores de N considerados en la calibración con la ecuación de Nedderman	25
Tabla 2 Valores de mv utilizados en la calibración con la ecuación de Nedderman.....	25
Tabla 3 Datos del Caso de estudio 1	26
Tabla 4 Datos del Caso de estudio 2	27
Tabla 5 Espaciamientos considerados en las mediciones de altura de interacción	28
Tabla 6 Valores de N considerados en las mediciones de altura de interacción.....	28
Tabla 7 Mallas	28
Tabla 8 Parámetro N y MV con menor error cuadrático medio	30
Tabla 9 Altura de interacción promedio entre puntos de extracción.....	39
Tabla 10 Modelo ajustado	41
Tabla 11 Modelo de bloques "M1".....	55
Tabla 12 Calibración con ecuación de Nedderman.....	62
Tabla 13 Calibración para diferentes tamaños de celda parte I.....	63
Tabla 14 Calibración para diferentes tamaños de celda parte II	65
Tabla 15 Altura de interacción medida para distintos N y espaciamientos	67
Índice de Anexos	
Anexo I:FlowmarkIII_Código Python.....	49
Anexos II Código schvoid.py.....	55
Anexos III Código mv3.py.....	56
Anexo IV: Ubicación de un bloque dentro del modelo de bloques	57
Anexos V Tiempos de Simulación	59
Anexo VI Resultados Adicionales	60
Anexo VII: Datos de Calibración con la ecuación de Nedderman	64
Anexo VIII: Influencia de d50 y el tamaño de celda en la calibración.....	65
Anexo IX Altura de interacción.....	69
Anexo X: Interfaz gráfica	71

Nomenclatura y Abreviaciones:

MQ: Material quebrado

PE: Punto de extracción

MZ: Zona de movimiento

EZ: Zona de extracción

IMZ: Zona de movimiento aislado

IEZ: Zona de extracción aislada

HIZ: Altura de interacción

PED: Porcentaje de entrada de la dilución

PEDZA: Porcentaje de entrada de la dilución tiraje aislado

PEDZI: Porcentaje de entrada de la dilución tiraje interactivo

REBOP: Rapid emulator based on PFC3D

DEM: Metodología de elementos discretos

PFC: Particle Flow Code

AC: Autómatas Celulares

D₅₀: Tamaño medio de una distribución granulométrica

Cu: Coeficiente de uniformidad



1. Introducción

La industria minera se encuentra enfrentando múltiples desafíos, entre los que destacan la explotación de recursos finitos, disminución de las leyes, grandes inversiones, variabilidad del precio del producto y la productividad decreciente en el tiempo[1]. En dicho contexto el Block Caving ha cobrado vital importancia, ya que debido a su bajo costo operacional y alta productividad[2] permite hacer rentable la extracción de yacimientos masivos y de baja ley. Por lo anteriormente expuesto, este método se perfila como el sucesor natural, para los yacimientos a cielo abierto de gran profundidad y altas razones estéril-mineral[2].

El Block Caving es un método explotación subterránea por hundimiento, el cual se basa en inducir el quiebre del macizo rocoso de manera natural, generando una socavación inicial en la base del cuerpo mineral por medio de perforación y tronadura. El material quebrado (MQ) es extraído desde un punto de extracción, generando un vacío en la zona inferior de la columna de mineral que da lugar al flujo del material, permitiendo la extracción del mismo[3].

El flujo de material quebrado induce una incertidumbre característica del método de hundimiento[2] y su comprensión es una de las tareas más desafiantes para el diseño y optimización de la mina[4]. El flujo influye directamente en la recuperación de mineral y un pobre entendimiento del mismo puede desembocar en el fracaso económico, colgaduras, ingreso de barro, dilución y problemas de estabilidad[5].

Se han realizado distintos acercamientos para comprender el flujo gravitacional, entre los cuales se encuentran modelos físicos[6, 7], reglas empíricas[8] y modelos numéricos[5, 9]. Los modelos numéricos suelen ser más atractivos para realizar planificación minera, ya que permiten llevar a cabo simulaciones a escala real en poco tiempo[5]. Los modelos numéricos pueden categorizarse en dos grupos[4], los primeros que intentan representar la física detrás del flujo y los segundos, que intentan emular las características del flujo, sin modelar la física del problema para obtener una mayor velocidad de cómputo.

En el presente informe se realizará una calibración de un código de autómatas celulares en lenguaje Python con el fin de emplear el mismo para estudiar distintas propiedades del material quebrado y su comportamiento durante el flujo gravitacional.

1.1. Objetivos:

1.1.1. Objetivos General

Estudiar el impacto en la altura de interacción el espaciamiento entre puntos de extracción en 3D, bajo diferentes configuraciones de mallas de extracción, a través de un simulador de un autómata celular.

1.1.2. Objetivos Específicos:

1. Realizar una recopilación bibliográfica sobre el flujo gravitacional en minería
2. Calibrar el código de autómatas celulares con la ecuación cinética de Nedderman
3. Realizar un análisis de sensibilidad del tamaño de celda
4. Determinar Rangos de tamaño de celda en función de un tamaño característico
5. Calibrar el código de autómatas celulares mediante modelos físicos
6. Calcular la altura de interacción bajo distintas condiciones
7. Determinar la altura de interacción entre 2 puntos de extracción en función de parámetro N de la función de transición.
8. Determinar la altura de interacción para mallas de extracción cuadradas, tipo El Teniente y Henderson.

1.2. Alcances:

- En este trabajo se utiliza un código de autómatas celulares en lenguaje Python en desarrollo.
- Se considera el material ya quebrado (granular)
- No se evaluara mezcla de materiales

1.3. Metodología:

La metodología del trabajo se divide en tres etapas: recopilación bibliográfica, calibración del código en lenguaje Python y por último el cálculo de la altura de interacción. La recopilación bibliográfica consiste en un resumen de los principales aspectos teóricos detrás del flujo gravitacional, registrando los distintos esfuerzos que se han realizado para modelarlo. Por otro lado, el proceso de calibración está orientado a comprobar que la herramienta empleada pueda reproducir el comportamiento descrito por la teoría y los casos de estudio considerados. Finalmente, la combinación de las etapas anteriormente descritas permitirá, dado un valor de N , establecer una relación entre el espaciamiento y la altura de interacción.



2. Antecedentes y estado del arte

Este capítulo detalla los antecedentes necesarios para sentar las bases teóricas en las cuales se basa el trabajo subsecuente. Además de establecer un estado del arte de los distintos acercamientos que ha tenido el modelamiento flujo gravitacional en minería, principalmente enfocado al modelamiento numérico por medio de autómatas celulares.

2.1. Flujo Granular:

Kvapil[10], realizó un modelo experimental de dos dimensiones, en el cual identifico dos tipos de comportamientos producto de la extracción de material granular a través de un punto de extracción (PE). El primero es denominado elipsoide límite o *movement zone*(MZ) y se caracteriza por ser una zona delimitada por el contorno que define el material que ha sido perturbado desde su posición original pero que no ha sido necesariamente extraído, y aquel que permanece sin cambio alguno desde su posición original. El segundo se denominado elipsoide de extracción o *extraction zone*(EZ), la cual es una zona compuesta por todos aquellos fragmentos que han sido extraídos a través del punto de extracción(ver ilustración 1).

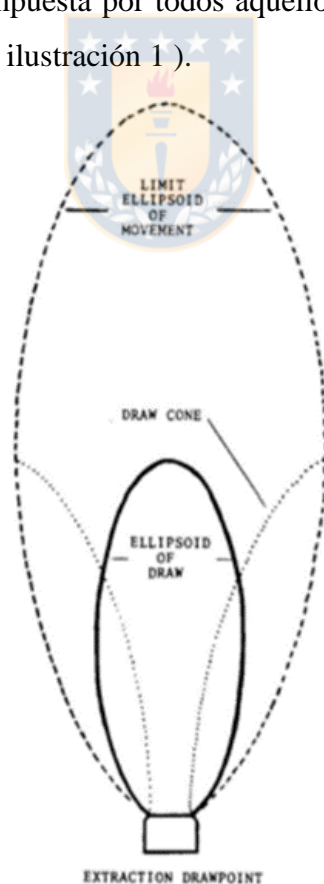


Ilustración 1 Elipsoide límite y de extracción [10]

2.2. Difusión de vacíos:

Si el material quebrado se compone de fragmentos grandes y angulosos, no se desarrollará un elipsoide de movimiento clásico. En su lugar, existirá un patrón de flujo irregular en forma de “dedos” [11]. Los vacíos presentes en la columna de mineral son parcialmente llenados por el material de su alrededor o colapsan permitiendo el descenso del material que se encuentra sobre ellos. Mientras que algunos vacíos se unen, es esperable que se vuelvan pequeños y más estables. En cierta altura la influencia de múltiples puntos de extracción desestabiliza los vacíos permitiendo el flujo vertical convirtiéndose en un flujo en masa, como se puede observar a la derecha en la ilustración 2.

Por otro lado cuando se extrae material desde un único punto de extracción se formara una zona menos densa producto del camino formado por la propagación de vacíos. En el caso de presentarse una sucesión de cavidades en la columna de mineral, se producirá un efecto de cañería permitiendo que fluya material desde la superficie. El camino producido por los vacíos puede ser llenado por material fino, convirtiéndose en un canal de flujo preferencial, adelantando la dilución de mineral (ver ilustración 2, figura izquierda).

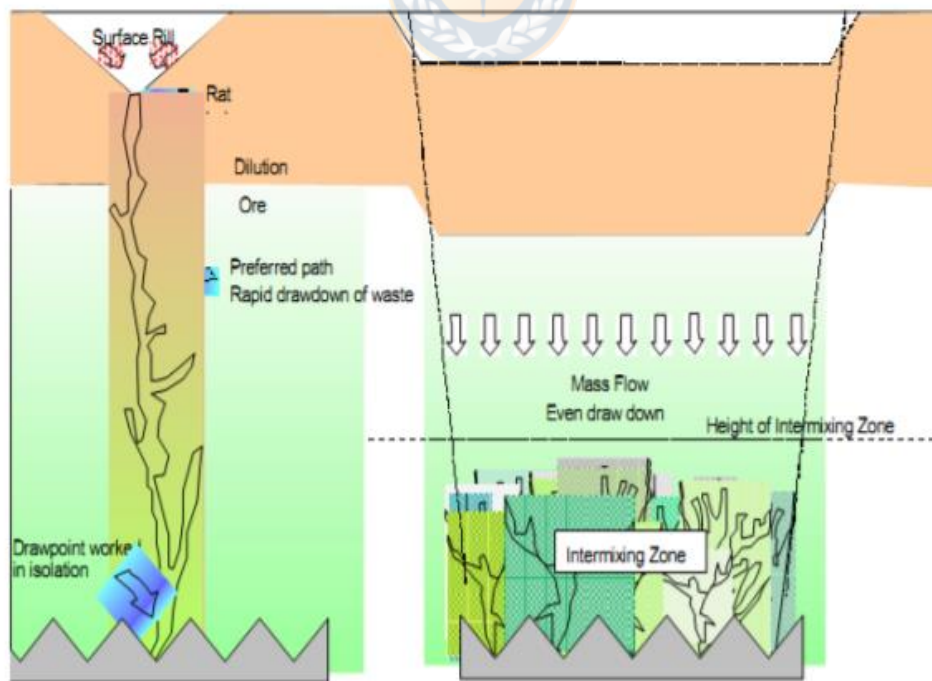


Ilustración 2 Difusión de vacíos, a la izquierda extracción de material de un punto de extracción aislado y a la derecha la extracción de distintos PE de forma simultánea[12]

2.3. Flujo en masa:

El flujo en masa es un flujo uniforme de material hacia abajo sin mezcla ni vertical ni horizontal. Laubscher [12] señala que existe una zona de flujo de masa y subsidencia uniforme sobre la columna de extracción. Mientras que más abajo en la columna de extracción, existe una interacción de esfuerzos que induce la migración lateral entre PE. La altura bajo la cual ocurre la interacción es denominada Height of Interaction Zone (HIZ) y se encuentra caracterizada por flujo granular (ver ilustración 3).

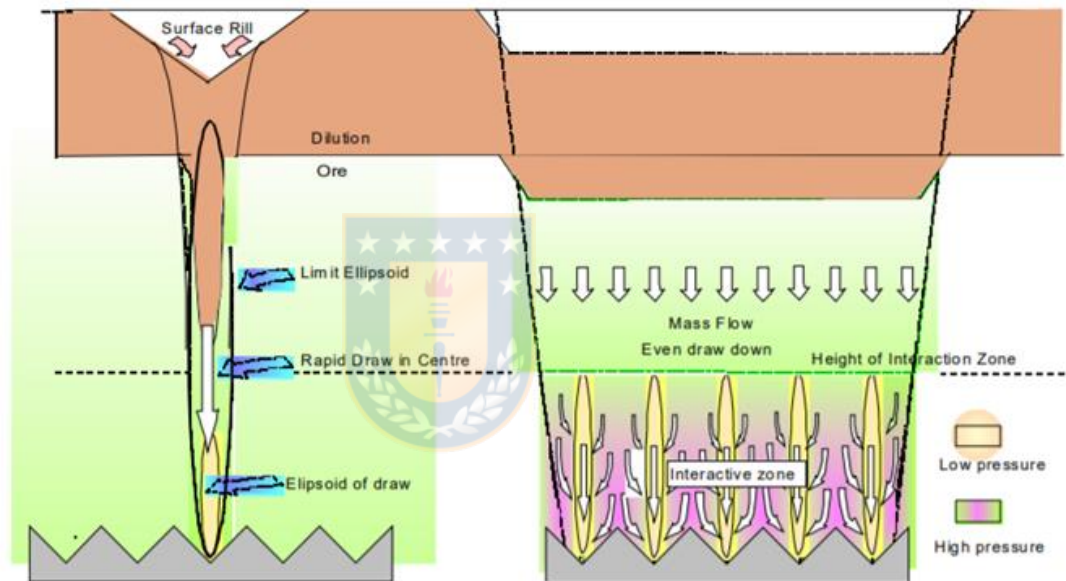


Ilustración 3 Mecanismo de flujo granular, a la izquierda un punto de extracción aislado y a la derecha la interacción entre múltiples PE [12]

2.4. Tipos de tiraje:

Laubscher [12] identificó dos tipos de comportamientos, al primero lo denominó tiraje aislado, en el cual la interacción de vacíos formará una chimenea que permitirá la migración del material fino superior (que podría ser material diluyente) hacia el seno del mineral, adelantando la entrada de dilución en el punto de extracción. En segundo lugar, identificó el tiraje interactivo, en el cual la coexistencia de muchos vacíos desestabilizará la propagación de un pasadizo único, lo cual limitará el flujo de material más fino proveniente de un área superior y generará flujo en masa, retrasando así la entrada del material diluyente (ver ilustración 3).

Posteriormente Susaeta[14], desarrollaría el concepto de tiraje aislado-interactivo. La diferencia entre tiraje interactivo y el tiraje aislado-interactivo, es que en el primero el material en la parte superior del hundimiento desciende uniformemente, mientras que en el segundo existe una diferencia en la tasa de flujo en el punto de extracción y en el pilar produciéndose pequeños cráteres en la superficie del hundimiento (Ver ilustración 4).

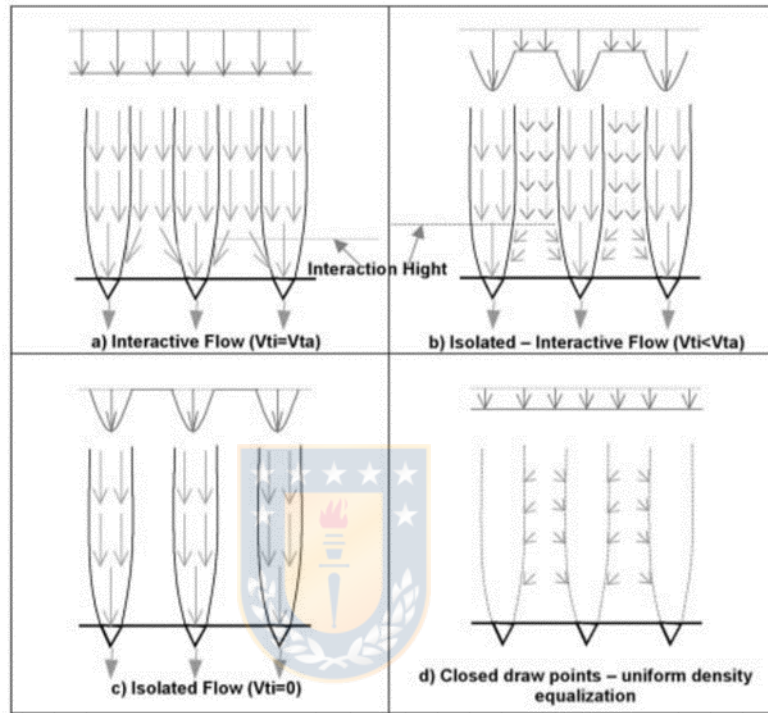


Ilustración 4 Representación del comportamiento de flujo de material

2.5. Interacción entre las zonas movimiento y dilución:

El mineral se puede extraer con la menor cantidad de estéril, en otras palabras con una menor dilución, si se presenta una buena interacción entre puntos de extracción y flujo paralelo [12]. Por el contrario, si se presenta una pobre interacción entre puntos de extracción se producirá una alta dilución[12], un incremento en los esfuerzos inducidos en la zona estancada[6] [8]y bajas tazas de recuperación[13].

También es relevante considerar que cuando el tonelaje extraído de un punto de extracción es considerablemente menor que el de sus vecinos, los puntos vecinos comenzarán a extraer parte del tonelaje de la columna que se extrae más lento, adelantando la entrada de la dilución en dicho punto de extracción [14].

2.5.1. Porcentaje de entrada de la dilución (PED):

Laubscher[12] definió el PED como el porcentaje de columna de mineral que ha sido extraído cuando se extrae por primera vez material diluyente desde un punto de extracción. El porcentaje de entrada de la dilución depende de la cantidad de mezcla que ocurre en la columna de extracción, la cual se puede describir como una función de:

- La altura de columna de extracción
- El rango de fragmentación
- El espaciamiento de la zona de extracción
- El rango de tonelaje que se extrae desde los puntos de extracción
- El rango de tonelaje y espaciamiento máximo de la zona de extracción en el cual se produce la altura de la zona de interacción.

En función de los tipos de tiraje presentados en la ilustración 4, Susaeta[15] estudió el comportamiento del PED identificando que el porcentaje de entrada de dilución en tiraje aislado (PEDZA) es considerablemente menor al resto de tirajes, por el contrario el tiraje interactivo (PEDZI) presenta el mayor punto de entrada de la dilución por ende es el comportamiento óptimo, ya que se alcanza a extraer una gran parte de la columna de mineral (%E) antes de extraer estéril (ver ilustración 5).

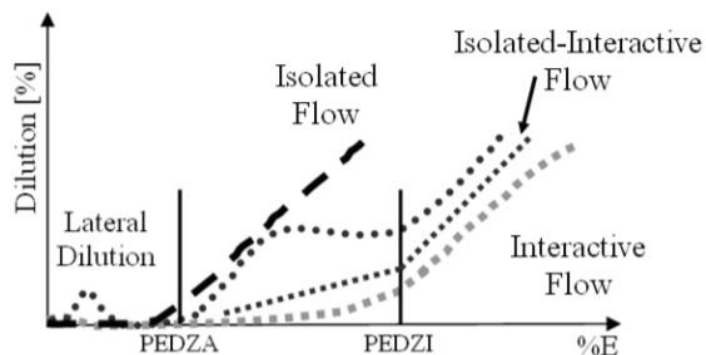


Ilustración 5 Modelos de dilución según el modelo de Susaeta[15]

2.6. Propiedades el material quebrado y flujo gravitacional

Existen diversas propiedades de los sólidos granulares que son relevantes ya sea para el estudio del flujo o acopio de los mismos. Wood [16], describe las principales características que intervienen en el flujo de material, categorizándolas en propiedades de partículas discretas, en grupo u otras influencias. Posteriormente, Rustan [17] identificaría, como los parámetros más importantes para el

flujo de material, entre los cuales se encuentra la distribución de tamaño, la forma (esfericidad), el coeficiente de fricción, la atrición, la densidad, la resistencia al corte, la cohesión y el contenido de humedad.

2.6.1. Fragmentación y tamaño de fragmento:

A medida que el material quebrado descendiente a través de la columna de mineral hasta llegar a un punto de extracción se produce un cambio en la granulometría del mismo, las partículas gruesas sufren una continua reducción de tamaño debido al alto nivel de presión a las cuales son sometidas[18]. La evolución de la granulometría del material quebrado ha sido reconocida como un factor clave dentro del estudio del flujo gravitacional, fragmentación secundaria y migración de finos [18, 19] , ya que suele ligada a problemas operacionales como colgaduras producto de la presencia de fragmentos gruesos o material fino con alta cohesión[17].

Por otro lado según Castro [21], el tamaño de partícula no posee una influencia significativa en los anchos de las zonas de extracción y movimiento en tiraje aislado, señalando que la forma de la zona de movimiento aislado(IMZ) depende principalmente de la altura de columna y la cantidad de masa extraída.

2.6.2. Presencia de humedad:

Existe escasa literatura que estudie el flujo de material fragmentado fino y el contenido de humedad [20]. Se tiene noción de que la presencia de agua afecta significativamente el trabajo de ruptura y la resistencia de las partículas finas [18]. Estudios recientes [19, 21, 22] concluyen a partir de resultados obtenidos mediante distintos modelos físicos que la presencia de humedad y finos producen una disminución de la capacidad de fluir del material, generando mayor cantidad de colgaduras cohesivas. Sánchez[20] enuncia que existe una correlación entre el contenido de humedad y la geometría de la zona de flujo, ya que observaron que la tasa de crecimiento del diámetro del cuerpo de extracción variaba en función del contenido de humedad, donde las muestras húmedas tendían a estabilizar su crecimiento y las secas aumentaban en función de la masa extraída.

2.6.3. Densidad y empaquetamiento:

La Densidad del Material quebrado es un parámetro crítico en la planificación de proyectos de minería de hundimiento, ya que influye en la estimación de esfuerzos en los niveles de extracción, en la estimación de cantidades de material quebrado y en la fragmentación

secundaria en columnas de extracción[24]. Adicionalmente el hundimiento se ve inhibido cuando el espacio vacío creado por un punto de extracción es ocupado por material quebrado. Es por ello que es necesario tener conocimiento del esponjamiento de la roca dentro de la columna de extracción, para predecir factores como la altura de *caving* para una determinada cantidad de material [25].

El factor de esponjamiento entre roca recientemente desprendida del *cave-back* y la roca que se ha movilizado tiene diversas implicaciones en la propagación del hundimiento y la recuperación. Una zona de alta porosidad aparece en el área sobre la batea cuando se extrae material, luego la zona de alta porosidad se separa en dos regiones principales, manteniéndose alta en la banda de corte y baja en la zona de compresión [3].

La porosidad dentro del ambiente de hundimiento es difícil de predecir pero puede tener implicaciones muy significativas en el comportamiento del flujo de material [5], por lo que ha sido utilizada como factor clave en modelos de emulador de flujo como REBOP [26].

El material quebrado puede experimentar diferentes estados de empaquetamientos iniciales, dependiendo del espesor de vacío de aire entre el techo de roca y la superficie superior de la columna de extracción. Dorador[24] realiza una descripción conceptual sobre el empaquetamiento esperado para una distribución uniforme y un diámetro de bloque “D”, en la cual se señala que para distancias de caída entre D y 2D se espera un empaquetamiento suelto y denso, mientras que para distancias menores a D se espera un empaquetamiento ordenado y distancias mayores a 2D uno desordenado.

En relación a lo anteriormente descrito, mediante un modelo realizado con la metodología de elementos discretos (DEM)[5], se logró una mejora del entendimiento de las dinámicas de flujo de empaquetamientos mono-dispersos y demostrar que siguen una forma similar al flujo elipsoide sentando las bases para un estudio de empaquetamientos más complejos.

2.6.4. Esfuerzos:

Los esfuerzos verticales en el material quebrado se suelen concentrar alrededor de los puntos de extracción alcanzando valores tan altos como dos veces la carga litostática inicial[7, 17]. De los modelos físicos realizados [20, 26] se ha establecido que un aumento de la carga vertical, disminuye la capacidad de fluir del material, generando un mayor índice de colgaduras.

Los experimentos descritos por [27] muestran una clara influencia de la carga vertical en las propiedades del material quebrado. Entre mayor es la carga vertical, mayor es el grado de compactación, a su vez existe una mayor reducción de los tamaños de los fragmentos.

2.6.5. Forma de los fragmentos:

La forma de los fragmentos es una de las propiedades más importante a considerar en modelos físicos y numéricos [28]. La forma y superficie determina la movilidad del material [17]. Distintas simulaciones se han realizado en PFC [28, 29], para identificar la influencia de la partícula en el comportamiento la zona de movimiento aislado, además de cuantificar la caracterización del factor de forma de una partícula en PFC [29]. Por otro lado, Sun et al [30] simuló el comportamiento de la zonas de extracción con partículas de forma de maní, dando como resultado la validación de la Upside-Down Drop Shape Theory, la cual propone una zona de extracción sin simetría longitudinal, más similar a gota o *drop shape* que a una elipsoide, como se puede apreciar en la ilustración 6.

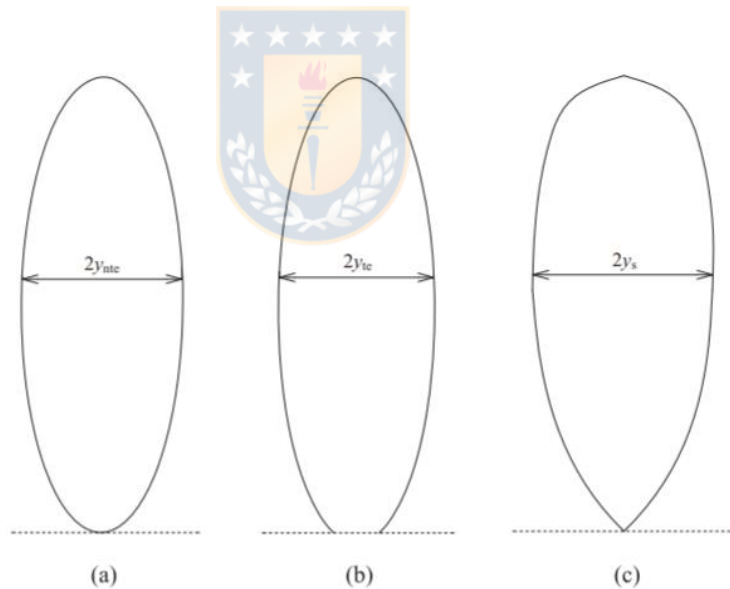


Ilustración 6 Forma de la Zona de extracción con forma a) EZ elipsoidal, b) EZ elipsoidal truncada y c) EZ drop shape [31]

2.6.6. Presencia de Finos:

El material fino tiene una alta probabilidad para fluir y migrar a diferentes zonas del hundimiento durante el flujo gravitacional [32]. Adicionalmente los fragmentos finos pueden migrar

más rápido que los fragmentos gruesos, producto de la percolación [33], generando un gran impacto en la recuperación y dilución [26].

La presencia de finos puede acarrear distintos problemas a una operación. Según Olivares[22] una alta presencia de los mismos está estrechamente ligados al fenómeno de las colgadas. Sumado a esto los resultados del experimento realizado por Armijo e Ibarra [32] apuntan a que el tiraje aislado en presencia de finos precipitaría la entrada de dilución mientras que un tiraje uniforme la retrasaría.

2.7. Modelación de Flujo

2.7.1. Modelo empírico de Laubscher:

Laubscher[8] plantea un modelo empírico que permite conocer el ancho de la zona de movimiento y la altura de interacción en función del espaciamiento. Para la determinación del ancho del elipsoide de movimiento, se requiere conocer distintas propiedades del material, entre las cuales se encuentra la clase del macizo rocoso, las fracturas por metro y el rango de tamaños. Teniendo conocimiento de dicha información y del ancho del punto de extracción se puede escoger un diámetro de elipsoide presentado en la ilustración 7

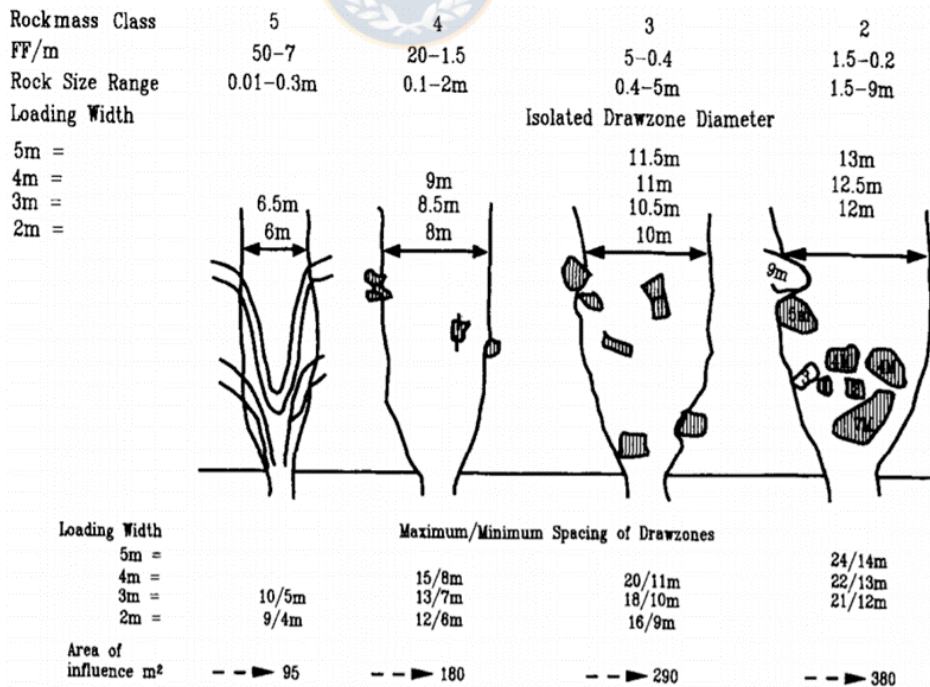


Ilustración 7 Ancho de elipsoide Laubscher[8]

Para determinar la altura de interacción HIZ, se utiliza el gráfico presentado en la ilustración 8 que considera como parámetro de entrada el índice de calidad de macizo rocoso, a través de los parámetros RMR, junto con el espaciamiento entre las galerías de extracción.

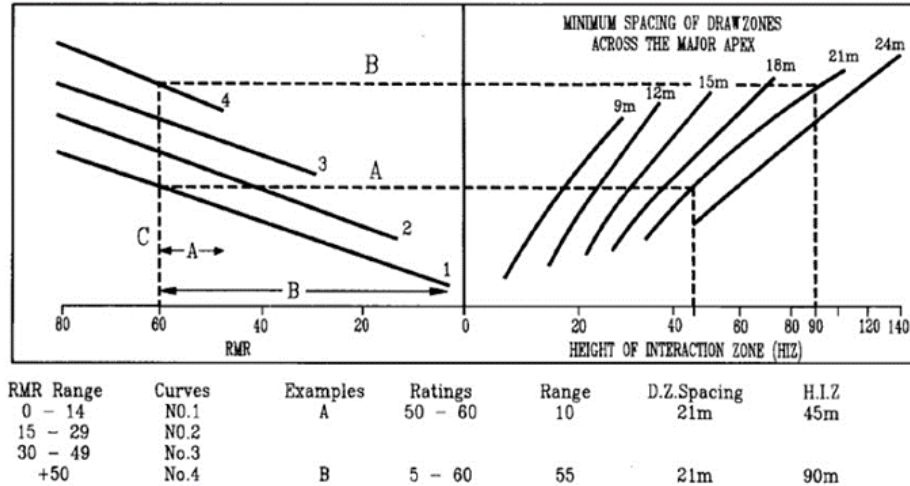


Ilustración 8 Altura de interacción

2.7.2. Modelamiento Físico:

Los modelos físicos permiten representar a pequeña escala distintos fenómenos y estudiar los principios físicos que los rigen. Según Langhaar[34] dichos modelos pueden representar distintas similitudes con el fenómeno a estudiar, entre ellas se encuentran: la similitud geométrica, cinemática y dinámica, las cuales buscan reproducir la geometría, velocidades y fuerzas escaladas en relación al modelo.

Una de las desventajas de esta técnica según Pöschel et al[35], es la imposibilidad de reproducir las propiedades dinámicas totales, vale decir respetando todas las similitudes con el fenómeno a estudiar para un material conocido, ya que para emular dicha dinámica del fenómeno se tendrían que escalar las propiedades que son consecuencia de la dinámica molecular de los sistemas granulares. A pesar de sus limitantes el modelamiento físico ha demostrado ser una herramienta efectiva para la adquisición de conocimientos sobre flujo gravitacional[36].

Los primeros aportes del modelamiento físico se encuentran en los modelos de arena 2D, los cuales le permitieron caracterizar el flujo de material en dos regiones, la primera denominada elipsoide de extracción, definida como la región de material que se extrae del modelo y la segunda llamada elipsoide de movimiento, definida como el límite del movimiento inducido por la extracción

[10]. Adicionalmente Kvapil[37] estableció dos relaciones entre dichos elipsoides, la primera fue que el volumen del elipsoide de movimiento es igual a 15 veces el de extracción, la segunda es que la altura del elipsoide de movimiento es igual a 2.5 veces la altura del de extracción.

Por otro lado, Laubscher y Heslop [38] llevaron a cabo distintos experimentos haciendo uso de un modelo físico de arena en tres dimensiones. En dichas experiencias identificaron que ciertos espaciamientos entre puntos de extracción producían un solapamiento de los elipsoides de movimiento, generando una zona de tiraje múltiple. Los resultados obtenidos de su investigación apuntaban a que la zona de tiraje múltiple existiría, si los PE se encontraban espaciados en 1.5 veces el diámetro del elipsoide de movimiento.

Posteriormente Power [39] optó por realizar un modelo físico de grava, con el cual logró identificar la incidencia de la granulometría en la geometría del elipsoide de extracción(IEZ) y movimiento. Otros resultados significativos obtenidos a través de modelos de grava, son la observación de zonas de movimiento y extracción con formas no elipsoidales y la relación que existe entre el ancho de las IEZ y IMZ con la altura y masa extraída [6].

Hasta la fecha se han utilizado diversos materiales para el estudio en modelos físicos, algunos de los más usados son arena, grava, carbón, hormigón, mineral, yeso y arcilla[6, 35, 37–41]. Su uso ha permitido identificar distintos comportamientos asociados al flujo gravitacional, además de proveer datos para realizar procesos de calibración y probar la validez de distintos modelos numéricos[4, 9, 25, 28].

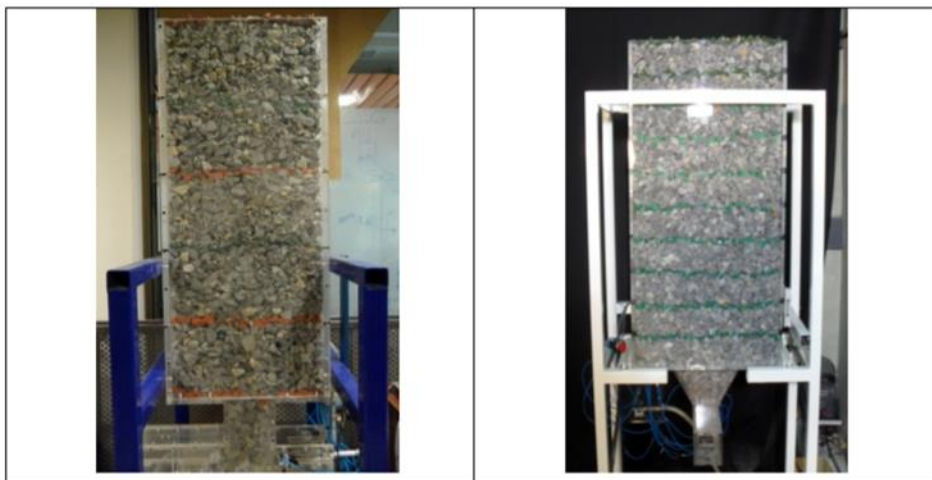


Ilustración 9 Ejemplo de Modelo Físico de grava[36]

La ilustración 9 presenta un ejemplo de un modelo físico de grava empleado para simular la extracción de material desde un punto de extracción.

2.7.3. Modelamiento Numérico de Flujo

Los modelos numéricos son modelos matemáticos o algoritmos, que una vez calibrados, permiten estudiar parámetros complejos de medir físicamente (ej. Distribución de esfuerzos dentro del material particulado), tener una alta frecuencia de toma de datos y replicar diferentes escalas [5]. Dentro de los modelos numéricos utilizados para el estudio de flujo gravitacional en minería, se distinguen dos grupos [4], los primeros que intentan representar la física detrás del flujo (Elementos discretos) y los segundos que intentan emular las características del flujo a una gran velocidad con el fin de ser empleados en estudios durante la vida de la mina (ej. PCBC, REBOP y Autómatas Celulares).

Los emuladores suelen ser herramientas predictivas de rápida ejecución y útiles para el diseño y planificación de la mina. Los modelos basados en la física en cambio, son capaces de explorar la física detrás del flujo de roca e identificar nuevos régimen de flujo y los factores que afectan dichos escenarios [5].

2.7.3.1. Modelamiento con elementos discretos:

El modelamiento con elementos discretos es un método numérico capaz de describir el mecanismo de ensambles, usualmente, de discos y esferas. Este método se encuentra basado en un escenario explícito donde la interacción entre partículas es monitoreada contacto por contacto y el movimiento de cada partícula es modelado mediante las leyes de Newton [42].

El modelamiento por medio de elementos discretos ofrece una manera única de visualizar modelos partícula por partícula permitiendo un mayor entendimiento del sistema. Los software PFC2D Y PFC3D desarrollados por Itasca, ofrecen un marco de referencia para realizar diversos DEM, los cuales han permitido formular una explicación al flujo basado en el cambio de porosidad[4]. Su desventaja es que solo pueden ser aplicados a un número pequeño de partículas discretas, debido a la complejidad del proceso, por lo que son modelos inapropiados para simular procesos a gran escala.

2.7.3.2. PC-BC:

PCBC es una herramienta utilizada para planificación y agendamiento de minas de Block Caving el cual permite simular el comportamiento de las columnas y puntos de extracción, permitiendo establecer las reservas extraíbles para distintos escenarios y a su vez producir distintos

planes de producción para un tonelaje, ley y factores económicos dados[43]. Para ello, se debe establecer un ambiente de trabajo, donde se importaran los distintos datos de entrada. El primer input requerido es el modelo de bloques, el cual debe contener información sobre leyes, densidad, tipo de material, porcentaje de finos, fracturas por metro, etc. En segundo lugar es necesario establecer parámetros económicos como lo son el precio del metal, los costos de mina y procesamiento. Con los cuales se puede conocer el ingreso por tonelada y beneficio asociado a cada bloque. Posteriormente es necesario definir los parámetros relacionados al diseño de la malla de extracción y dimensiones del cono de extracción.

Una vez definido el ambiente de trabajo, se debe realizar la construcción de un archivo de Slice. Mediante la definición de los conos de extracción realizada por el usuario, se simula una columna de roca sobre cada punto de extracción y se guarda en un archivo Slice. Posteriormente la columna se fracciona en slices que coinciden con el espaciamiento vertical del modelo de bloques. Cada Slice posee información de las diferentes propiedades geomecánicas y del yacimiento, tales como el tipo de roca, densidad, mezcla, dilución, etc [44].

2.7.3.2.1. Altura de interacción y PC-BC:

La altura de la zona de interacción es un indicador del movimiento aleatorio de las partículas sobre el nivel de producción. Depende del espaciamiento entre puntos de extracción, la fragmentación y la variabilidad de la fragmentación dentro de un bloque. HIZ es un indicador de la cantidad de mezcla dentro de una columna de extracción e influencia directamente PED [45].

La altura de la zona de interacción es un parámetro de entrada relevante, ya que influye en la dilución, PCBC requiere conocer la altura y el ciclo de mezcla (ver ilustración 10).

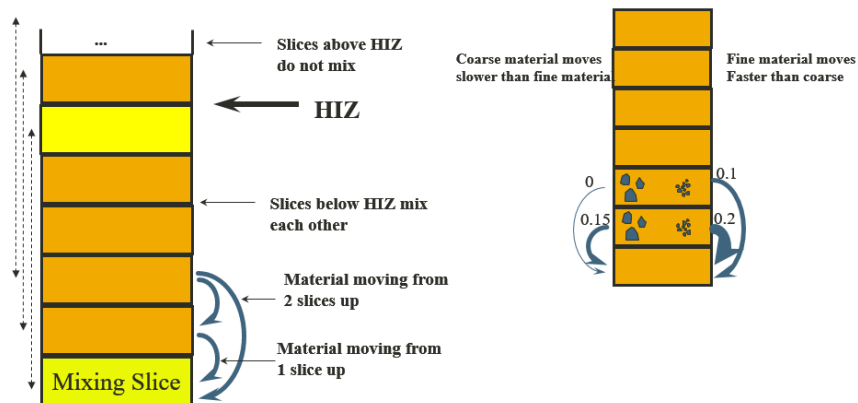


Ilustración 10 Modelo de mezcla PC-BC[45]

2.7.3.3. REBOP:

Es una herramienta de flujo gravitacional, desarrollada por Itasca, la cual se basa sobre una serie de fundamentos de flujo gravitacional observados en PFC3D y en modelos físicos como el de Castro[6]. El modelo considera que la zona de movimiento aislado está compuesta por un número discreto de discos, donde su crecimiento está asociado a dos mecanismos principales: la expansión propia de cada capa denominada erosión y/o a la adición de masa de una superior a una inferior referida como colapso.

El flujo de material es simulado mediante la extracción de pequeñas cantidades de masa desde la primera capa inferior hacia las superiores, creciendo cada capa cuando sea necesario y según los mecanismos antes mencionados, logrando un balance de masas y continuidad(ver ilustración 11). Las propiedades del material (porosidad, ángulo de fricción, densidad, diámetro medio, etc.) en el disco de la IMZ son el promedio de todo el que se encuentra en su interior, y las del material estático son un promedio del material ubicado solamente en el perímetro del disco [26].

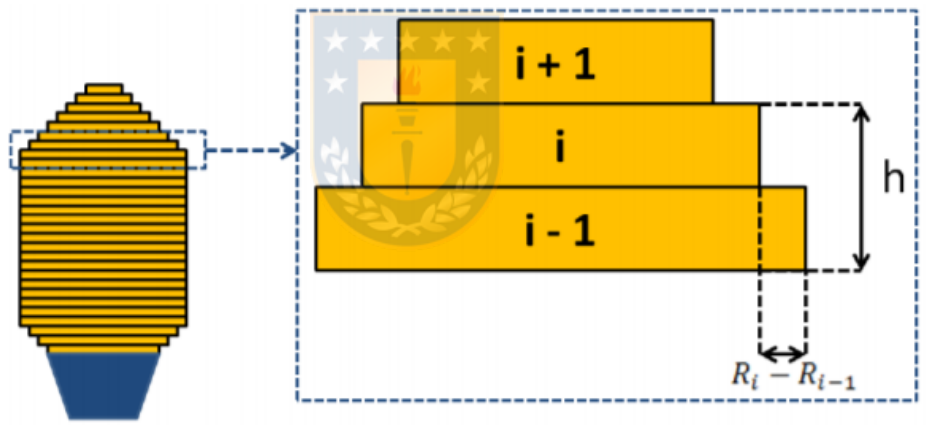


Ilustración 11 Discretización en REBOP[46]

Para una buena caracterización del flujo del material, se necesita hacer un seguimiento del material al interior de la IMZ, el cual se logra estableciendo un arreglo tridimensional de marcadores dentro del volumen de material a extraer (modelo de bloques) y actualizando la posición de cada uno dependiendo de la cantidad de material extraído. Cada marcador definido poseerá las propiedades iniciales del bloque y se moverán, en las distintas direcciones, según el perfil de velocidades de cada disco y la posición dentro de este [26].

2.7.3.4. Modelos Cinemáticos:

Los modelos cinemáticos describen el flujo como vacíos propagándose a través del material. El modelo cinemático provee una solución matemática para describir el flujo estableciendo una relación entre el tamaño de partículas y el ancho del flujo. Por el contrario dichos modelos no toman en cuenta la geometría de la batea y propiedades como el ángulo de fricción y la forma [4].

Nedderman [47] propuso un modelo enteramente cinemático involucrando solo una variable experimental para la descripción del campo de velocidades del flujo de material (ver ilustración 12) demostrando tener buenos resultados. Posteriormente realizó una modificación a su modelo aplicando la cinemática solo a la zona de flujo para predecir el desarrollo de la zona estancada de material [48]. Otro acertamiento a la determinación de las zonas aisladas de extracción es la formulación de Bergmark-Roos [49, 50]. Los modelos cinemáticos presentan buenos resultados para predecir el flujo y la forma del cuerpo de extracción en material desagregado [49].

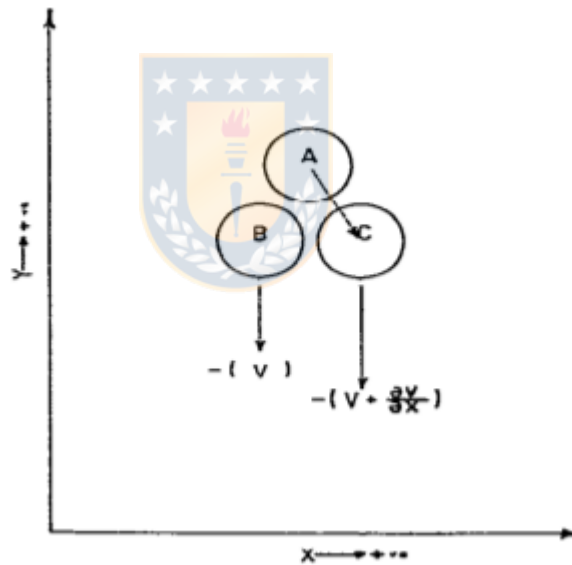


Ilustración 12 Modelo cinemático [47]

2.7.3.5. Modelos estocásticos y Autómatas celulares:

Son modelos basados en las reglas de las probabilidades para describir un fenómeno, los cuales solo se basan en la conservación de masa [51]. Cuando el material es removido de un punto de extracción, un vacío es creado y rellenado por el material sobre él [52]. La fuente exacta del material es desconocida y una asignación aleatoria es asignada. El parámetro p (probabilidad), controla el ancho de la zona de movimiento [51] (ver ilustración 15).

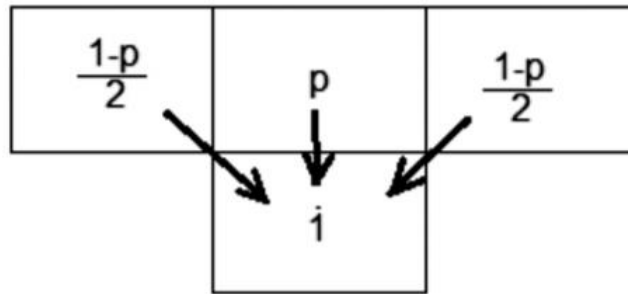


Ilustración 13 Esquema del modelo estocástico 2D[51]

El concepto de autómatas celulares (AC) fue desarrollado inicialmente por Von Neumann en 1947. Su aplicación en el modelamiento numérico de flujo se basa en el uso de reglas bien definidas y simples que permiten la simulación de un gran número de partículas con pocos requerimientos computacionales[53]. La ventaja de los autómatas celulares frente a los modelos empíricos es que puede simular el movimiento de los bloques individuales, ya que divide el dominio en una cantidad discreta de bloques que interactúan entre sí según las propiedades de cada vecindad [9]. Por otra parte una desventaja sería que requieren calibración [4].

Distintos esfuerzos en esta área se han desarrollado los últimos 20 años [9, 54–56], entre ellos se encuentra Flowsim, el cual es un modelo de autómatas celulares cuyos resultados han probado que correctamente calibrado puede ser usado como herramienta de predicción para el diseño del nivel de producción de minas de Block Caving [9]. Adicionalmente, ha demostrado ser capaz de replicar de forma realista la geometría de las IMZ obtenidas mediante modelos físicos[57] y se encuentra constantemente incorporando actualizaciones para el estudio de la propagación del *caving*, *airgap*, *rilling* y migración de finos [58]. Por ello el presente informe hará uso de un algoritmo de autómatas celulares basado en Flowsim[9] para estudiar el comportamiento del flujo gravitacional y la influencia del espaciamiento entre PE en la altura de interacción.

2.7.3.5.1. Flowsim:

El funcionamiento de Flowsim se basa en la división del dominio en celdas regulares de igual tamaño en las tres direcciones, donde el flujo gravitacional está definido por:

- Tamaño de celda: Tamaño de bloque o discretización realizada.
- Estado: El bloque puede poseer 3 estados, sólido en la cual el bloque no posee capacidad de movimiento, granular en la cual el bloque se puede mover y vacío bloques que permiten el flujo de material granular producto del ascenso de vacíos.

- Función de transición: Es una función que define la transición entre estados (Ej Sólido a Vacío)
- Vecindad: Corresponde a los bloques adyacentes al bloque de interés que se encuentren en la misma cota o superior.

La simulación del flujo gravitacional dentro de Flowsim, se define como un proceso estocástico. La extracción de material en los puntos de extracción genera un vacío que permite el descenso del material que se encuentra sobre él. La ascensión de un bloque vacío está sujeta a una cantidad de mínima de vacíos en una vecindad (cV), la cual se debe superar o igualar para que el vacío se propague[59]. En la ilustración 14 se presenta el estado de la vecindad de un vacío antes y después fluir, donde se observa como ocurre el intercambio entre un bloque vacío y una celda del con material granular en el nivel superior.

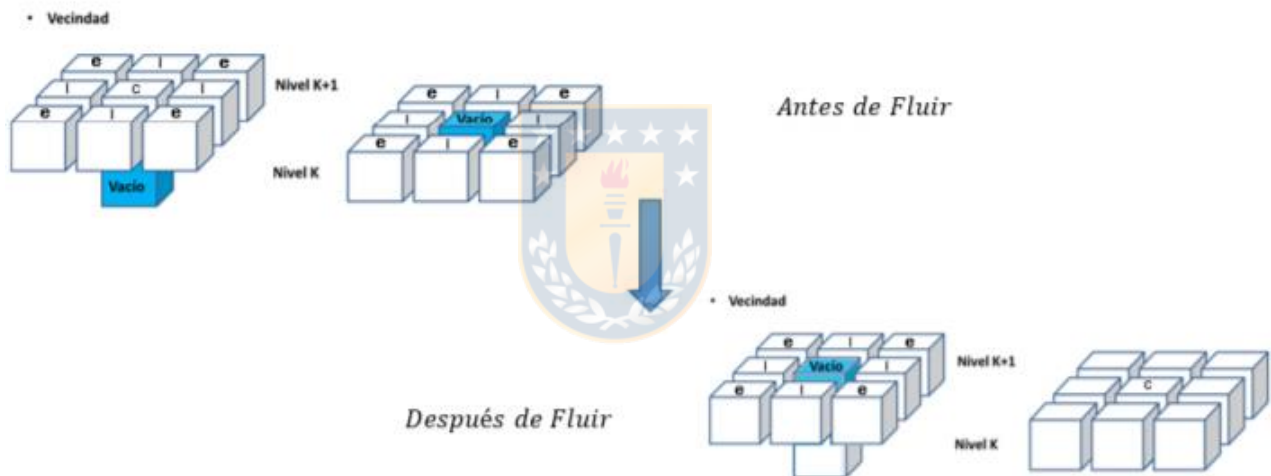


Ilustración 14 Funcionamiento de Flowsim[47]

La probabilidad de descender de cada bloque granular e intercambiar su posición con un vacío, se encuentra definida por una función gobernada por el inverso a la distancia y la calidad del macizo rocoso.

$$p_i = \frac{d_i^{-N} * RMR_i^{-M}}{\sum_k^9 d_k^{-N} * RMR_k^{-M}}$$

Donde p_i corresponde a la probabilidad de descender de un bloque i (%), d_i es la distancia en metros de un bloque i a la celda vacía y RMR_i es la calidad geomecánica del bloque i . N y M son coeficientes adimensionales definidos por el usuario, los cuales determinan la influencia del inverso a la distancia y calidad geomecánica en el cálculo de la probabilidad.

Los parámetros N y M deben ser calibrados con datos de la zona de extracción y movimiento de la faena minera o modelo físico que se quiera analizar y varían en función de las propiedades del material. El parámetro N está vinculado a la fragmentación de material e incrementa cuando la zona de extracción es angosta. Por otro lado el factor M está vinculado a la probabilidad de que ocurra migración de finos o flujo preferencial, para M igual cero se considera que no existe flujo preferencial[60].



3. Desarrollo Experimental:

Para estudiar el comportamiento de la altura de interacción en distintas condiciones es necesario internalizar el funcionamiento del código, realizar una calibración y por último construir el escenario donde se llevarán a cabo las simulaciones.

3.1. Descripción del código de Autómatas celulares:

El código de autómatas celulares desarrollado en lenguaje Python, está formado por distintos módulos, con distintas funcionalidades. A continuación se describirán los principales componentes:

- Simulador3D.py: Es el código principal, el cual se encarga de recibir los datos de entrada tales como el modelo de bloques (MB), tamaño de bloque, densidad, fragmentación primaria y número de extracciones (ext). Además, se encarga de leer funciones complementarias.
- BCCM.py: Implementa un modelo de fragmentación secundaria en block caving[7], requiere como parámetros de entrada la fragmentación primaria y el esfuerzo vertical. Reporta la fragmentación resultante y la variación de d_{50} .
- VLOAD.py: Calcula esfuerzos en material granular por medio de la ecuación de Janssen.
- FlowmarkIII.py: Código encargado de simular la extracción de material desde un punto de extracción. Requiere como parámetros de entrada el modelo de bloques, tamaño de bloques, número de extracciones, el factor “ N ”, factor “ mv ” y posición del punto de extracción.
- Mv3.py: Mide el ancho, alto y radio hidráulico de la zona de movimiento.

En la ilustración 15, se puede observar un esquema del funcionamiento del código desarrollado para lenguaje Python.

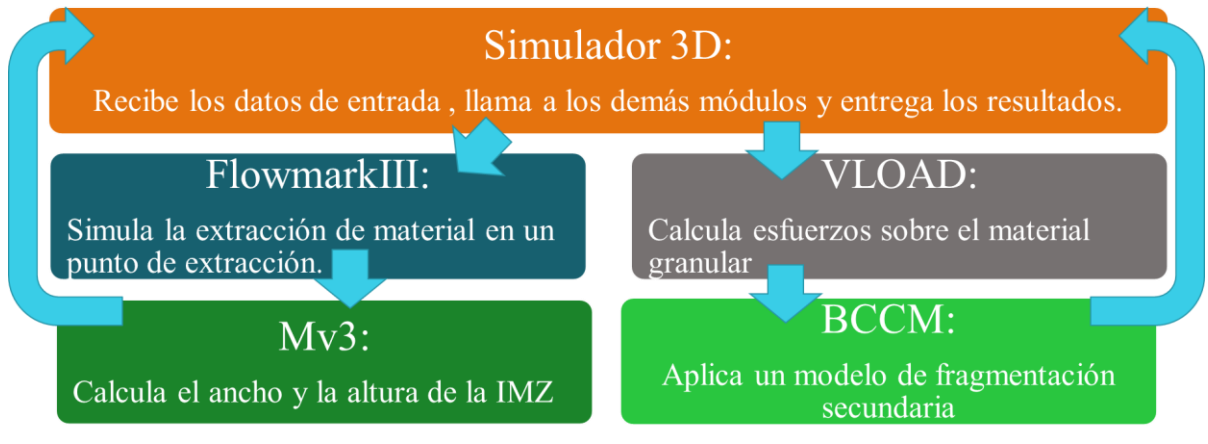


Ilustración 15 Esquema del código de Autómatas Celulares

El núcleo del algoritmo de autómatas celulares es el módulo FlowmarkIII.py, el cual se basa en la lógica empleada por Flowsim[21]. El algoritmo trabaja con un modelo de bloques dividido en celdas regulares (cubos), donde el flujo gravitacional está definido por el tamaño de celda, el estado del bloque, la función de transición y la vecindad asociada a cada bloque.

La simulación del flujo gravitacional, se define como un proceso estocástico. El flujo es emulado mediante el ascenso de vacíos (ver ilustración 16), producto del intercambio de los mismos con celdas que poseen material granular sobre este vacío.

La probabilidad de que un bloque i sobre el vacío descienda está dada por:

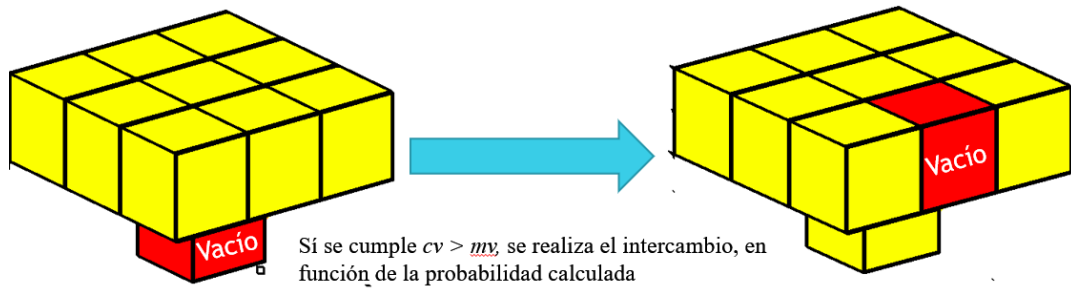
$$p_i = \frac{d_i^{-N}}{\sum_k^9 d_k^{-N}}$$

Donde d_i corresponde a la distancia, usualmente en metros, de un bloque “ i ” al vacío, y N es un parámetro adimensional.

Por otro lado para que se produzca el intercambio también se debe satisfacer

$$cv > MV$$

Donde cv corresponde a la cantidad de vacíos en una vecindad y MV es el número de vacíos mínimo requeridos para que se dé el intercambio.



Si se cumple $cv > mv$, se realiza el intercambio, en función de la probabilidad calculada

$$p_i = \frac{d_i^{-N}}{\sum_k d_k^{-N}}$$

Ilustración 16 Ascenso de vacíos

A continuación, se presentará un diagrama de flujo del código FlowmarkIII.py.

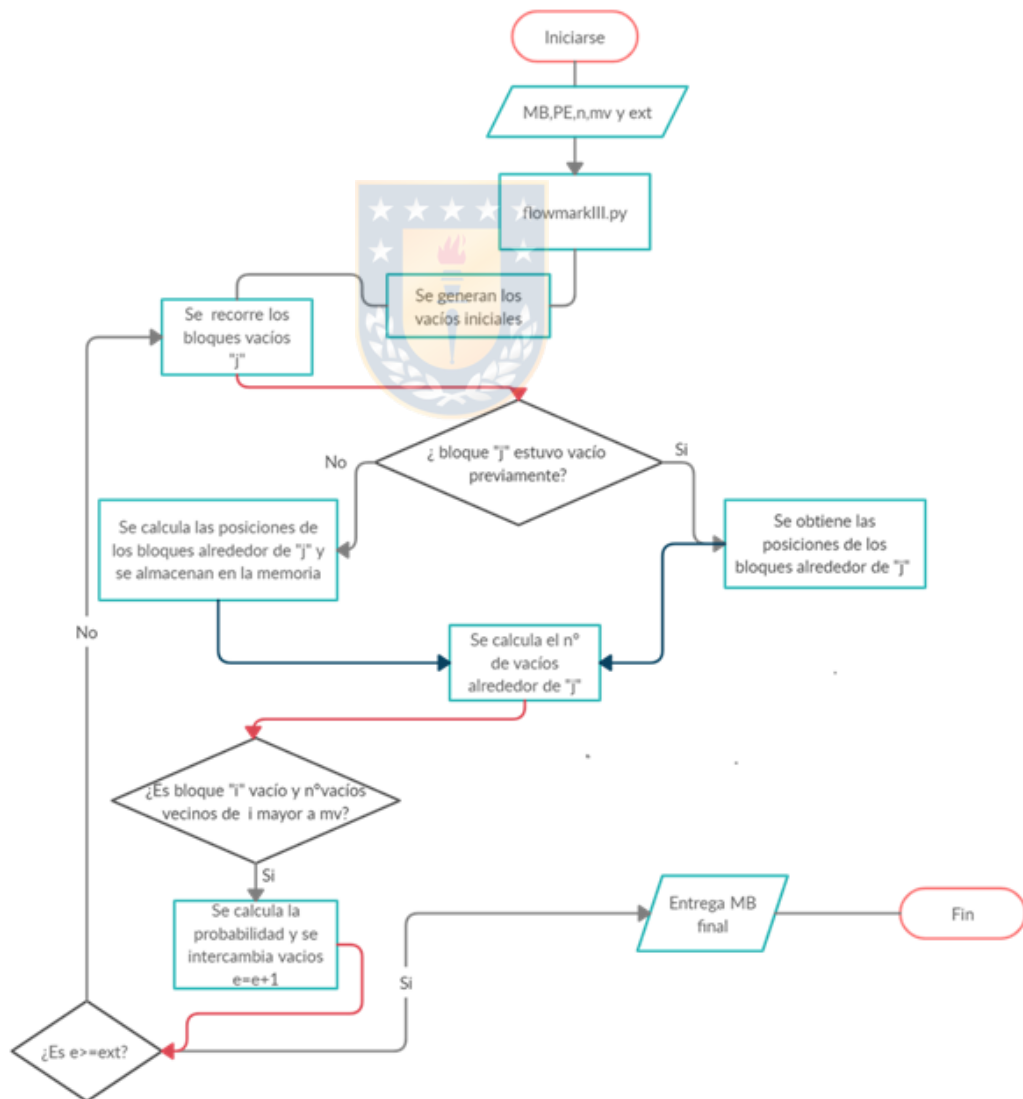


Ilustración 17 Diagrama de flujo FlowmarkIII

3.2. Calibración del algoritmo de AC

Para verificar que el algoritmo de autómatas celulares esté funcionando correctamente a la hora de describir el comportamiento de una zona de movimiento debe realizarse un proceso de calibración.

El proceso de calibración consta de dos partes, la primera centrada en comparar el ajuste de las simulaciones realizadas al comportamiento descrito por la ecuación cinemática de Nedderman[48] y otra enfocada a reproducir el comportamiento observado en modelos físicos.

La ecuación de Nedderman es una ecuación derivada del modelo cinemático desarrollado en [48], la cual establece una relación entre el ancho de la elipsoide de movimiento y la altura de esta expresados en términos de un tamaño característico, específicamente el d_{50} .

$$w = 3.42\sqrt{h}$$

Las simulaciones se realizaron para un modelo de bloques de 50m de ancho, 50m de largo y 100m de alto, con un tamaño de celda de 2m, un d_{50} de 1 m y un punto de extracción de 4m de ancho. Los parámetros N y MV considerados se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 1 Valores de N considerados en la calibración con la ecuación de Nedderman

Parámetro N				
0.5	1	2	3	4

Tabla 2 Valores de mv utilizados en la calibración con la ecuación de Nedderman

Parámetro MV		
1	2	3

El número de simulaciones necesarias se estimó haciendo uso de la siguiente ecuación

$$N^{\circ} = \left[\frac{Z * \sigma}{Error[\%] * X} \right]^2$$

Donde:

N° : corresponde al número de simulaciones

X: Promedio

Z: Estadístico normal estándar

σ : Desviación estándar

3.3. Casos de Estudio

Con el fin de estudiar el desempeño del algoritmo de autómatas celulares en lenguaje Python para la predicción del comportamiento de flujo gravitacional y su utilidad para simular situaciones presentes en una mina, se llevó a cabo la calibración del modelo numérico para distintos modelos físicos. La calibración se realizó mediante la comparación del ancho y la masa extraída para distintas alturas del elipsoide de movimiento.

3.3.1. Caso de estudio 1: Modelo físico de Castro 2006[6].

Este modelo se puede observar en la ilustración 18 y fue realizado con el propósito de estudiar el comportamiento de un punto de extracción en tiraje aislado. El material empleado en esta experiencia fue grava media de 8mm y gruesa de 18mm. Las dimensiones de modelo utilizado fueron de 3.4m de alto, 3.3m de ancho y 2.4m de largo. En la tabla 3 se puede apreciar las características de los experimentos considerados.

Tabla 3 Datos del Caso de estudio 1

Ex.	Ancho de PE[mm]	Densidad [kg/m ³]	Porosidad	Áng. de fricción[°]	d50[mm]	Cu	Escala
IS-T1	120	2700	0.3	45	16.8	2.33	1:30
IS-T4	36	2700	0.48	41	8.3	1.53	1:100

Obs: Cu corresponde al coeficiente de uniformidad de la curva de distribución de tamaños.



Ilustración 18 Modelo Físico Castro[6]

3.3.2. Caso de estudio 2: Modelo Físico Castro et al[7].

Experimento físico el cual representa una sección de una operación de Block/Panel Caving de 140m de largo, 46m de ancho y 480m de alto (ver ilustración 19). Dicha sección abarca 3 calles de producción y 9 calle s zanjas, configurados en una malla Teniente de 30x15m.

Tabla 4 Datos del Caso de estudio 2

Ex.	Ancho de PE[mm]	Densidad [kg/m ³]	Porosidad	Áng. de fricción[°]	d50[mm]	Cu	Escala
Caso 2	24	2600	0.44	39	4	2	1:200

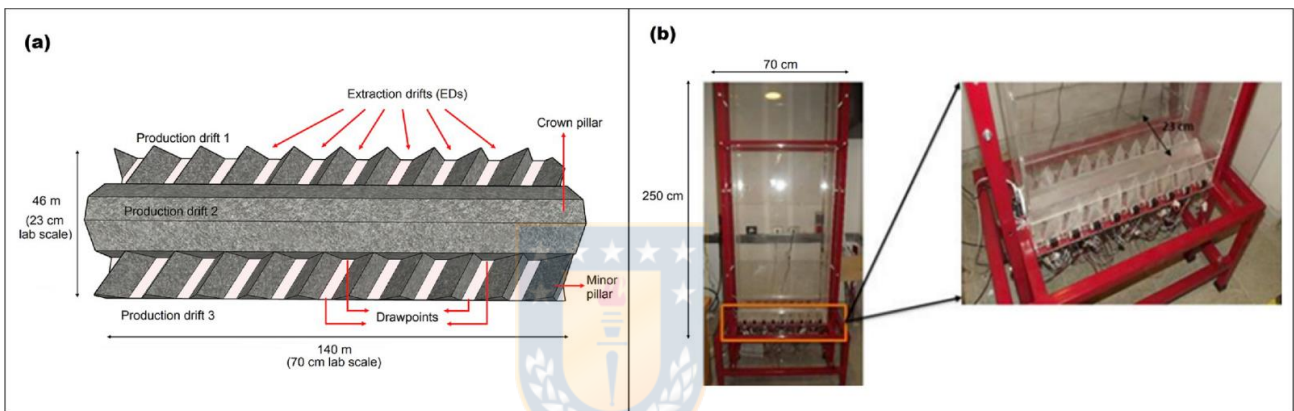


Ilustración 19 Modelo Físico Castro et al[7]

3.4. Influencia del parámetro N en la altura de interacción

En el modelo de flujo de autómatas celulares descrito anteriormente, el parámetro N juega un rol fundamental en el cálculo de las probabilidades de descenso de los bloques con material granular. Este parámetro depende de las propiedades del sistema y características del material algunas de las cuales han sido estudiadas de manera directa o indirecta en [9, 59, 60]. EL parámetro N controla principalmente en diámetro del IMZ, siguiendo una relación inversamente proporcional, vale decir a mayor N , menor diámetro del IMZ [60].

Aquí, se busca estudiar la influencia del parámetro N , en un parámetro crítico en minería de *caving*, la altura de interacción entre dos puntos de extracción, para ello se construyó un modelo de bloques de 200m de ancho, 200m de largo y 500m de alto. En dicho modelo se ubicaron 2 puntos de extracción y se simuló su extracción de forma simultánea.

Durante la simulación se midió la altura de interacción, es decir la altura desde la cual los elipsoides de movimiento comienzan a solaparse para dicha configuración de PE. Este proceso se realizó para los valores de N y espaciamentos tabulados en las tablas 5 y 6.

Tabla 5 Espaciamentos considerados en las mediciones de altura de interacción

Espaciamento[m]					
10	16	20	26	30	36

Tabla 6 Valores de N considerados en las mediciones de altura de interacción

N										
0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

3.4.1. Influencia del tipo de malla de extracción en la altura de interacción

Esta sección pretende identificar la influencia de distintas mallas de extracción en la altura de interacción, para ello se consideran 12 PE distribuidos en las mallas Cuadrada, Teniente y Henderson presentadas en la tabla 7.

Tabla 7 Mallas

Tipo de Malla	Cuadrada	Teniente	Henderson
Distancia entre calle zanja[m]	16	16	16
Distancia entre calles de producción[m]	32	27.71	29.86

4. Resultados:

En el presente capítulo se presentarán los principales resultados obtenidos del proceso de calibración del algoritmo de autómatas celulares y la influencia del parámetro N en la altura de interacción.

4.1. Resultados de la Calibración:

A partir de lo expuesto en la sección 3.2 se calculó el número de simulaciones mínimo para alcanzar un error deseado durante el proceso de calibración ($<10\%$). El número de simulaciones requeridas considerando un 8% de error y un nivel de confianza de 95%, fue de 5.

Posteriormente, se realizaron las simulaciones de flujo de 1 punto de extracción para cada parámetro considerado en las tablas 1 y 2, los resultados obtenidos y la ecuación de Nedderman[48] se pueden observar en la ilustración 20, donde W y H corresponden al ancho y altura de la IMZ.

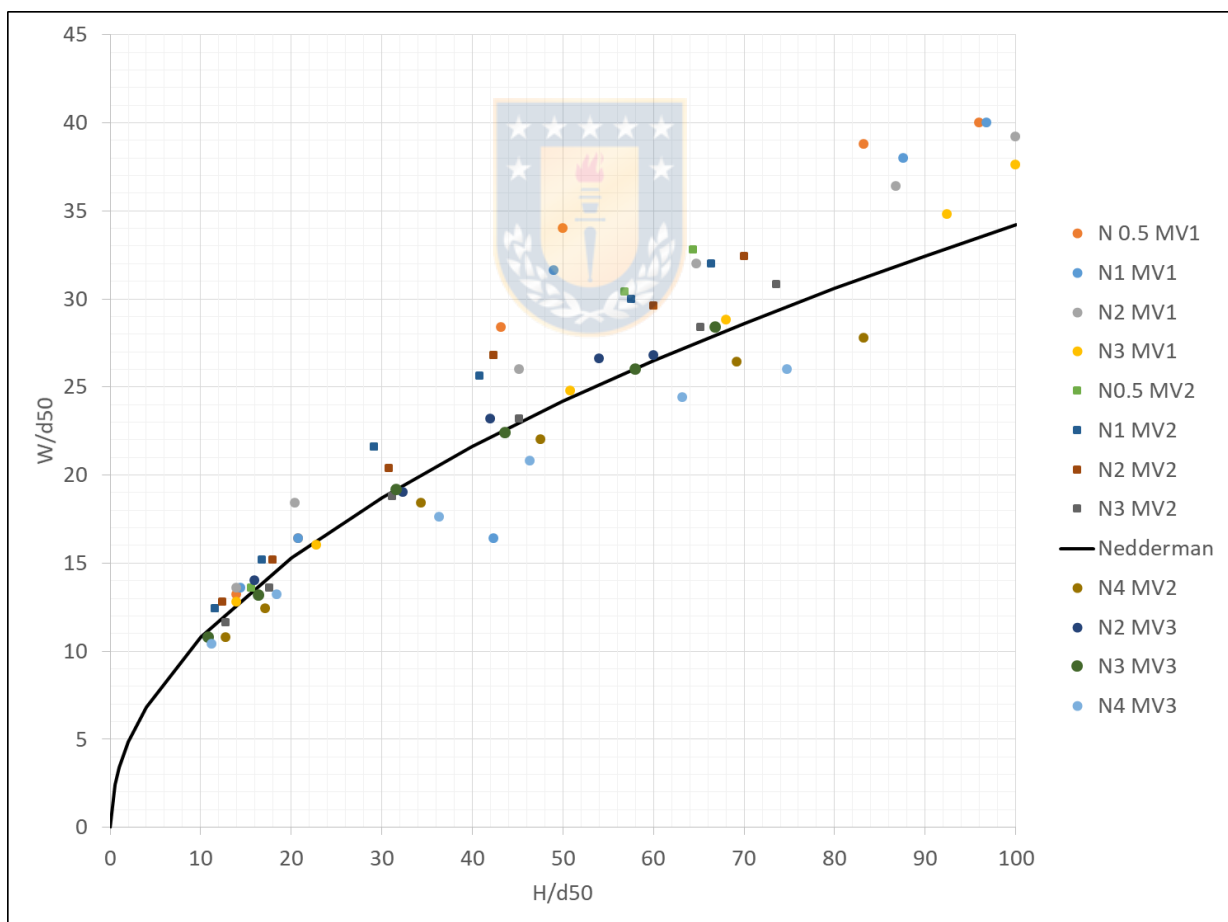


Ilustración 20 Calibración con la ecuación de Nedderman[48]

Para medir el error de la calibración se empleó la definición correspondiente al error cuadrático medio:

$$E_{cm} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n ek^2}{n}}$$

Donde n es el número de puntos simulados y ek es el error puntual.

Tabla 8 Parámetro N y MV con menor error cuadrático medio

Coefficientes	N3 MV1	N3 MV2	N2 MV3	N3 MV3
Error[m]	1.63	0.8	0.8	0.38

4.1.1. Influencia del tamaño de celda y d_{50} en la geometría del elipsoide de movimiento:

Para cuantificar la influencia del tamaño de celda en la geometría del elipsoide de movimiento, se mantuvieron fijos los parámetros N y MV e iguales a 2, adicionalmente se consideró un modelo de bloques de 50m de ancho 50m de largo y 100m de alto, con celdas de distintos tamaños (ver ilustración 21).

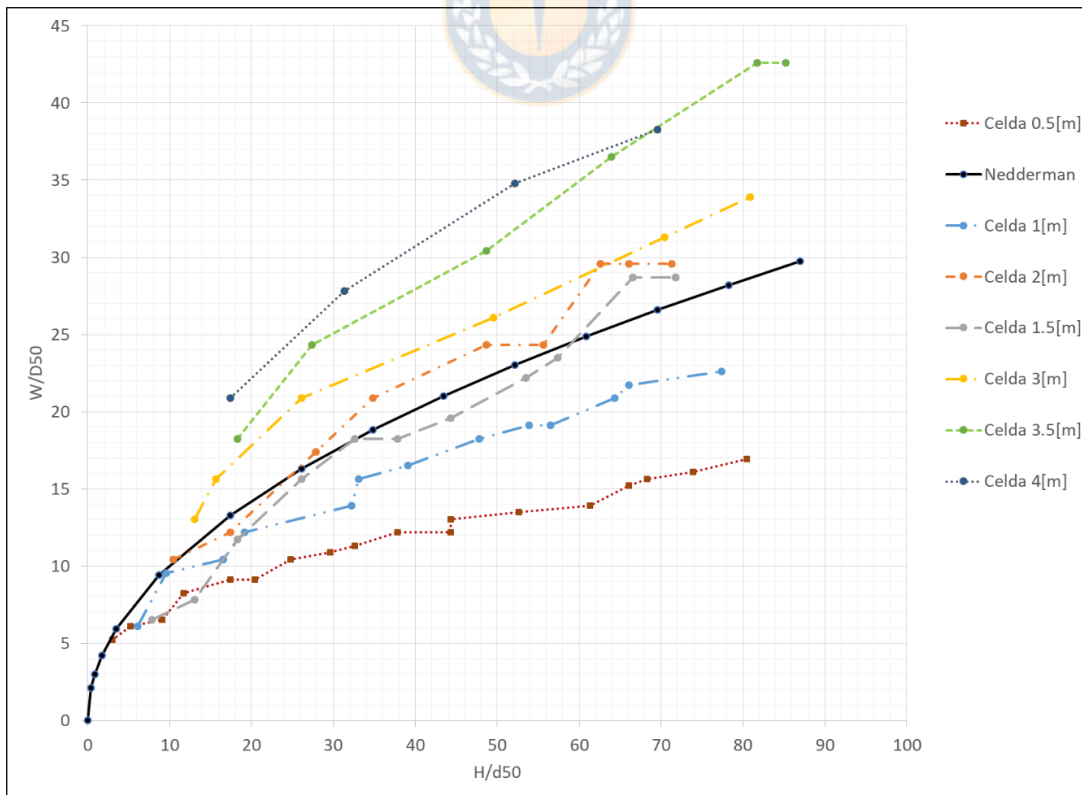


Ilustración 21 Influencia del tamaño de celda en el ajuste para un N y MV iguales a 2

Por otro lado, se buscó medir la influencia del d_{50} en el ajuste realizado, con la finalidad de establecer un límite sobre hasta que punto es posible aumentar o disminuir el tamaño de una celda en función del d_{50} . Para ello se consideró valores de d_{50} típicos entre [0.5-1.5m][61].

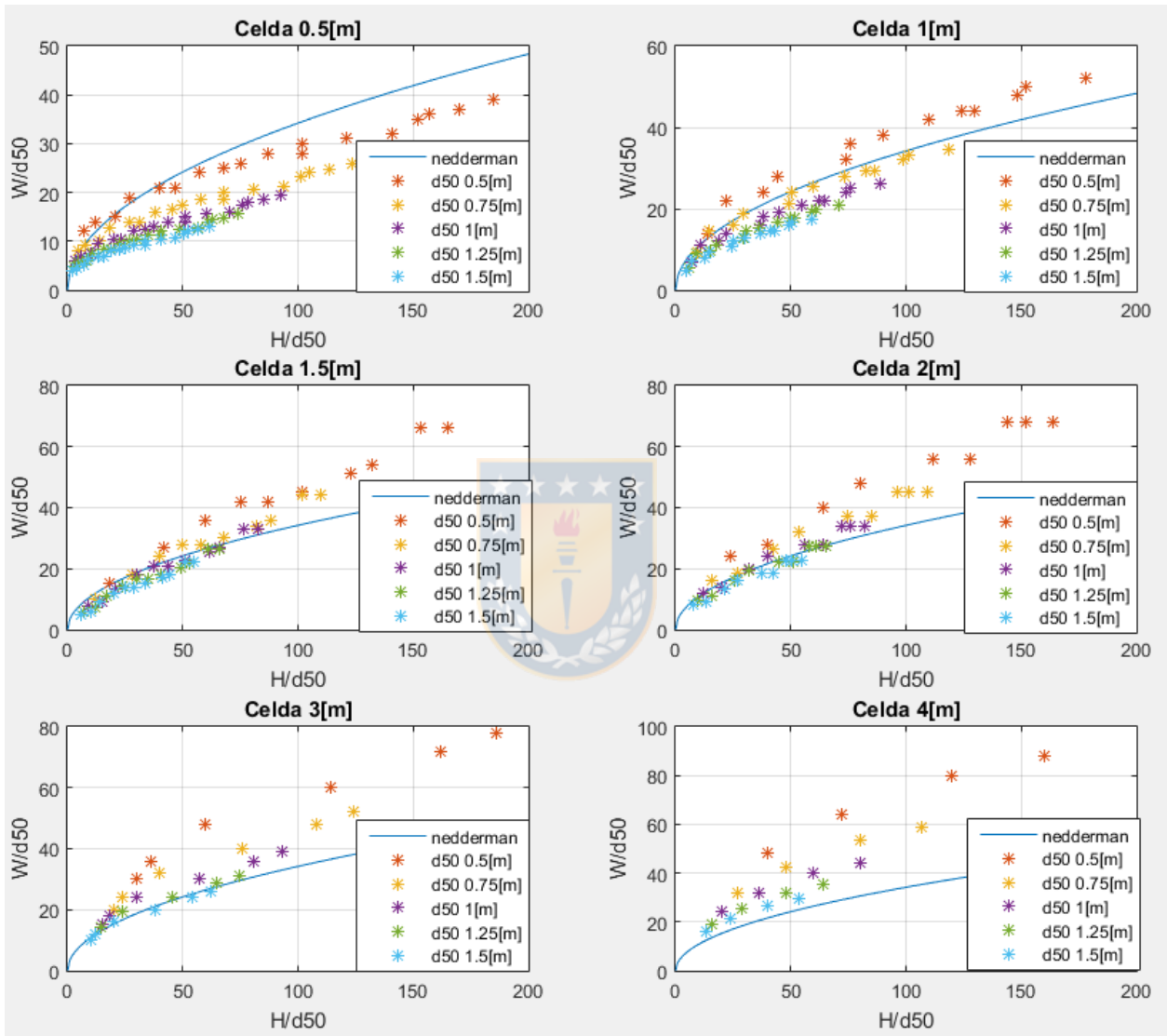


Ilustración 22 Influencia del d_{50} en el ajuste

4.2. Calibración con los Casos de Estudio

En primera instancia se realizó una calibración para el experimento IS-T1 de Castro[6], donde se construyó un modelo de bloques equivalente a las dimensiones del modelo físico y por medio de una discretización del mismo en celdas de 20mm se simuló la extracción de material. En la ilustración 23 se presenta un gráfico de la elipsoide de movimiento, a la izquierda (IZQ) se puede

observar una vista en planta en la cota $y=1500\text{mm}$ y a la derecha(DER) se muestra una vista de perfil en la coordenada $x=1400\text{mm}$.

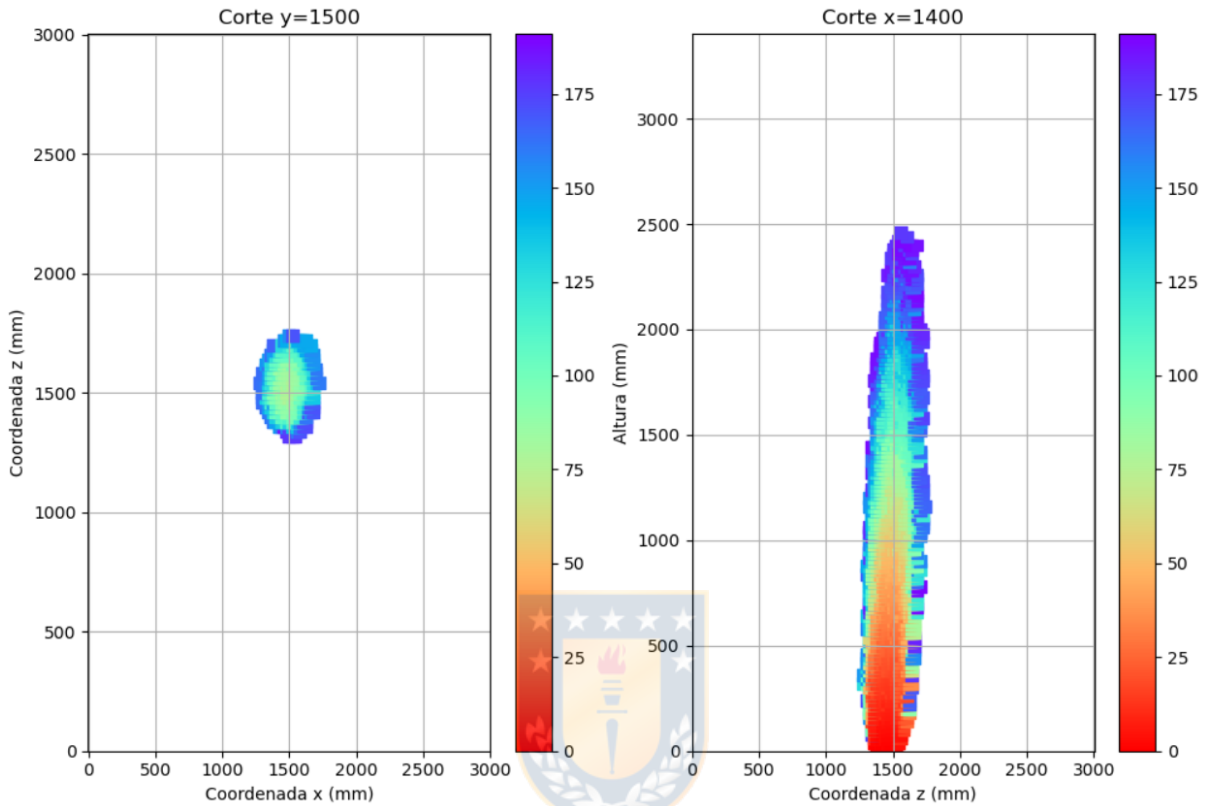


Ilustración 23 Simulación del experimento IS-T1, IZQ: Vista en planta del IMZ DER: Vista en perfil del IMZ. La barra de color indica la masa extraída [kg].

La ilustración 24 presenta las simulaciones realizadas y los datos presentados por Castro[6], a la izquierda se puede observar la masa extraída[kg] y el ancho del IMZ [mm], mientras que a la derecha se presenta el ajuste a la geometría del IMZ.

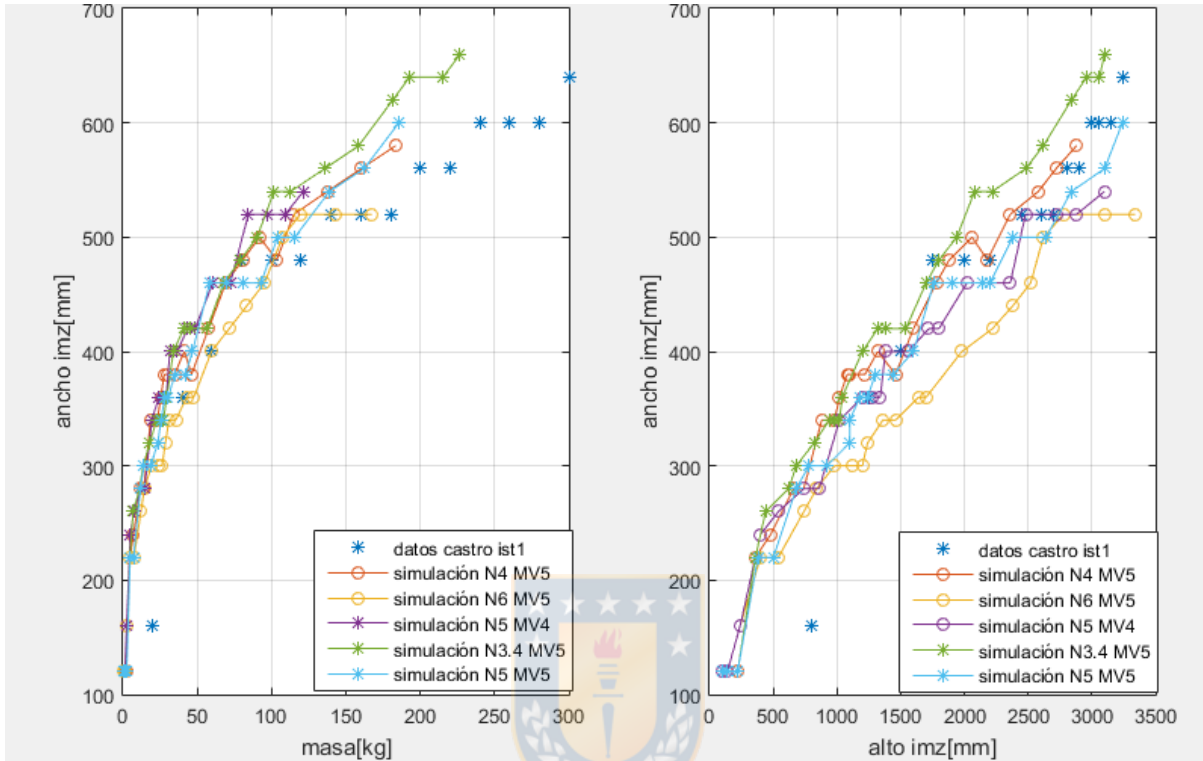


Ilustración 24 Resultados de simulación, IZQ: ancho de IMZ [mm] vs masa[kg], DER: ancho IMZ[mm] vs altura IMZ[mm]

Posteriormente para poder realizar una comparación entre los distintos casos de estudio, se repitió el proceso de calibración considerando celdas de 2m y las dimensiones a escala mina representadas por los modelos físicos.

La ilustración 25 presenta los resultados del experimento IS-T1 llevados a escala mina, donde A entrega el ajuste de los datos en función de la altura[m] y la masa[t] de la elipsoide de movimiento y B presenta el ajuste a la geometría del IMZ.

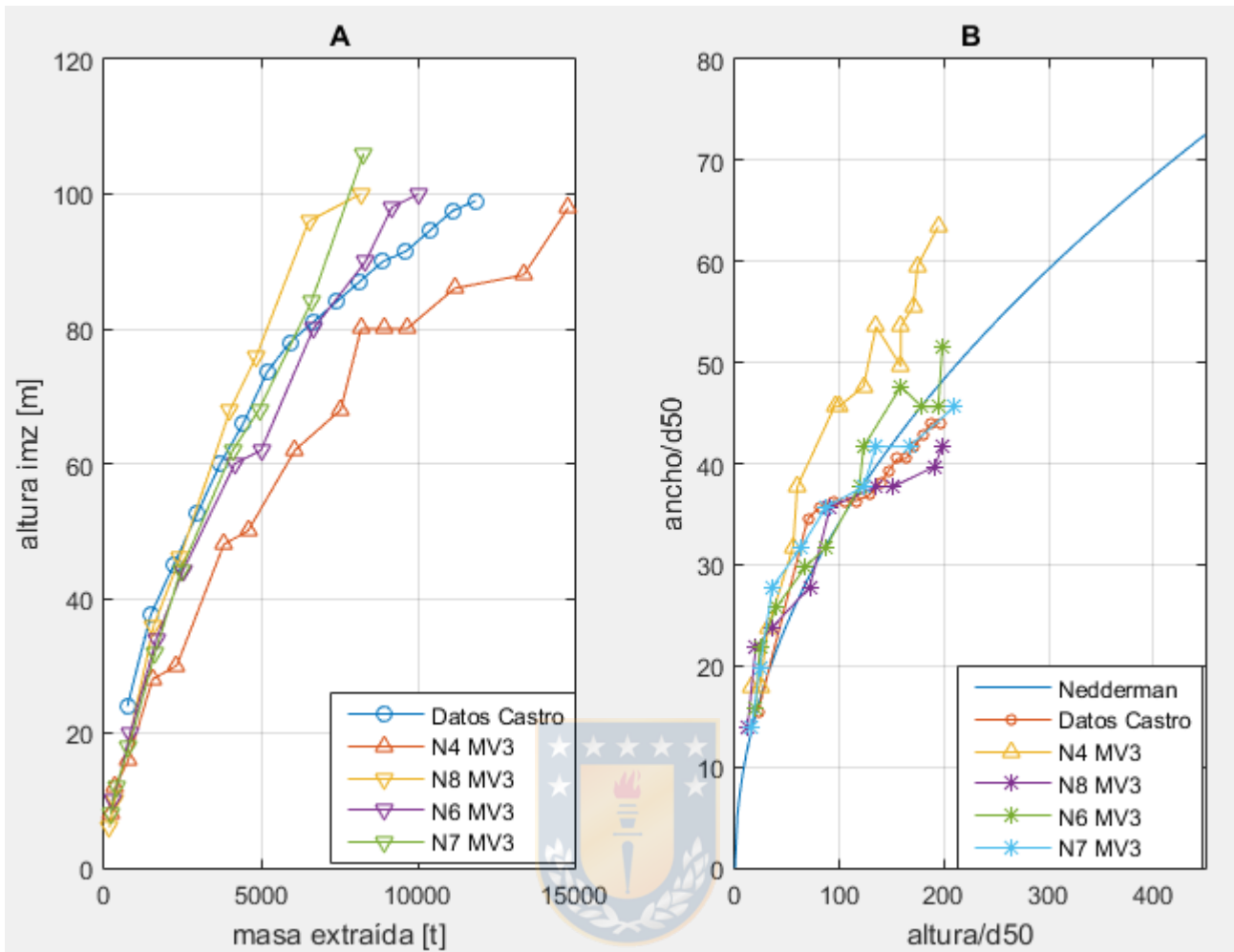


Ilustración 25 Simulación IS-T1, A: Altura IMZ vs masa extraída[t], B: Ancho/d50 vs Altura/d50

En la ilustración 26 y 27 se puede observar los resultados de las simulaciones realizadas en escala mina, para los modelos de IS-T4 Castro[6] y Castro et al[7], donde la figura A corresponde a la altura de la elipsoide de movimiento en función de la masa extraída y la figura B corresponde al ancho en función de la altura, expresados ambos en términos del d_{50} .

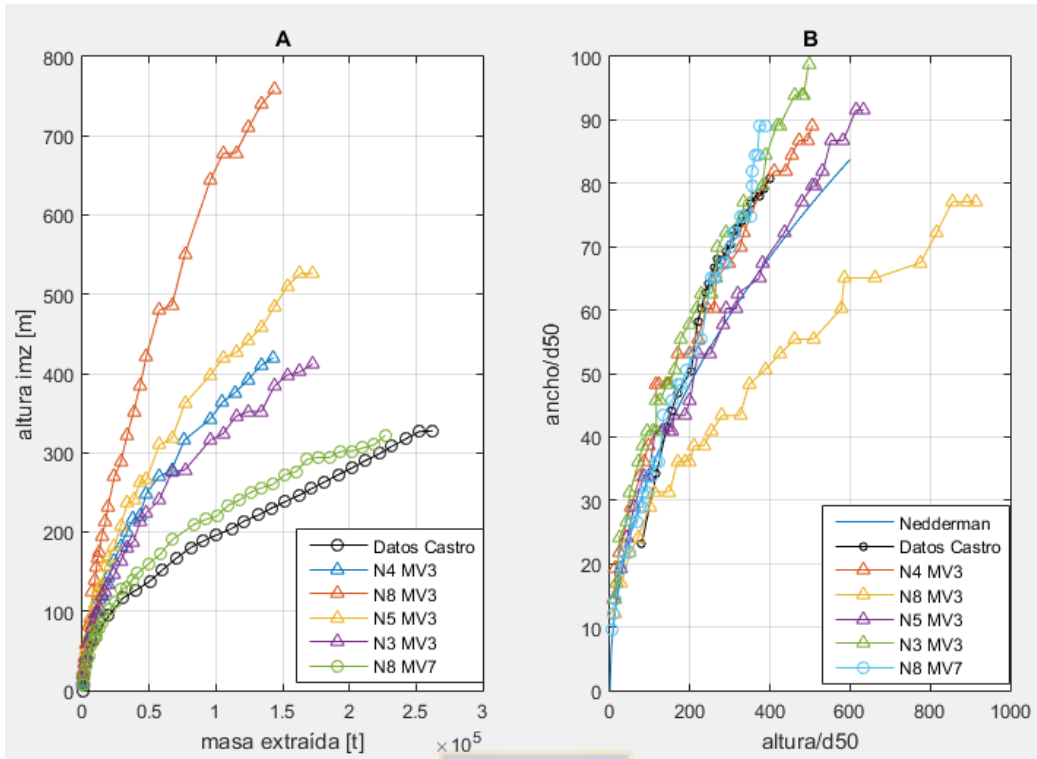


Ilustración 26 Simulación IS-T4 Escala Mina, A: Altura IMZ vs masa extraída[t], B: Ancho/d50 vs Altura/d50

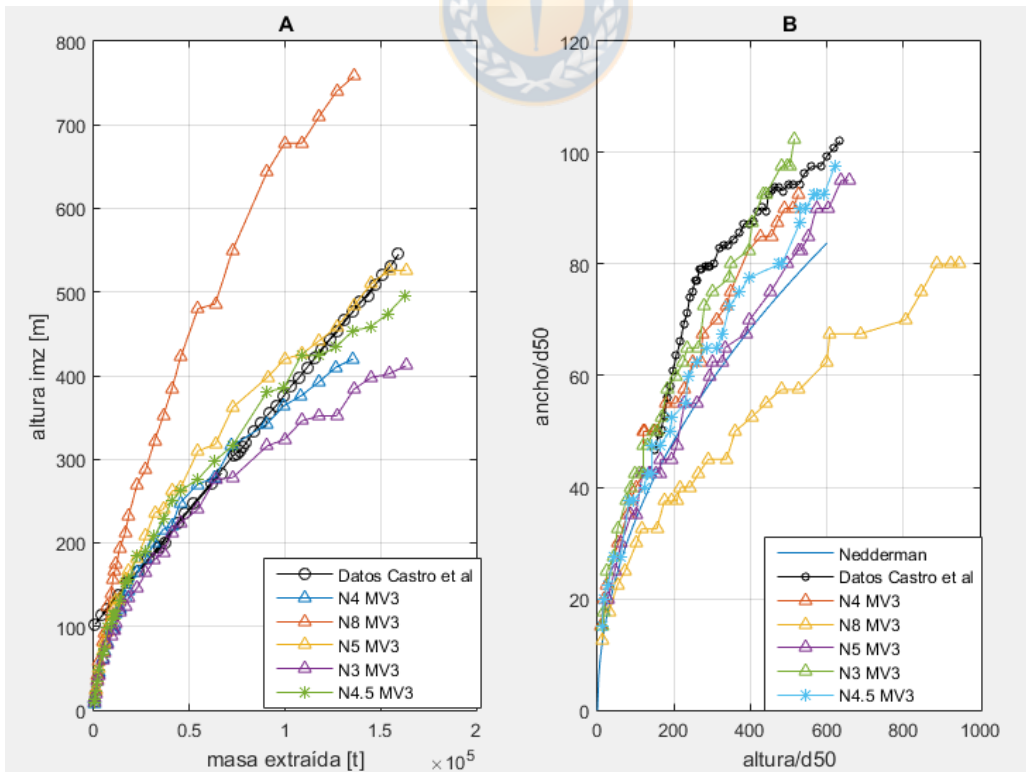


Ilustración 27 Simulación Modelo Físico Castro et al[7], A: Altura IMZ vs masa extraída[t], B: Ancho/d50 vs Altura/d50

4.3. Altura de interacción:

La medición de la altura de interacción fue realizada mediante una modificación al código `flowmarkIII.py`, que permite en primera instancia introducir mayor cantidad de puntos de extracción y en segunda determinar a qué punto de extracción está asociado cada bloque. Las líneas de código incorporadas para realizar lo anteriormente descrito se presentan en el Anexo I

Una vez se establece a que punto de extracción se encuentra asociado un bloque, se procede a calcular la altura de interacción como la altura en la cual se intercambia un bloque perteneciente a un PE_1 con un bloque perteneciente a PE_2 , como se muestra en la Ilustración 28. Considerando dicha premisa se midió la HIZ para los espaciamientos y N establecidos en las tablas 5 y 6.

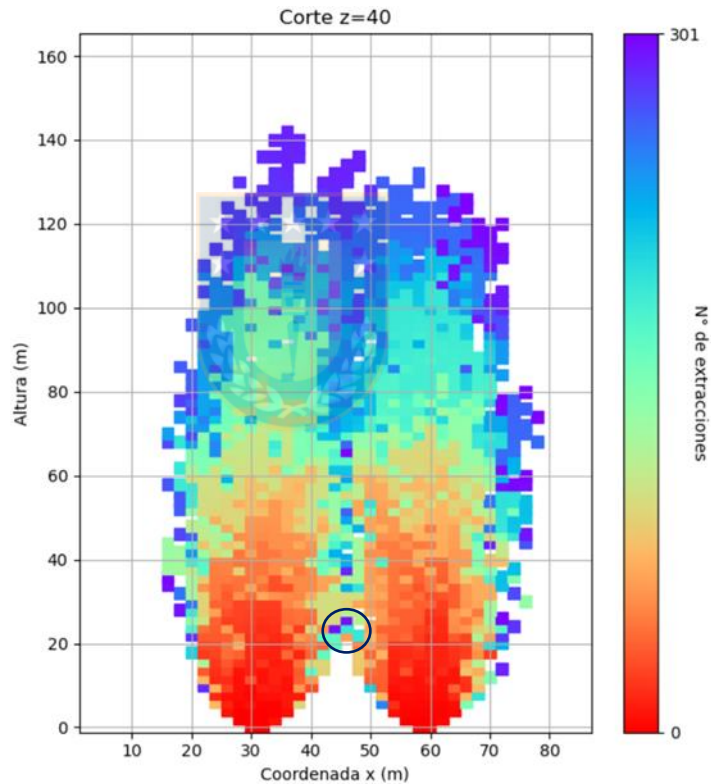


Ilustración 28 Simulación PE_1 y PE_2

Obs: El círculo que marca la interacción de los elipsoides es solo referencial, ya que solo se está visualizando un corte en 2D.

La ilustración 29 presenta las alturas de interacción medidas para distintos N , considerando distintos espaciamientos, donde se observa una relación directamente proporcional entre el N y la altura de interacción.

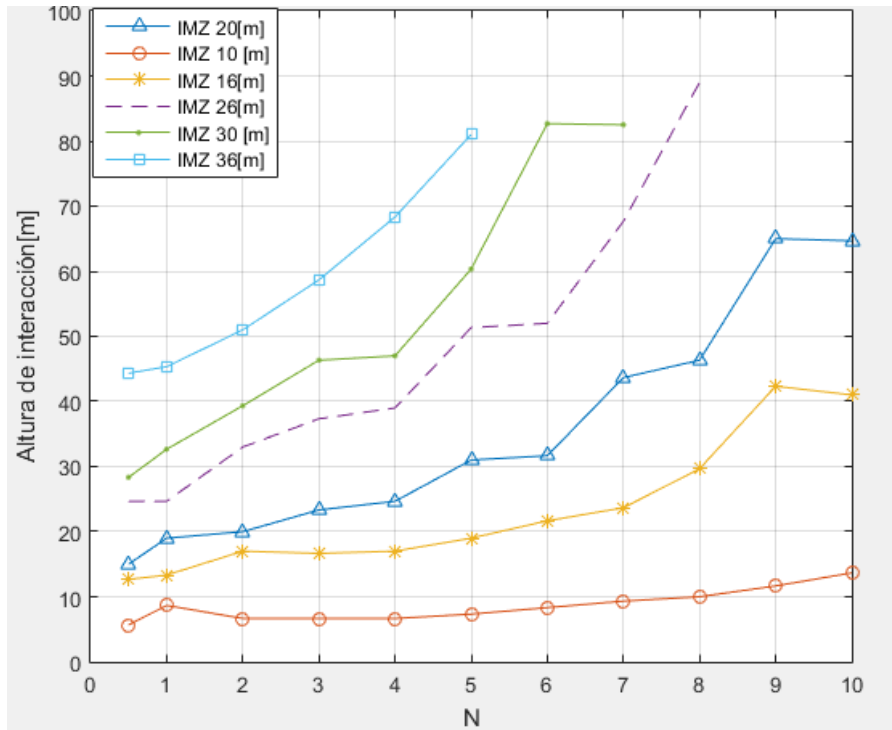


Ilustración 29 Altura de interacción en función del parámetro N

Adicionalmente, la ilustración 30 presenta la altura de interacción en función del espaciamiento, para simulaciones realizadas para distintos valores de N . En ella se puede observar que existen valores de espaciamiento en los cuales no existe interacción entre puntos de extracción para un determinado valor de N .

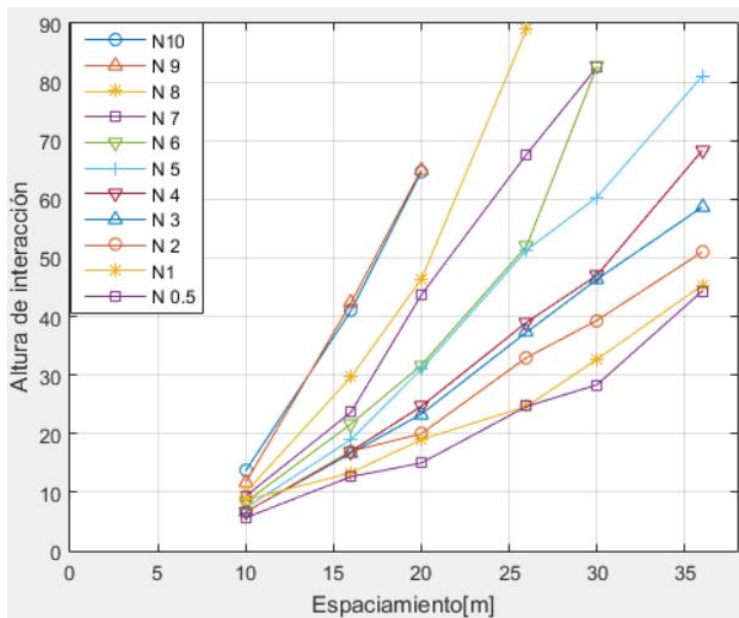


Ilustración 30 Altura de interacción en función del espaciamiento

Posteriormente, se realiza el mismo procedimiento pero esta vez simulando la altura de interacción para distintas mallas presentadas en la tabla 7, considerando un parámetro N y MV igual a 4 y 3 respectivamente. Las ilustraciones 31, 32 y 33 presentan la zona de movimiento para las distintas mallas de extracción, observando a la izquierda una vista en perfil y a la derecha una vista en planta.

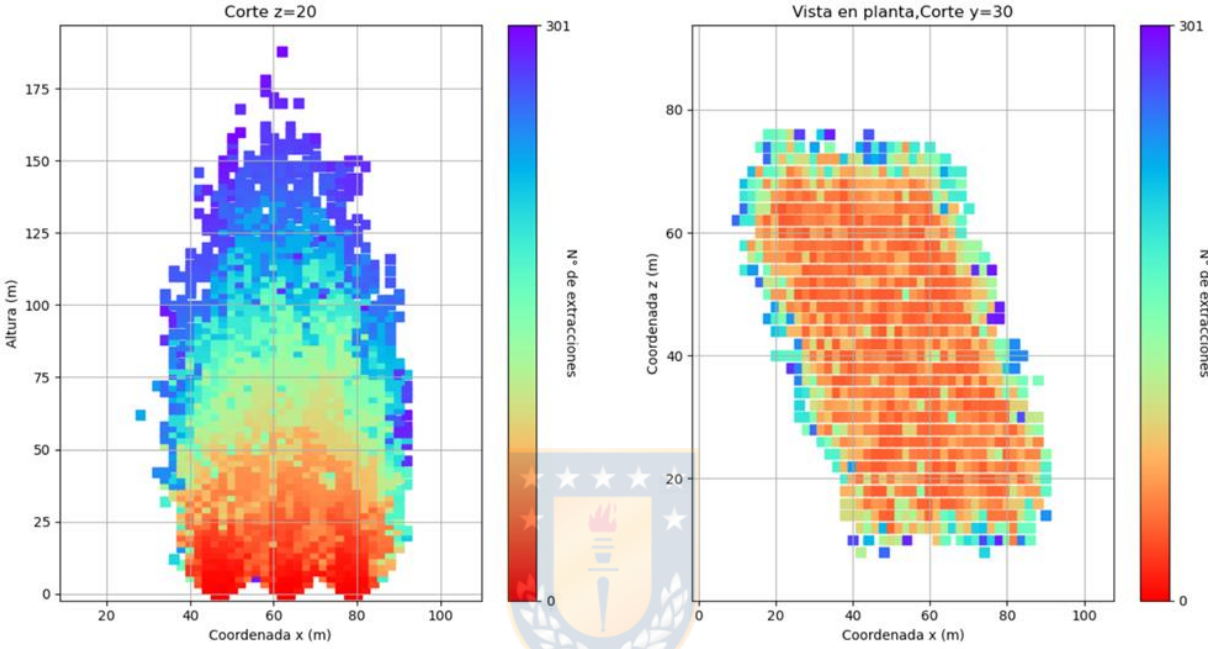


Ilustración 32 Zona de movimiento Malla Teniente

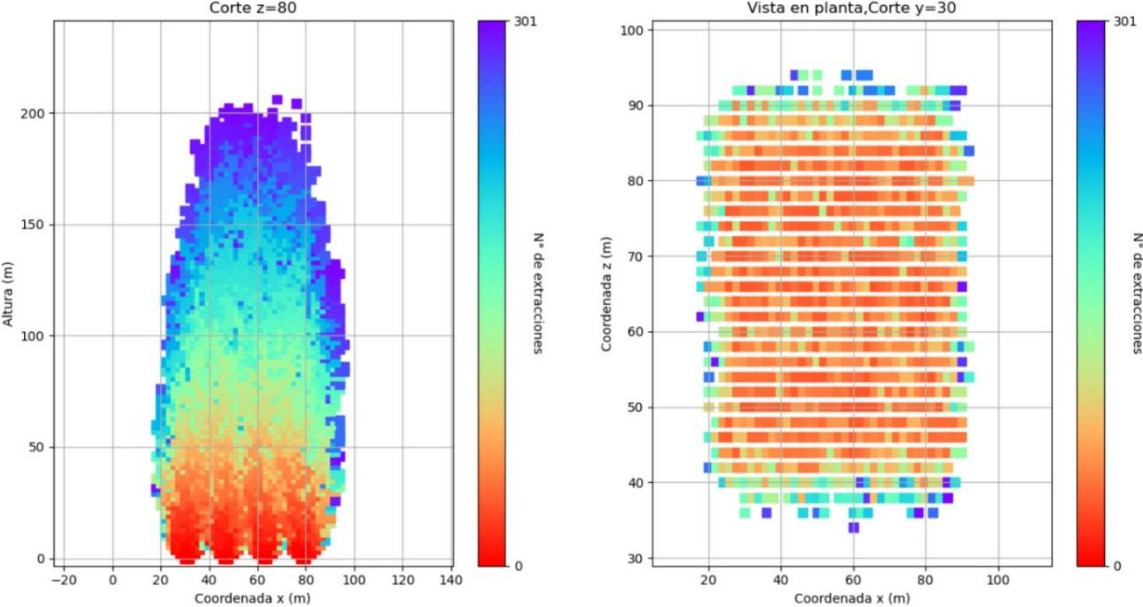


Ilustración 31 Zona de movimiento Malla Cuadrada

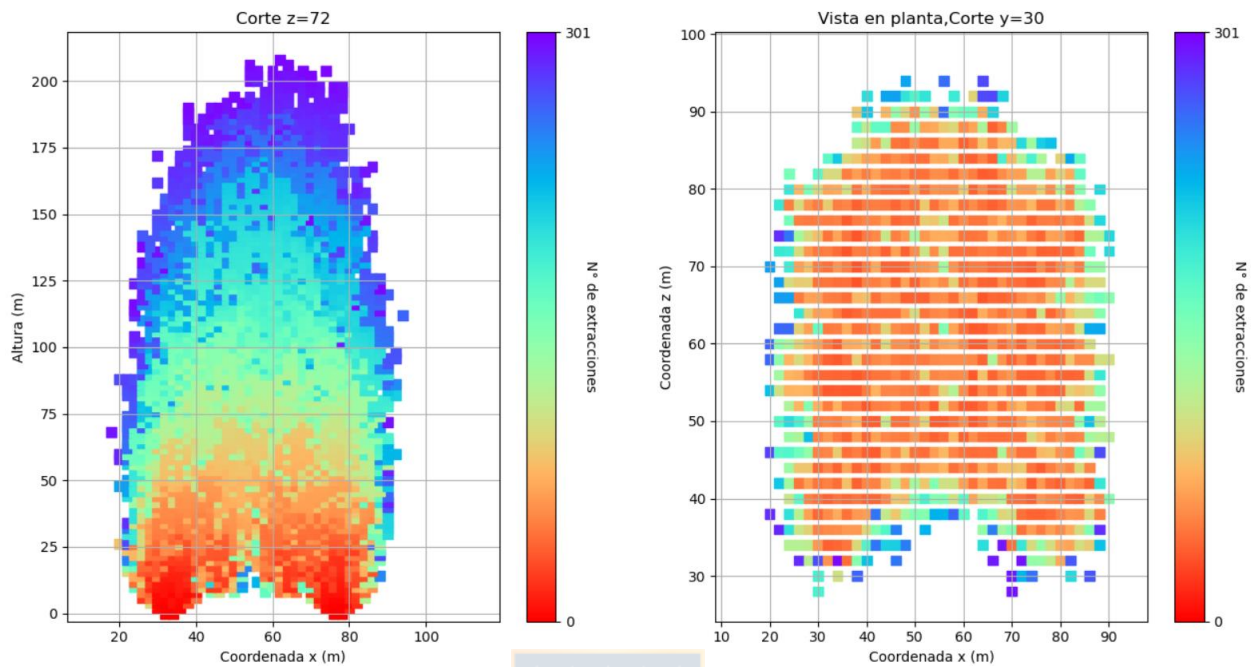


Ilustración 33 Zona de movimiento Malla Henderson

En la tabla 9 se pueden observar las distintas alturas de interacción medidas para las diferentes mallas de extracción.

Tabla 9 Altura de interacción promedio entre puntos de extracción

Distancia entre PE[m]	HIZ Malla Cuadrada[m]	HIZ Malla Teniente[m]	HIZ Malla Henderson[m]
14	-	-	-
16	17.33	17.33	18.33
22	31.25	-	31
28	-	46.25	39.67

5. Análisis de Resultados:

En función de los resultados presentados anteriormente en el proceso de calibración realizado para celdas de 2m, se puede observar que los valores de N y MV que mejor se ajustan al comportamiento descrito por el modelo cinemático de Nedderman, son N y MV iguales a 3, ya que como se muestra en la tabla 8 presentan el menor error cuadrático medio. Estos valores de N y MV proponen un buen punto de partida a la hora de calibrar el modelo con datos minas, sin embargo cada operación es un caso particular, por lo cual dichos parámetros pueden sufrir variaciones dependiendo del tipo de material y del tamaño de roca.

Por otro lado del análisis de sensibilidad presentado en la ilustración 21, se identificó que para N y MV fijos e iguales a 2, las simulaciones realizadas con un mayor tamaño de celda excedían el ancho descrito por Nedderman y viceversa. Adicionalmente en la ilustración 22, se puede apreciar la influencia del d_{50} en la calibración, donde se observa que para realizar un ajuste acorde al modelo de Nedderman, se debe considerar un tamaño de celda mayor igual al doble del d_{50} y menor igual a cuatro veces el mismo.

Al comparar las simulaciones presentadas en las ilustraciones 25 y 27, se puede notar que el caso de estudio IS-T1 presentado en la ilustración 23 se ajusta mejor al comportamiento simulado por N altos, entre 7 y 8; en cambio, el caso de estudio 2 se ajusta mejor al comportamiento descrito por un N más bajo entre 3 y 4. Esto sugiere que existe una relación inversa entre valor del parámetro N y el d_{50} , ya que en el caso IS-T1, el d_{50} era de 0.5m, lo que es menor a los 0.8m del caso de estudio 2.

En relación a las alturas de interacción, se tiene que para N mayores a 8, espaciamientos mayores a 26m y alturas de extracción de 200m, no se interceptan los elipsoides de movimientos. En cuanto a las alturas de interacción medidas para mallas de extracción, se observa que no existe una diferencia significativa entre las mismas (ver ilustración 34).

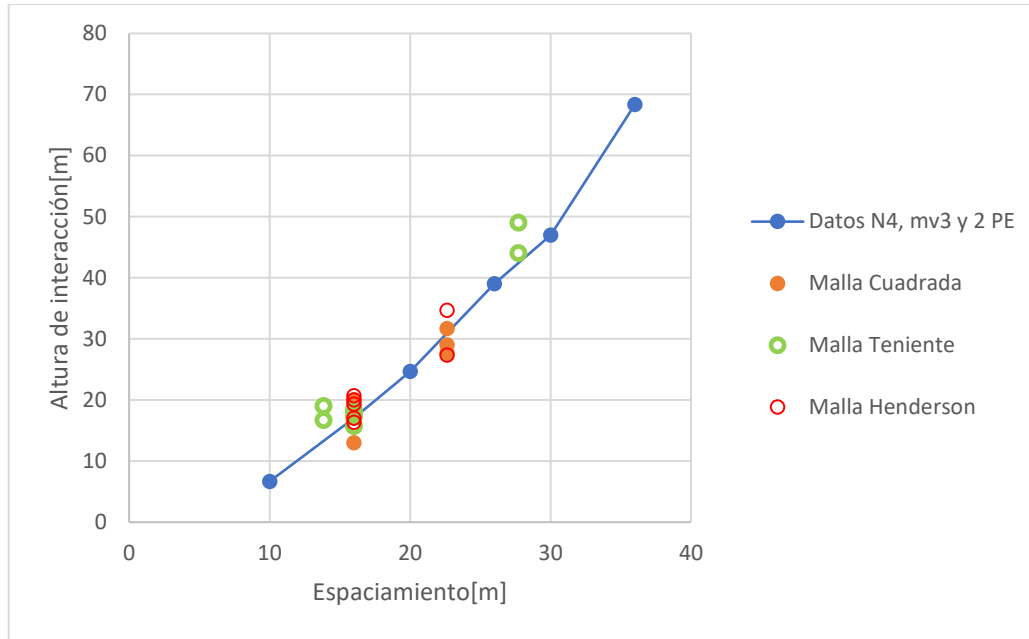


Ilustración 34 Altura de interacción vs Espaciamiento

Finalmente, se propuso un modelo para predecir la altura de interacción, HIZ, en función del parámetro N y el espaciamiento, el cual se presenta a continuación:

$$\text{Modelo 1: } HIZ = e^{\alpha + cN} E^{\beta}$$

Donde α , β y c son coeficientes adimensionales, N es el parámetro de entrada del código de autómatas celulares y E corresponde al espaciamiento entre 2 puntos de extracción en metros.

Tabla 10 Modelo ajustado

Coficiente:	Modelo 1
α	-2.5311
β	1.7607
c	0.1294
R^2	0.9641

Como se observa en la tabla 10, el modelo propuesto posee un R^2 cercano a 1, por ende se ajusta mejor a los datos simulados. Esto implica que es un modelo válido para estimar la interacción entre dos puntos de extracción en función del espaciamiento y el parámetro N, el cual está vinculado con la fragmentación del material quebrado.

6. CONCLUSIONES:

Acorde al trabajo realizado se puede concluir que el código de autómatas celulares, previamente calibrado es capaz de simular correctamente el comportamiento de la zona de movimiento descrito por el modelo cinemático de Nedderman. Adicionalmente también demostró ser capaz de ajustarse correctamente al comportamiento de las IMZ observados en los casos de estudio. Por lo cual se tiene que es una herramienta útil para la comprensión del flujo gravitacional.

Por otro lado, existe una relación entre el tamaño de celda, y las dimensiones de las IMZ simuladas, por lo que se sugiere escoger un tamaño de celda acorde al d_{50} , es decir un tamaño de celda entre 2 y 4 veces el tamaño característico.

En relación al d_{50} , se puede establecer que existe una relación inversamente proporcional entre el parámetro N y el d_{50} , ya que acorde a los resultados obtenidos para los casos de estudios, se encontró que los valores de N altos, estaban asociados a ensayos con material fino y por el contrario N bajos se ajustaban mejor a ensayos con material grueso. Sin embargo, se estima prudente recopilar una mayor cantidad de datos mina y de laboratorio, para reafirmar o descartar dicho comportamiento.

En cuanto, a las mediciones de alturas de interacción realizadas para distintos espaciamientos, se observó que existen espaciamientos en los cuales no ocurre interacción entre las zonas de movimiento, para valores de N altos. Por otra parte, los valores de N altos, se relacionan a material fino, el cual tiende a formar zonas de movimientos más angostas, por lo que se puede concluir que es de vital importancia tener conocimiento del tamaño de fragmento a lo largo de la columna de mineral, ya que incide en la interacción entre los puntos de extracción y por ende en la recuperación de mineral y en la estabilidad del nivel de producción.

Finalmente, se tiene que el modelo 1, ajustado en el capítulo 5, posee un R^2 cercano a 1, por ende realiza un buen ajuste de los valores de altura de interacción, en función del parámetro N y el espaciamiento. Esto es de suma utilidad, ya que permite obtener una aproximación de la altura de interacción, sin necesidad de ejecutar el código de autómatas celulares, lo cual permite tener una noción del grado de interacción entre PE, mediante el uso de una ecuación simple, lo que es útil para diseño en fase de prefactibilidad y otros estudios que empleen el mismo código.

7. Referencias

- [1] F. Del Castillo, "Planificación Minera," *Fund. Tecnológica*, no. Boletín Minero, pp. 33–35, 2016.
- [2] F. Khodayari and Y. Pourrahimian, "Mathematical programming applications in block-caving scheduling: A review of models and algorithms," *Int. J. Min. Miner. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 234–257, 2015.
- [3] E.T.Brown, *Block Caving Geomechanics*. Queensland: JKMRC, 2002.
- [4] W. Hancock, D. Weatherley, and G. Chitombo, "Large-scale simulations of gravity flow in block caving," pp. 553–566, 2010.
- [5] W. Hancock and G. Chitombo, "Modeling the Gravity Flow of rock using the Discrete Element Method," *Massmin*, 2012.
- [6] R. L. Castro, "Study of the Mechanisms of Gravity Flow for Block Caving," The University of Queensland, 2006.
- [7] R. Castro, R. Gómez, M. Pierce, and J. Canales, "Experimental quantification of vertical stresses during gravity flow in block caving," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 127, no. March 2019, 2020.
- [8] D. Laubscher, "Cave mining-the state of the art," *J. South African Inst. Min. Metall.*, vol. 94 no 10, no. October, pp. 279–293, 1994.
- [9] R. L. Castro, F. Gonzalez, and E. Arancibia, "Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving," *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 109, no. 7, pp. 393–400, 2009.
- [10] R. Kvapil, "Gravity Flow of granular materials in hoppers and bins in mines," vol. 2, no. 1, pp. 277–304, 1965.
- [11] P. Paredes, "MECANISMOS DE ENTRADA DE DILUCIÓN EN MINAS DE BLOCK/PANEL CAVING," Universidad de Chile, 2012.
- [12] D. Laubscher, "A Practical Manual on Block Caving Disclaimer," *ICS Spons.*, 2000.
- [13] R. L. Castro, R. Vargas, and F. De La Huerta, "Determination of drawpoint spacing in panel caving: A case study at the el teniente mine," *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 112, no. 10, pp. 871–876, 2012.
- [14] T. Heslop, "Understanding the flow of caved ore and its influence on ore recoveries and dilution in a block cave," *Caving*, pp. 539–551, 2010.
- [15] A. Susaeta, E. Rubio, J. Henríquez, and G. País, "Dilution behaviour at Codelco panel cave mines," *Massmine*, pp. 167–178, 2008.
- [16] P. A. Wood, "Fundamentals of bulk solids flow," *IEA (International Energy Agency) Coal Res.*, 1986.
- [17] A. Rustan, "Gravity flow of broken rock - What is known and unknown," *Australas. Inst. Min. Metall. Publ. Ser.*, no. 7, pp. 557–568, 2000.

- [18] R. Verdugo and J. Ubilla, "Geotechnical Analysis of Gravity Flow During Block Caving," *MassMin*, no. August, pp. 195–200, 2004.
- [19] L. Dorador, I. Geotécnico, and W. Plc, "Evolución de Granulometría de Material Quebrado en Columnas de Extracción en Minería de Hundimiento (Block / Panel Caving) Evolución de Granulometría de Material Quebrado en Columnas de Extracción en Minería de Hundimiento (Block / Panel Caving) Resum," no. December, 2018.
- [20] V. Sánchez, R. L. Castro, and S. Palma, "Gravity flow characterization of fine granular material for Block Caving," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 114, no. December 2018, pp. 24–32, 2019.
- [21] R. Castro, R. Trueman, and A. Halim, "A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 44, no. 6, pp. 860–870, 2007.
- [22] D. Olivares, "Influencia de Fino y Humedad en Flujo Gravitacional Confinado," Universidad de Chile, 2014.
- [23] R. Gómez, R. Castro, and D. Olivares, "Use of experiments to quantify the flow-ability of caved rock for block caving," in *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BLOCK AND SUBLEVEL CAVING*, 2014, pp. 299–306.
- [24] L. Dorador, "Estimación de Densidad de Materiales Quebrados en Minería de Hundimiento (Block/Panel Caving)," *50 Congr. SOCHIGE*, no. December, 2018.
- [25] G. Esterhuizen, L. Rachmad, a. Potapov, and L. Nordell, "Investigation of swell factor in a block cave draw column," *MassMin*, no. August, pp. 22–25, 2004.
- [26] M. E. Pierce, "A MODEL FOR GRAVITY FLOW OF FRAGMENTED ROCK IN BLOCK CAVING MINES Statement of Contributions to Jointly Authored Works Contained in the Thesis," *October*, no. August, 2009.
- [27] R. L. Castro, M. A. Fuenzalida, and F. Lund, "Experimental study of gravity flow under confined conditions," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 67, pp. 164–169, 2014.
- [28] G. B. Sharrock and S. Saydam, "A Review of Particle Percolation in Mining," no. 1999, 2008.
- [29] Z. Song, W. Wei, and J. Zhang, "Numerical investigation of effect of particle shape on isolated extracted zone (IEZ) in block caving," *Arab. J. Geosci.*, vol. 11, no. 12, pp. 1–15, 2018.
- [30] H. Sun, Y. Gao, D. Elmo, A. Jin, S. Wu, and L. Dorador, "A Study of Gravity Flow Based on the Upside-Down Drop Shape Theory and Considering Rock Shape and Breakage," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 52, no. 3, pp. 881–893, 2019.
- [31] A. Jin, H. Sun, S. Wu, and Y. Gao, "Confirmation of the upside-down drop shape theory in gravity flow and development of a new empirical equation to calculate the shape," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 92, no. April 2016, pp. 91–98, 2017.
- [32] C. R. Armijo F, Ibarra S, "Experimental study of fines migration for caving mines," *Caving*, pp. 356–362, 2014.
- [33] M. H. Cooke, J. Bridgwater, and A. M. Scott, "Interparticle percolation: lateral and axial diffusion coefficients," *Powder Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 183–193, 1978.

- [34] H. Langhaar, "Dimensional Analysis and Theory of Models," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 1, no. 9, pp. 1689–1699, 1951.
- [35] T. Pöschel and T. Salueña, Clara, Schwager, "Scaling properties of granular materials ~," vol. 64, pp. 1–4, 2001.
- [36] R. L. Castro, L. Orellana, and M. Pineda, "Physical Modelling as an Engineering Tool for Mining: Theory and Practice," *Massmin*, 2012.
- [37] R. Kvapil, *Sublevel Caving*, 2 edición. SME mining engineering handbook, 1992.
- [38] D. H. Heslop, T. Glen ; Laubscher, "Draw Control in Caving Operations on Southern African Chrsotile Asbestos Mines," 1981.
- [39] G. Power, "Modelling granular flow in caving mines:large scale physical modeling and full scale experiments," University of Queensland, Australia, 2004.
- [40] A. Susaeta, "Theory of gravity flow Part 1," 2004.
- [41] Y. Sanchez, "Determinación y caracterización de las zonas de extracción en un flujo gravitacional de material granular fino en presencia de humedad," Universidad de Chile, 2017.
- [42] O. D. Cundall, P. A., Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies," 1979.
- [43] D. Diering, T;Ritcher,0;Villa, "BLOCK CAVE PRODUCTION SCHEDULING USING PCBC," 2010.
- [44] T. Diering, "PC-BC: A Block Cave Design and Draw Control System," in *Massmine*, 2000, p. 5.
- [45] D. Villa, "Presentación PC-BC Training version 6.12," in *GEMCOM*, 2007.
- [46] F. Arriagada, "Secuenciamiento optimizado considerando regla de mezcla," Universidad de Chile, 2015.
- [47] R. M. Nedderman and U. Tüzün, "A kinematic model for the flow of granular materials," *Powder Technol.*, vol. 22, no. 2, pp. 243–253, 1979.
- [48] R. M. Nedderman, "The use of the kinematic model to predict the development of the stagnant zone boundary in the batch discharge of a bunker," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 50, no. 6, pp. 959–965, 1995.
- [49] F. Melo, F. Vivanco, C. Fuentes, and V. Apablaza, "On drawbody shapes: From Bergmark-Roos to kinematic models," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 44, no. 1, pp. 77–86, 2007.
- [50] M. E. Kuchta, "A revised form of the bergmark-roos equation for describing the gravity flow of broken rock," *Miner. Resour. Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 349–360, 2002.
- [51] W. H. Gibson, "Stochastic Models for Gravity Flow : Numerical Considerations," no. June, pp. 1–10, 2014.
- [52] W. W. Mullins, "Stochastic theory of particle flow under gravity," *J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 2, pp. 665–678, 1972.
- [53] G. W. Baxter and R. P. Behringer, "Cellular automata models for the flow of granular

- materials,” *Phys. D Nonlinear Phenom.*, vol. 51, no. 1–3, pp. 465–471, 1991.
- [54] M. Alfaro *et al.*, “Predictive models for gravitational flow,” no. August, pp. 22–25, 2004.
- [55] G. Sharrock, D. A. Beck, G. Booth, and M. Sandy, “Simulating gravity flow in sub-level caving with cellular automata,” *Proc. MassMin*, no. August, pp. 22–25, 2004.
- [56] G. B. Sharrock, D. A. Beck, G. W. Capes, and I. Brunton, “Applying coupled Newtonian Cellular Automata -Discontinuum Finite Element models to simulate propagation of Ridgeway Deeps Block Cave,” *Massmin*, 2012.
- [57] R. Castro and R. Trueman, “An experimental review and simulations of gravity flow in coarse materials for block / panel caving,” no. June, 2008.
- [58] D. N. O. BRÛLÉ, “Experimental Characterization of the Flowability of Material in Block/Panel Caving,” 2016.
- [59] M. Fuentes, “Calibración y desarrollo de Flowsim mediante la utilización de trazadores inteligentes,” 2015.
- [60] R. Castro, L. Arancibia, D. Guzman, and J. Henriquez, “Experiments and simulation of gravity flow in block caving through FlowSim,” pp. 313–322, 2018.
- [61] L. Dorador, “Experimental investigation of the effect of broken ore properties on secondary fragmentation during block caving,” THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, 2016.



ANEXOS:

Anexo I:FlowmarkIII_Código Python

```
from searchvoids import search
from schvoid import search2
from random import random
from BCCM import fragmentation
import numpy as np
import math as mt
from time import time
from itertools import repeat
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.colors
from MovementZone import geometry
from mvzon2 import geometry
from mvzon2 import geometry2
from mv3 import geometryx
from mv3 import geometry2x
from color import col
from cotal1 import cota2
from cotal1 import cota3
from cotal1 import cota4
from codex2 import rebloqueo
from BCCM2 import fragmentation2
from BCCM import fragmentation
from VLOAD import vstress
import numpy as np
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import cm
#import imageio
#genera el flujo de celdas vacias
#estados 0:fijo 1:vacio 2:en movimiento 3:pueden moverse (4:finos pueden moverse)
def draw1(bmodel,PE,dcell,ancho,largo,n,m,mvc,extractions,comminution,simula):
#def draw(bmodel,dcell,extractions,comminution,mposic,mpossc,void2):
#distancias celdas superiores
    d1x=dcell[0]
    d1y=dcell[1]
    d1z=dcell[2]
    size = [2.85, 1.59, 1.27, 0.65, 0.3]
    FU =[1.0, 0.91, 0.78, 0.22, 0.05]
    size2=size*len(bmodel)
    FU2=[FU]*len(bmodel)
    FU3=FU2
    d2xz = mt.sqrt((d1x*d1x)+(d1z*d1z))
    d2xy = mt.sqrt((d1x*d1x)+(d1y*d1y))
    d2yz = mt.sqrt((d1y*d1y)+(d1z*d1z))
    d3 = mt.sqrt((d1x*d1x)+(d1y*d1y)+(d1z*d1z))
    x = list(set(bmodel[:,0]/d1x))
    y = list(set(bmodel[:,1]/d1y))
    z = list(set(bmodel[:,2]/d1z))
    a1 = 1
    b1 = len(x)
    c1 = len(z)*b1
```




```

cc2=0
# n=f(d) m =f(d50)
#n = 2
#m = 10
#n de vacios min mvc+1
#probabilidad
h=max(bmodel[:,1])
ul=0
void8=np.zeros((len(bmodel),1))
p1 = 0.2/2.5
p2 = 0.3/2.5
p3 = p1
p4 = p2
p5 = 0.5/2.5
p6 = p2
p7 = p1
p8 = p2
p9 = p1
p01=p1
p02=p2
p03=p3
p04=p4
p05=p5
p06=p6
p07=p7
p08=p8
p09=p9
r = 0
k=0
eee2=0
eee3=0
d12=[d3,d2xy,d3,d2yz,d1y,d2yz,d3,d2xy,d3]
#masafino = 0
ext = extractions
void = 0
mpp=list(range(0,len(bmodel)))
mposic = np.zeros((len(bmodel),8),dtype=int)#bloques = cota
mpossic = np.zeros((len(bmodel),9),dtype=int)#bloques > cota
PEx=int(PE[0][0]/d1x)
PEy=int(PE[0][1]/d1y)
PEz=int(PE[0][2]/d1z)
tp1=int(largo/d1z)
tp2=int(ancho/d1x)
c=1
d=4
perten=-99*np.ones((len(bmodel),1))
kk0x=list(range(PEx,PEx+tp2))
kk0y=list(range(PEy,PEy+2))
kk0z=list(range(PEz,PEz+tp1))
print(kk0x, kk0y, kk0z)
kk0=[[0,0,0]]*len(kk0x)*len(kk0y)*len(kk0z)
kk02=[0]*len(kk0)
contador=0
pmpx=[max(kk0x),min(kk0x)]
pmpz=[max(kk0z),min(kk0z)]
iezi=[-99]*len(bmodel)
for kk in range(len(kk0y)):
    for ll in range(len(kk0x)):

```



```

        for zzz in range(len(kk0z)):
            kk0[contador]=[kk0x[l1],kk0y[kk],kk0z[zzz]]
            kk02[contador]=a1*kk0x[l1]+c1*kk0y[kk]+b1*kk0z[zzz]
            iezi[kk02[contador]]=1
            contador=contador+1
print(len(kk02))
void2= np.array(sorted(kk02))
void2m=kk0
extraido=[-99]*(len(void2)*ext+0)
extraido3=np.array(np.zeros((1,9)))
leyy=[-99]*(len(void2)*ext+0)
void9=void8
perten[void2]=1*np.ones((len(void2),1))
abcdd=0
abcdl=0
th=0
tiez=0
for ij in range(1,len(PE)):
    PEx=int(PE[ij][0]/d1x)
    PEy=int(PE[ij][1]/d1y)
    PEz=int(PE[ij][2]/d1z)
    kk0x=list(range(PEx,PEx+tp2))
    kk0y=list(range(PEy,PEy+2))
    kk0z=list(range(PEz,PEz+tp1))
    print(kk0x,kk0y,kk0z)
    kk0=[0,0,0]*len(kk0x)*len(kk0y)*len(kk0z)
    kk02=[0]*len(kk0)
    contador=0
    pmpx=[max(kk0x),min(kk0x)]
    pmpz=[max(kk0z),min(kk0z)]
    for kk in range(len(kk0y)):
        for l1 in range(len(kk0x)):
            for zzz in range(len(kk0z)):
                kk0[contador]=[kk0x[l1],kk0y[kk],kk0z[zzz]]
                kk02[contador]=a1*kk0x[l1]+c1*kk0y[kk]+b1*kk0z[zzz]
                contador=contador+1

#print(perten[kk02]),#,bmodel[kk02,:])
b=np.array(kk02)
bb=np.array(kk0)
perten[kk02]=(ij+1)*np.ones((len(kk02),1))
#print(kk02)
void2=np.concatenate((void2,b),axis=0)
void2m=np.concatenate((void2m,bb),axis=0)
dilo=list(range(len(bmodel)))
dilo2=dilo
leyex=bmodel[:,8]
leyex2=bmodel[:,8]
frag=bmodel[:,4]
frag2=bmodel[:,4]
extraido[0:len(void2)]=void2
leyy[0:len(void2)]=bmodel[void2,8]

eee=0
void5=void2
void3=void2
void4=np.array(void2)
bmodel[void2,3]=np.ones((1,len(void2)))

```

```

bmodel[:,9]=perten[:,0]
iiii=1
possc=[0]*9
posic=[0]*8
void6=[-1]*2
print(void2)
audio=0
audio2=0
void55=np.array(void5)
bmodel[:,9]=perten[:,0]
abcd3=0
abccd2=0

for v in range(len(void2)):
    d1d1=[-1,0,1]
    conta=0
    conta2=0
    for ab in d1d1:
        for abc in d1d1:
possc[conta]=(void2m[v][0]+ab)*1+c1*(void2m[v][1]+1)+b1*(void2m[v][2]+abc)
        if (void2m[v][0]+ab)>max(x) or\
            (void2m[v][0]+ab)<min(x) or\
            (void2m[v][1]+1)>max(y) or\
            (void2m[v][1]+1)<min(y) or\
            (void2m[v][2]+abc)>max(z) or\
            (void2m[v][2]+abc)<min(z):
            possc[conta]=-1
        conta=conta+1
        if ab==0 and abc ==0:
            conta2=conta2-1
        else:
posic[conta2]=(void2m[v][0]+ab)*1+c1*(void2m[v][1])+b1*(void2m[v][2]+abc)
        if (void2m[v][0]+ab)>max(x) or\
            (void2m[v][0]+ab)<min(x) or\
            (void2m[v][2]+abc)>max(z) or\
            (void2m[v][2]+abc)<min(z):
            posic[conta2]=-1
        conta2=conta2+1
    mpossc[void2[v],:]=possc
    mposic[void2[v],:]=posic
    #print(void2[v],mpossc[void2[v]])
t1= time()
m22=[1000]

for i in repeat(None,ext-1):
    p=0
    v=0
    a = np.array(void5)
    b = np.array(void3)
    void4=np.concatenate((void4,b),axis=0)
    void4=sorted(list(set(void4)))
    void2=np.concatenate((a, b), axis=0)
    void2=sorted(list(set(void2)))
    m22=[None]*len(void2)
    void3=void2
    bmodel[void2,3]=np.ones((1,len(void2)))

```

```

v1=0
eee2=eee
while v1<len(void2):
    d1d1=[-1,0,1]
    conta=0
    conta2=0
    for ab in d1d1:
        for abc in d1d1:
            mm=void2[v1]
            aic2=mm
            v22m=[int(mm-c1*int(mm/c1)-\
b1*(int((mm-c1*int(mm/c1))/b1))),\
int(mm/c1),int((mm-c1*int(mm/c1))/b1)]

possc[conta]=(v22m[0]+ab)*1+c1*(v22m[1]+1)+b1*(v22m[2]+abc)
if possc[conta]>len(bmodel) or (v22m[0]+ab)>max(x) or\
(v22m[0]+ab)<min(x) or\
(v22m[1]+1)>max(y) or (v22m[1]+1)<min(y) or\
(v22m[2]+abc)>max(z) or\
(v22m[2]+abc)<min(z):
    possc[conta]=-1
conta=conta+1
if ab==0 and abc ==0:
    conta2=conta2-1
else:
    posic[conta2]=(v22m[0]+ab)*1+\
c1*(v22m[1])+b1*(v22m[2]+abc)
if possc[conta2]>len(bmodel) or\
(v22m[0]+ab)>max(x) or\
(v22m[0]+ab)<min(x) or\
(v22m[2]+abc)>max(z) or (v22m[2]+abc)<min(z):
    posic[conta2]=-1
conta2=conta2+1

r=0
aux = search2(bmodel, possc, posic)
mv=aux[0]
m22[v1]=mv[0]
pos=aux[1]
if bmodel[void2[v1],3] == 1 and mv[0] > mvc:
    #print(mv[0],mvc)
    audio2=audio2+1
    if mv[1] + mv[2] + mv[3] + mv[4] + mv[5] + mv[6] + mv[7] + \
mv[8] + mv[9] == 9:
        #print('hola')
        r=99
    pass
if mv[1] * mv[2] * mv[3] * mv[4] * mv[5] * mv[6] * \
mv[7] * mv[8] * mv[9] == 0 :
    denominador = (d12[0]**-n)+(d12[1]**-n)+(d12[2]**-n)+\
(d12[3]**-n)+(d12[4]**-n)+\
(d12[5]**-n)+(d12[6]**-n)+(d12[7]**-n)+(d12[8]**-n)
    #print('---')
    p1 = (d12[0]**-n) / denominador
    #print(p1)
    p2 = (d12[1]**-n) / denominador
    #print(p2)
    p3 = (d12[2]**-n) / denominador
    #print(p3)

```

```

p4 = (d12[3]**-n) / denominador
#print(p4)
p5 = (d12[4]**-n) / denominador
#print(p5)
p6 = (d12[5]**-n) / denominador
#print(p6)
p7 = (d12[6]**-n) / denominador
#print(p7)
p8 = (d12[7]**-n) / denominador
#print(p8)
p9 = (d12[8]**-n) / denominador
#print(p9)
p01=p1
p02=p2
p03=p3
p04=p4
p05=p5
p06=p6
p07=p7
p08=p8
p09=p9
#print('----')
zero=np.ones((9,1))
for im in range(1,10):
    if pos[im-1]==-1 or mv[im]==1 or zero[im-1]==0 :
        if im==1:
            p1=0
        if im==2:
            p2=0
        if im==3:
            p3=0
        if im==4:
            p4=0
        if im==5:
            p5=0
        if im==6:
            p6=0
        if im==7:
            p7=0
        if im==8:
            p8=0
        if im==9:
            p9=0
p12=[0,p1,p1+p2,p1+p2+p3,p1+p2+p3+p4,p1+p2+p3+p4+p5,\
p1+p2+p3+p4+p5+p6,\
p1+p2+p3+p4+p5+p6+p7,p1+p2+p3+p4+p5+p6+p7+p8,\
p1+p2+p3+p4+p5+p6+p7+p8+p9]
#zero=1
if r<1:
    p12=list(np.array(p12)/p12[9])
#print(p12)
p=random()
for ii in range(9):
    if r < 1.0:
        if p12[9]==0:
            print('hola',p12[9],p12,mv)
        if p < p12[ii+1] and p>= p12[ii]:
            dilo[void2[v1]]=dilo2[pos[ii]]

```



```

perten[pos[ii]]=perten[void2[v1]]
dilo2[pos[ii]]=void2[v1]
leyex[void2[v1]]=leyex2[pos[ii]]
leyex2[pos[ii]]=-99
for alau in void5:
    if void2[v1]==alau:
        lp=np.array([[dilo[void2[v1]]]])
        iezi[int(lp)]=1
        void55=np.concatenate((void55,lp),axis=0)
        void55=list(set(void55))
bmodel[void2[v1],3] = 2
bmodel[pos[ii],3] = 1
void3[v1]=pos[ii]
frag[void2[v1]]=frag2[pos[ii]]
frag2[pos[ii]]=-99

p1=p01
p2=p02
p3=p03
p4=p04
p5=p05
p6=p06
p7=p07
p8=p08
p9=p09
v1=v1+1
eee4=eee2+1
b = np.array(void3)
boid4=np.concatenate((void4,b),axis=0)
boid4=sorted(list(set(boid4)))
void8[boid4]=1+void8[boid4]
iiii=iiii+1
flowmodel=bmodel
flowmodel[:,8]=leyex
flowmodel[:,4]=frag
iii=0
t2= time()-t1
print(t2)
plt.show()
return flowmodel,void4

```



Anexos II Código schvoid.py

```

import numpy as np
def search2(model,position,positionic):
    var2=0
    nv=[1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5]
    positionic=[n for n in positionic if n>=0]
    s1=[1 for n in range(0,len(positionic)) if model[round(positionic[n]),3] ==
1]
    nv[0]=nv[0]+len(s1)
    s2=[n for n in range(0,len(position)) if model[round(position[n]),3] == 1]
    nv[0]=nv[0]+len(s2)
    nv[slice(10,20)]=model[position,4]
    for var2 in s2:
        if position[var2]>=0:
            nv[var2+1]=1
            nv[var2+10]=model[position[var2],4]

```

```

    else:
        print('holo')
    return [nv,position]

```

Anexos III Código mv3.py

```

import numpy as np

#lee geometria de zona de movimiento, lee modelo de bloques y tamaño(d) de
bloques
#rh: radio hidraulico para una geometria circular

def geometryx(model, kk, d, px, pz):
    q=0
    x=px
    z=pz
    x1=px
    x2=x+d[0]
    z1=z
    z2=z+d[2]
    h=d[1]
    height=h
    #kk=[ii for ii in range(0,len(model)) if model[ii,3]==2 or model[ii,3]==1]
    hmz=max(model[kk,1])-min(model[kk,1])+d[1]
    #hmz2=hmz+min(model[kk,1])
    #print(hmz2)
    ii=[iii for iii in kk if model[iii,1]<=hmz*0.5+d[1] and
model[iii,1]>=hmz*0.5-d[1]]
    #print(ii)
    #ii=kk
    widthx=max(model[ii,0])-min(model[ii,0])+d[0]
    widthz=max(model[ii,2])-min(model[ii,2])+d[2]
    return [hmz,widthx,widthz]
def geometry2x(model, kk, d, PE):
    #w=list(PE)
    #for i in range(len(PE)):
    px=PE[0]
    pz=PE[2]
    w=geometryx(model, kk, d, px, pz)
    return w

```

Anexo IV: Ubicación de un bloque dentro del modelo de bloques

Sea el modelo de bloques una matriz en la cual su primera columna contiene filas con todos los valores que puede tomar “x”, luego la segunda columna posee filas en las cuales el valor de “y” cambia cada vez que se repita el n° de posibles valores de x y finalmente la tercera columna posea filas cuyo valor de “z” cambia cada (n° posibles valores de x)* (n° posibles valores de y). Entonces se tiene:

$$N^{\circ} \text{ de Fila} = x + b1y + c1z$$

$$\text{Donde } b1 = n^{\circ} \text{ de valores de } x \text{ y } c1 = (n^{\circ} \text{ de valores de } y) * b1$$

De igual forma se pueden obtener las coordenadas de cada bloque si se conoce el N° de Fila, mediante las siguientes ecuaciones:

$$z = \left[\frac{\text{fila}}{c1} \right]$$

$$y = \left[\frac{\text{fila} - c1 * z}{b1} \right]$$

$$x = \text{fila} - b1y - c1z$$

Tabla 11 Modelo de bloques "M1"

N° de Fila	x	y	z
0	0	0	0
1	1	0	0
2	0	1	0
3	1	1	0
4	0	0	1
5	1	0	1
6	0	1	1
7	1	1	1

Ejemplo de Calculo 1:

Se realizará el cálculo de N° de fila para bloque con coordenadas [1, 0,1] y un bloque ubicado en la fila 6, pertenecientes al modelo de bloques presentado en la tabla 2:

$$N^{\circ} \text{ de Fila} = x + b1y + c1z$$

Para el caso de M1, “x” toma valores de 0 y 1, por lo que se tiene que $b1=2$, de igual manera “y” toma valores entre 0 y 1, lo que resulta en un $c1= 2*b1 =4$.

Luego aplicando la ecuación para el bloque con coordenadas [1, 0, 1] se obtiene:

$$N^{\circ} \text{ de Fila} = 1 + 2 * 0 + 4 * 1 = 5$$

Por otro lado para el cálculo de coordenadas en función del número de fila se tiene lo siguiente, para el bloque ubicado en la fila 6

$$z = \left[\frac{\text{fila}}{c1} \right] \rightarrow \left[\frac{6}{4} \right] \rightarrow 1$$

$$y = \left[\frac{\text{fila} - c1 * z}{b1} \right] \rightarrow \left[\frac{6 - 4}{2} \right] \rightarrow 1$$

$$x = \text{fila} - b1y - c1z \rightarrow 6 - 2 - 4 \rightarrow 0$$

Finalmente fila 6 = [0, 1,1]



Anexos V Tiempos de Simulación

Se estudió el desempeño del código actual considerando un modelo de bloques con 158661 celdas, considerando n entre $[0.5, 4]$, restricción de vacíos “mvc” de $[1, 2, 3]$ y extracciones entre $[0-1000]$.

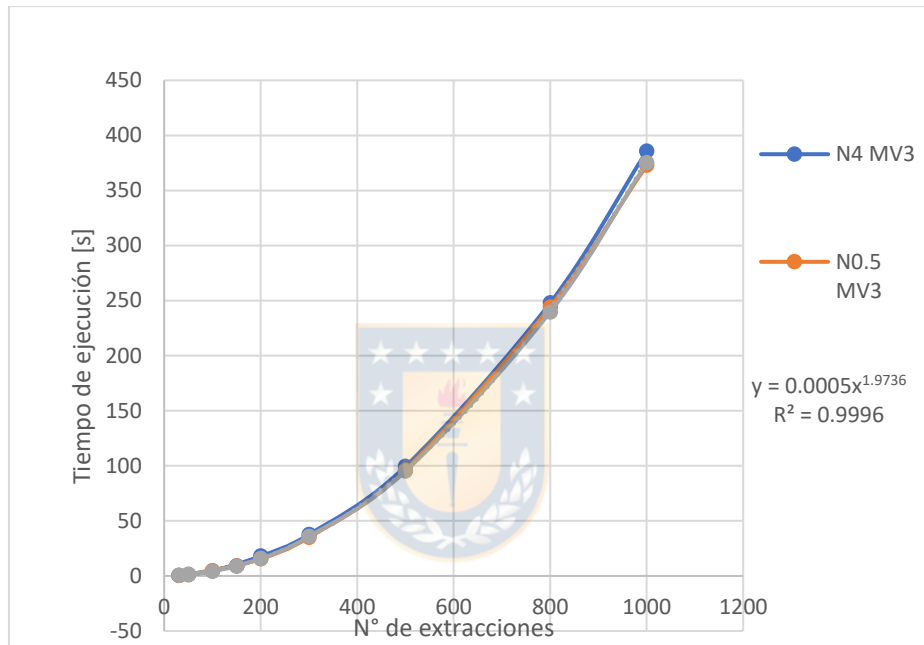


Ilustración 35 Tiempo de ejecución vs N° de extracciones

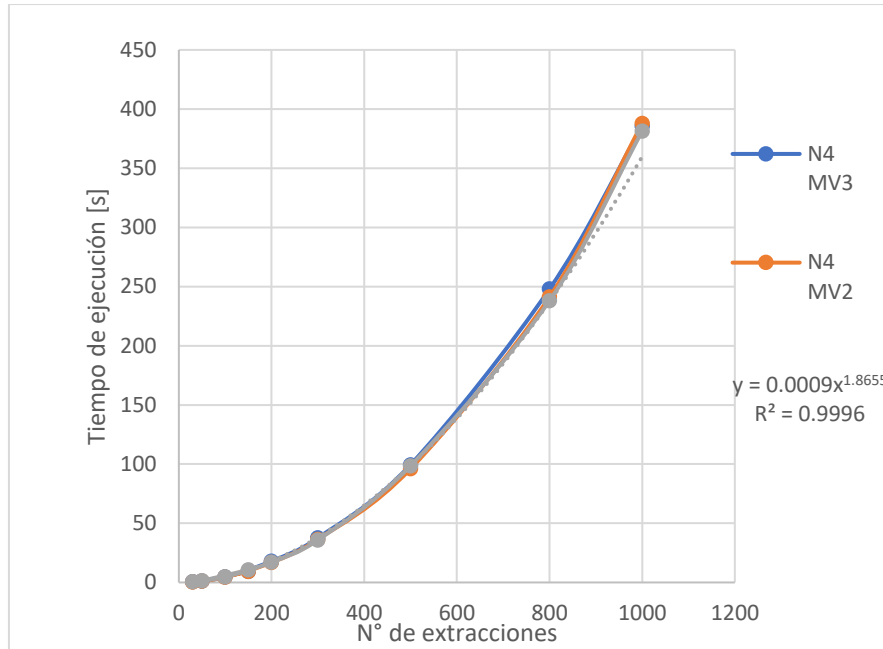


Ilustración 36 Tiempo de ejecución modificando el mv(N° de vacíos)

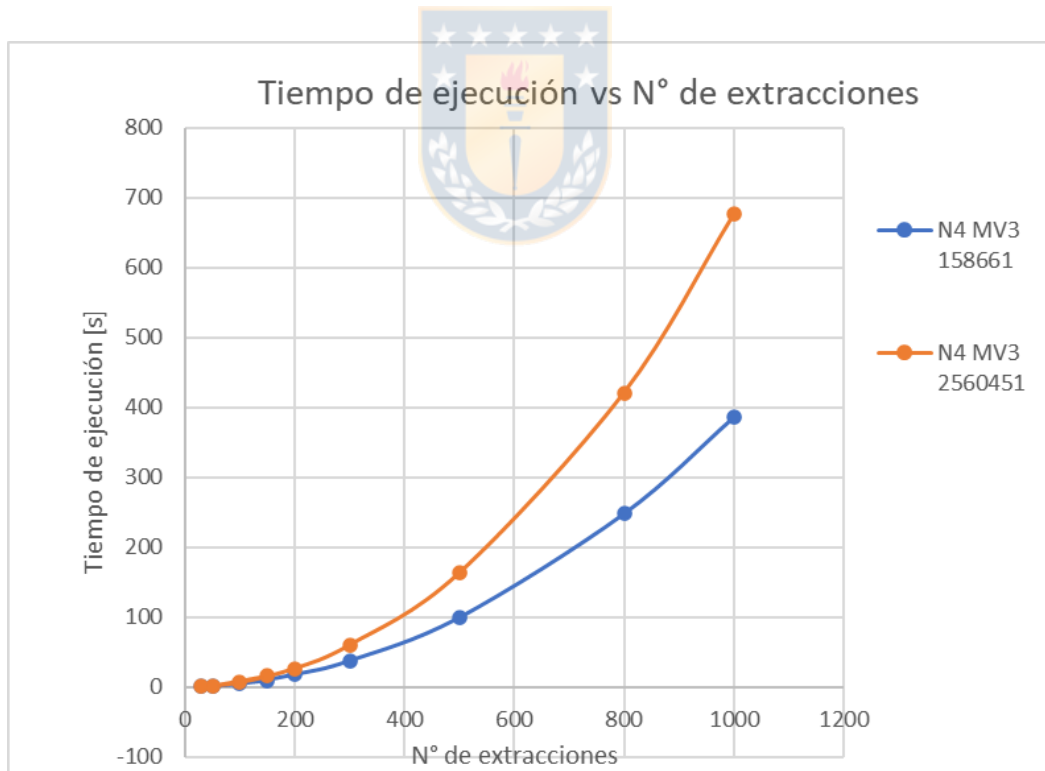


Ilustración 37 Tiempo de ejecución en función del tamaño del modelo de bloques

Anexo VI Resultados Adicionales

Entre otras de las propiedades del código implementado, se encuentran la simulación de la elipsoide de extracción y de las leyes extraídas.

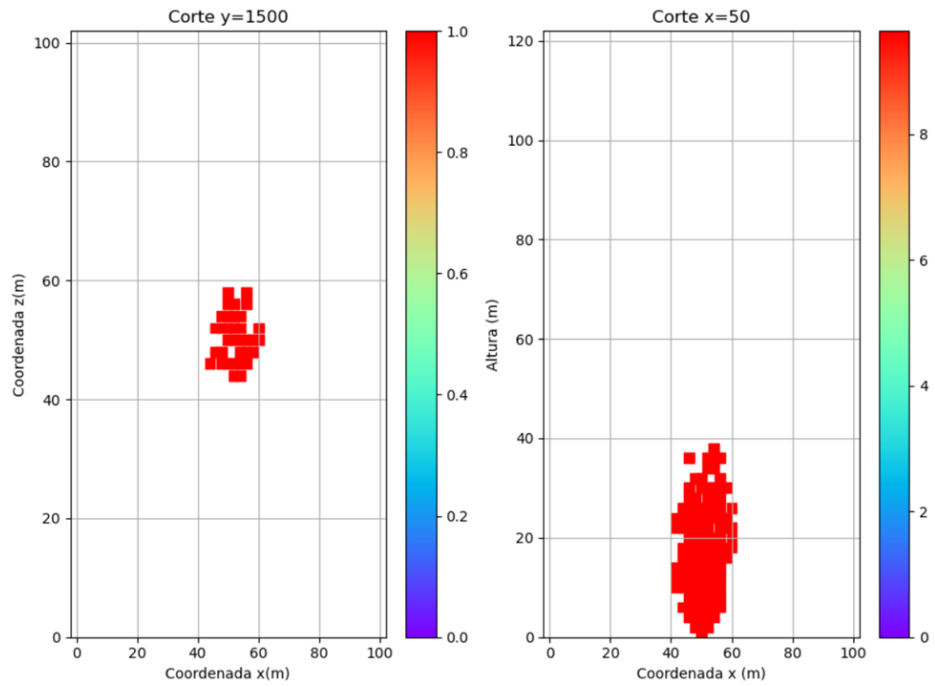


Ilustración 38 Elipsoide de extracción



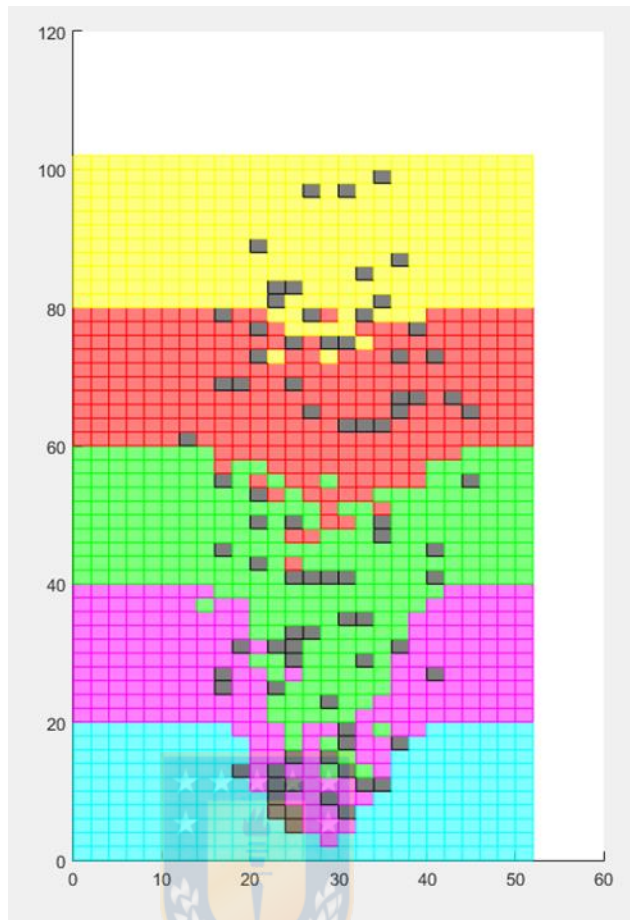


Ilustración 39 Mezcla de material, cada color representa una material con distinta ley, mientras que los cubos negros representan los vacíos.

Por otro lado se estudió el comportamiento de los vacíos dentro del elipsoide de movimiento sin llegar a resultados concluyentes.

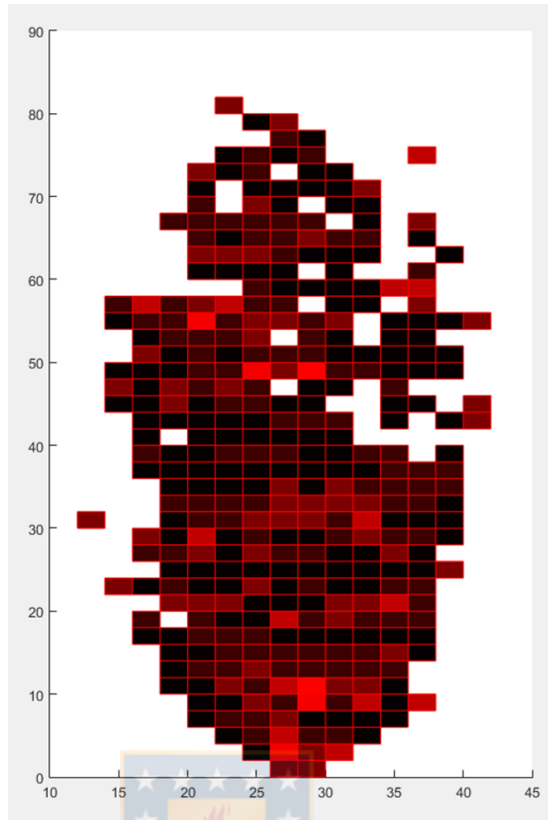


Ilustración 40 Distribución de vacíos, el color rojo indica la cantidad de vacíos presentes en esa cota, mientras más rojo menor el n° de vacíos

Anexo VII: Datos de Calibración con la ecuación de Nedderman

	N = 1 / MV>1		N = 0.5 / MV>1		N = 2 / MV>1		N = 3 / MV>1	
Extracciones	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]
5	13.6	14.4	13.2	14	13.6	14	12.8	14
10	16.4	20.8	16.4	20.8	18.4	20.4	16	22.8
30	16.4	42.4	28.4	43.2	26	45.2	24.8	50.8
50	31.6	49	34	50	32	64.8	28.8	68
80	38	87.6	38.8	83.2	36.4	86.8	34.8	92.4
100	40	96.8	40	96	39.2	100	37.6	100
	N = 1 / MV>2		N = 0.5 / MV>2		N = 2 / MV>2		N = 3 / MV>2	
Extracciones	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]
5	12.4	11.6	12.4	11.6	12.8	12.4	11.6	12.8
10	15.2	16.8	13.6	15.6	15.2	18	13.6	17.6
30	21.6	29.2	21.6	29.2	20.4	30.8	18.8	31.2
50	25.6	40.8	26.8	42.4	26.8	42.4	23.2	45.2
80	30	57.6	30.4	56.8	29.6	60	28.4	65.2
100	32	66.4	32.8	64.4	32.4	70	30.8	73.6
	N = 4 / MV>2		N = 2 / MV>3		N = 3 / MV>3		N = 4 / MV>3	
Extracciones	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]
5	10.8	12.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.4	11.2
10	12.4	17.2	14	16	13.2	16.4	13.2	18.4
30	18.4	34.4	19	32.4	19.2	31.6	17.6	36.4
50	22	47.6	23.2	42	22.4	43.6	20.8	46.4
80	26.4	69.2	26.6	54	26	58	24.4	63.2
100	27.8	83.2	26.8	60	28.4	66.8	26	74.8

Tabla 12 Calibración con ecuación de Nedderman

Anexo VIII: Influencia de d_{50} y el tamaño de celda en la calibración

Tabla 13 Calibración para diferentes tamaños de celda parte I

Celda de 0.5m	$d_{50}=1[m]$		$d_{50}=0.5[m]$		$d_{50}=0.75[m]$	
	H/ d_{50}	W/ d_{50}	H/ d_{50}	W/ d_{50}	H/ d_{50}	W/ d_{50}
ext 5	3.5	6	7	12	9.33	16.00
ext 10	6	7	12	14	16.00	18.67
ext 20	10.5	7.5	21	15	28.00	20.00
ext 30	13.5	9.5	27	19	36.00	25.33
ext50	20	10.5	40	21	53.33	28.00
ext60	23.5	10.5	47	21	62.67	28.00
ext80	28.5	12	57	24	76.00	32.00
ext100	34	12.5	68	25	90.67	33.33
ext120	37.5	13	75	26	100.00	34.67
ext150	43.5	14	87	28	116.00	37.33
ext180	51	14	102	28	136.00	37.33
ext200	51	15	102	30	136.00	40.00
ext250	60.5	15.5	121	31	161.33	41.33
ext300	70.5	16	141	32	188.00	42.67
ext350	76	17.5	152	35	202.67	46.67
ext400	78.5	18	157	36	209.33	48.00
ext450	85	18.5	170	37	226.67	49.33
ext500	92.5	19.5	185	39	246.67	52.00
Celda de 1m	H/ d_{50}	W/ d_{50}	H/ d_{50}	W/ d_{50}	H/ d_{50}	W/ d_{50}
ext5	7	7	14	14	18.67	18.67
ext10	11	11	22	22	29.33	29.33
ext20	19	12	38	24	50.67	32.00
ext30	22	14	44	28	58.67	37.33
ext50	37	16	74	32	98.67	42.67
ext60	38	18	76	36	101.33	48.00
ext80	45	19	90	38	120.00	50.67
ext100	55	21	110	42	146.67	56.00
ext120	62	22	124	44	165.33	58.67
ext150	65	22	130	44	173.33	58.67
ext180	74	24	148	48	197.33	64.00
ext200	76	25	152	50	202.67	66.67
ext250	89	26	178	52	237.33	69.33
Celda de 2m	H/ d_{50}	W/ d_{50}	H/ d_{50}	W/ d_{50}	H/ d_{50}	W/ d_{50}

ext5	12	12	24	24	32.00	32.00
ext10	20	14	40	28	53.33	37.33
ext20	32	20	64	40	85.33	53.33
ext30	40	24	80	48	106.67	64.00
ext50	56	28	112	56	149.33	74.67
ext60	64	28	128	56	170.67	74.67
ext80	72	34	144	68	192.00	90.67
ext100	76	34	152	68	202.67	90.67
ext120	82	34	164	68	218.67	90.67
Celda de 1.5m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext5	9	7.5	18	15	24	20
ext10	15	9	30	18	40	24
ext20	21	13.5	42	27	56	36
ext30	30	18	60	36	80	48
ext50	37.5	21	75	42	100	56
ext60	43.5	21	87	42	116	56
ext80	51	22.5	102	45	136	60
ext100	61.5	25.5	123	51	164	68
ext120	66	27	132	54	176	72
ext150	76.5	33	153	66	204	88
ext180	82.5	33	165	66	220	88
ext200	82.5	33	165	66	220	88
Celda de 3m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext5	15	15	30	30	40	40
ext10	18	18	36	36	48	48
ext20	30	24	60	48	80	64
ext30	57	30	114	60	152	80
ext50	81	36	162	72	216	96
ext60	93	39	186	78	248	104
Celda de 3.5m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext5	21	21	42	42	56.00	56.00
ext10	31.5	28	63	56	84.00	74.67
ext20	56	35	112	70	149.33	93.33
ext30	73.5	42	147	84	196.00	112.00
ext50	94	49	188	98	250.67	130.67
ext60	98	49	196	98	261.33	130.67
Celda de 4m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext5	20	24	40	48	53.33	64.00

ext10	36	32	72	64	96.00	85.33
ext20	60	40	120	80	160.00	106.67
ext30	80	44	160	88	213.33	117.33

Tabla 14 Calibración para diferentes tamaños de celda parte II

	d50=1.5[m]		d50=1.25[m]	
Celda de 0.5m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext 5	2.33	4.00	1.87	3.20
ext 10	4.00	4.67	3.20	3.73
ext 20	7.00	5.00	5.60	4.00
ext 30	9.00	6.33	7.20	5.07
ext50	13.33	7.00	10.67	5.60
ext60	15.67	7.00	12.53	5.60
ext80	19.00	8.00	15.20	6.40
ext100	22.67	8.33	18.13	6.67
ext120	25.00	8.67	20.00	6.93
ext150	29.00	9.33	23.20	7.47
ext180	34.00	9.33	27.20	7.47
ext200	34.00	10.00	27.20	8.00
ext250	40.33	10.33	32.27	8.27
ext300	47.00	10.67	37.60	8.53
ext350	50.67	11.67	40.53	9.33
ext400	52.33	12.00	41.87	9.60
ext450	56.67	12.33	45.33	9.87
ext500	61.67	13.00	49.33	10.40
Celda de 1m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext5	4.67	4.67	3.73	3.73
ext10	7.33	7.33	5.87	5.87
ext20	12.67	8.00	10.13	6.40
ext30	14.67	9.33	11.73	7.47
ext50	24.67	10.67	19.73	8.53
ext60	25.33	12.00	20.27	9.60
ext80	30.00	12.67	24.00	10.13
ext100	36.67	14.00	29.33	11.20
ext120	41.33	14.67	33.07	11.73
ext150	43.33	14.67	34.67	11.73
ext180	49.33	16.00	39.47	12.80
ext200	50.67	16.67	40.53	13.33
ext250	59.33	17.33	47.47	13.87

Celda de 2m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext5	8.00	8.00	6.40	6.40
ext10	13.33	9.33	10.67	7.47
ext20	21.33	13.33	17.07	10.67
ext30	26.67	16.00	21.33	12.80
ext50	37.33	18.67	29.87	14.93
ext60	42.67	18.67	34.13	14.93
ext80	48.00	22.67	38.40	18.13
ext100	50.67	22.67	40.53	18.13
ext120	54.67	22.67	43.73	18.13
Celda de 1.5m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext5	6	5	4.8	4
ext10	10	6	8	4.8
ext20	14	9	11.2	7.2
ext30	20	12	16	9.6
ext50	25	14	20	11.2
ext60	29	14	23.2	11.2
ext80	34	15	27.2	12
ext100	41	17	32.8	13.6
ext120	44	18	35.2	14.4
ext150	51	22	40.8	17.6
ext180	55	22	44	17.6
ext200	55	22	44	17.6
Celda de 3m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext5	10	10	8	8
ext10	12	12	9.6	9.6
ext20	20	16	16	12.8
ext30	38	20	30.4	16
ext50	54	24	43.2	19.2
ext60	62	26	49.6	20.8
Celda de 3.5m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext5	14.00	14.00	11.20	11.20
ext10	21.00	18.67	16.80	14.93
ext20	37.33	23.33	29.87	18.67
ext30	49.00	28.00	39.20	22.40
ext50	62.67	32.67	50.13	26.13
ext60	65.33	32.67	52.27	26.13
Celda de 4m	H/d ₅₀	W/d ₅₀	H/d ₅₀	W/d ₅₀
ext5	13.33	16.00	10.67	12.80
ext10	24.00	21.33	19.20	17.07

ext20	40.00	26.67	32.00	21.33
ext30	53.33	29.33	42.67	23.47

Anexo IX Altura de interacción

Tabla 15 Altura de interacción medida para distintos N y espaciamentos

N	Espaciamiento[m]	HIZ[m]
4	10	6.67
4	16	17.00
4	20	24.67
4	26	39.00
4	30	47.00
4	36	68.33
0.5	10	5.67
0.5	16	12.67
0.5	20	15.00
0.5	26	24.67
0.5	30	28.33
0.5	36	44.33
1	10	8.67
1	16	13.33
1	20	19.00
1	26	24.67
1	30	32.67
1	36	45.33
2	10	6.67
2	16	17.00
2	20	20.00
2	26	33.00
2	30	39.33
2	36	51.00
3	10	6.67
3	16	16.67
3	20	23.33
3	26	37.33
3	30	46.33
3	36	58.67
5	10	7.33
5	16	19.00
5	20	31.00
5	26	51.33
5	30	60.33
5	36	81.00

6	10	8.33
6	16	21.67
6	20	31.67
6	26	52.00
6	30	82.67
7	10	9.33
7	16	23.67
7	20	43.67
7	26	67.67
7	30	82.50
8	10	10.00
8	16	29.67
8	20	46.33
8	26	89.00
9	10	11.67
9	16	42.33
9	20	65.00
10	10	13.67
10	16	41.00
10	20	64.67



Anexo X: Interfaz gráfica

```
from tkinter import *
from tkinter import ttk
from math import *
import matplotlib.pyplot as plt
#%matplotlib qt
import numpy as np
from flowmarkIII import draw1
from tkinter import filedialog
import numpy as np

class SimVol:

    def __init__(self,window):

        # VENTANA PRINCIPAL:

        self.main_win = window
        self.main_win.state('zoomed')
        self.main_win.title('Simulador de flujo CA')

        # BARRA DE HERRAMIENTAS:

        self.toolBar = Frame(self.main_win)
        self.toolBar.pack(side = TOP, fill = X)

        Button(self.toolBar, text = 'Modelo de Bloques', command =
self.abrir_archivo) .grid(row = 0, column = 0)
        Button(self.toolBar, text = 'Puntos de Extracción(PE)' , command =
self.abrir_archivo2) .grid(row = 0, column = 1)
        Button(self.toolBar, text = 'Parámetros de simulación' , command =
self.flow2) .grid(row = 0, column = 2)

        # LIENZO DE DIBUJO:

        self.mainCanvas = Canvas(self.main_win, bg = 'white')
        self.mainCanvas.pack(fill = BOTH, expand = True)

        ### ARCHIVO ###
        # 1. Crear nuevo archivo:
        def abrir_archivo(self):
            archivo_abierto=filedialog.askopenfilename(initialdir = "/",
            title = "Seleccione archivo",filetypes = (("txt
files", "*.txt"),
            ("all files", "*..*")))
            #print(archivo_abierto)
            global blockmodel2
            blockmodel2=np.loadtxt(archivo_abierto)
            print(len(blockmodel2))
```

```

#return blockmodel2
#blockmodel2=Entry(archivo_abierto)
def abrir_archivo2(self):
    archivo_abierto=filedialog.askopenfilename(initialdir = "/",
        title = "Seleccione archivo",filetypes = (("txt
files", "*.txt"),
        ("all files", "*.*")))
    #print(archivo_abierto)
    global puntos
    puntos=np.loadtxt(archivo_abierto)

def flow2(self):

    self.flow2_win = Toplevel(self.main_win)
    self.flow2_win.title('Simulador de flujo')

    frame = LabelFrame(self.flow2_win, text = 'Parámetros: ')
    frame.grid(row = 0, column = 0, padx = 10, pady = 10)

    Label(frame, text = 'Valor') .grid(row = 1,
column = 1)
    Label(frame, text = 'Ancho PE') .grid(row = 2,column = 0,
sticky = 'W')
    Label(frame, text = 'Largo PE') .grid(row = 3,column =
0, sticky = 'W')
    Label(frame, text = 'N') .grid(row = 4,column = 0, sticky = 'W')
    Label(frame, text = 'mv') .grid(row = 5,column = 0, sticky =
'W')
    Label(frame, text = 'Cota vista en planta') .grid(row = 6,column = 0,
sticky = 'W')
    Label(frame, text = 'Tamaño de celda') .grid(row = 7,column = 0, sticky =
'W')
    Label(frame, text = 'N° de extracciones') .grid(row = 8,column = 0,
sticky = 'W')

    Label(frame, text = '[m]') .grid(row = 2,column = 2, sticky = 'W')
    Label(frame, text = '[m]') .grid(row = 3,column = 2, sticky = 'W')
    Label(frame, text = '') .grid(row = 4,column = 2, sticky = 'W')
    Label(frame, text = '') .grid(row = 5,column = 2, sticky = 'W')
    Label(frame, text = '[m]') .grid(row = 6,column = 2, sticky = 'W')
    Label(frame, text = '[m]') .grid(row = 7,column = 2, sticky = 'W')
    Label(frame, text = '') .grid(row = 8,column = 2, sticky = 'W')

    entry_Ancho = Entry(frame)
    entry_Largo = Entry(frame)
    entry_N = Entry(frame)
    entry_mv = Entry(frame)
    entry_cota= Entry(frame)
    entry_d = Entry(frame)
    entry_ext = Entry(frame)

    entry_Ancho.grid(row = 2,column = 1)
    entry_Largo.grid(row = 3,column = 1)
    entry_N.grid(row = 4,column = 1)
    entry_mv.grid(row = 5,column = 1)
    entry_cota.grid(row = 6,column = 1)
    entry_d.grid(row = 7,column = 1)

```

```

entry_ext.grid(row = 8,column = 1)

def flow(*event):
    ancho = float(entry_Ancho.get())
    largo = float(entry_Largo.get())
    n = float(entry_N.get())
    mv = float(entry_mv.get())
    cota_a1 = float(entry_cota.get())
    d1=float(entry_d.get())
    ext=int(entry_ext.get())
    print(ext)
    print(d1)
        #area:tamano de bloques
    area = 50
    #tamano bloques (m)
    densidad = 2000
    #ext = 101
    #print('ext=',ext)
    #creacion de modelo de bloques inicial
    #estados 0: fijo 1: vacio 2: en movimeinto 3: pueden moverse
    #blockmodel = np.loadtxt('mccelda3.txt')
    blockmodel=blockmodel2
    #print(blockmodel2)
    #print(len(blockmodel))
    x = blockmodel[:,0]
    y = blockmodel[:,1]
    z = blockmodel[:,2]
    h = max(y)
    l = max(x)
    w = max(z)
    #print(h,l,w)
    minx = min(x)
    miny = min(y)
    minz = min(z)
    centro = l // 2 + d1
    m=0
    PE=[list(puntos[n,:]) for n in range(len(puntos))]
    print(PE)
    #PE=[[27,0,27]]#[34,2,26]]
    d=[d1,d1,d1]
    bmodel=draw1(blockmodel,PE,d,ancho,largo,n,m,mv,ext,0,cota_a1)

    button_getCurve = Button(frame, text = 'Obtener Simulación', command =
flow)
    button_getCurve.grid(row = 9, column = 0, pady = 15)
    button_getCurve.bind('<Return>', flow)

    self.flow2_win.mainloop()

if __name__ == '__main__':
    main_win = Tk()
    simulador = SimVol(main_win)
    main_win.mainloop()

```



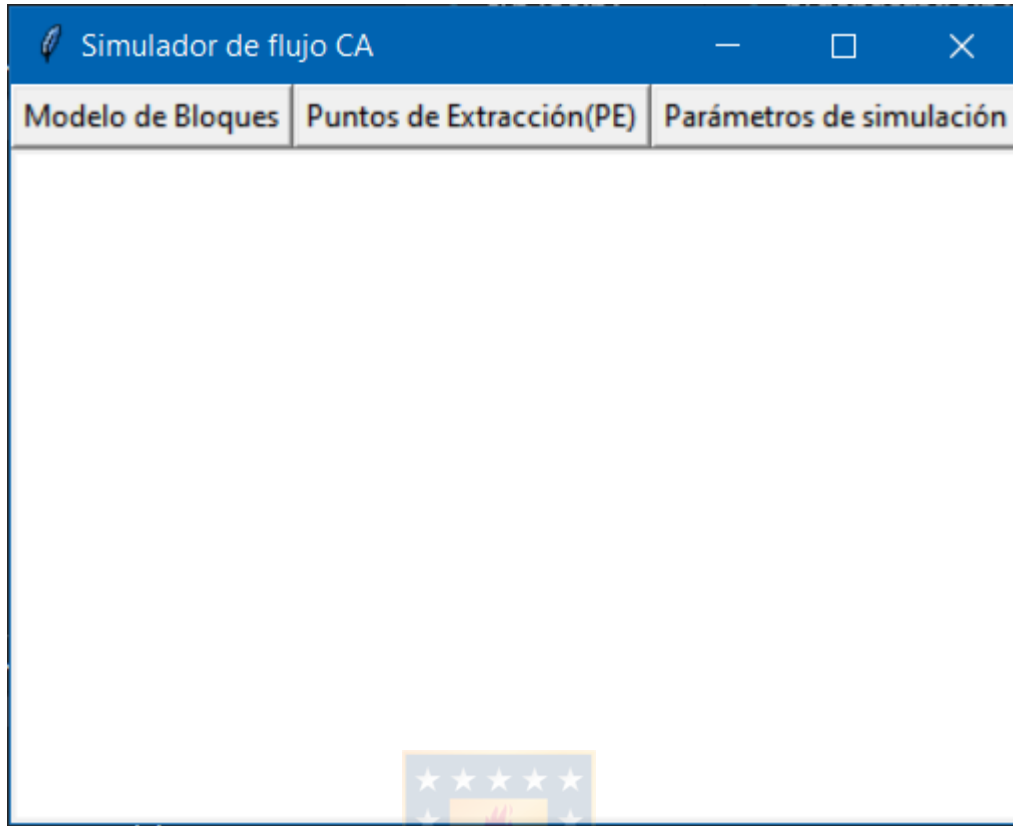


Ilustración 41 Interfaz gráfica preliminar

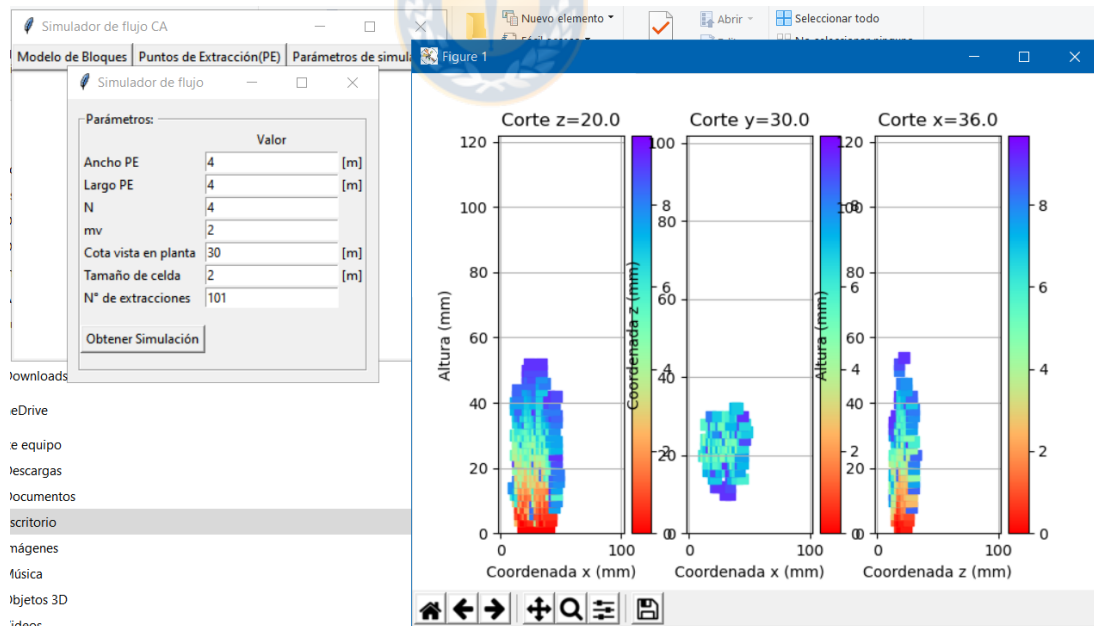


Ilustración 42 Interfaz gráfica resultados