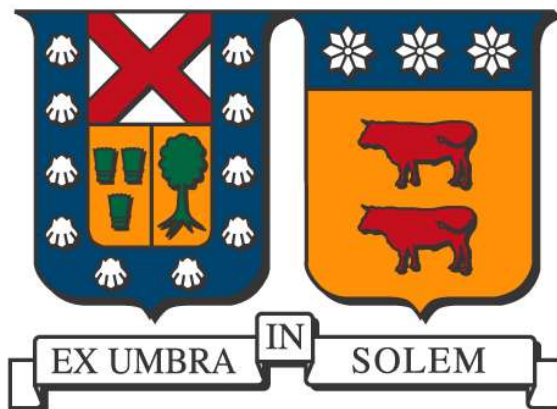


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO – CHILE



CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN ESTALLIDOS DE AIRE A TRAVÉS DEL ACOUPLE DEM-CFD

Presentado por:

CRISTÓBAL EMILIO FUENTES ALCAÍNO

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

Profesor Guía:

DR. SERGIO PALMA M.

Profesor Correferente:

DOCTORANDO ÁLVARO VERGARA B.

DICIEMBRE 2023



Agradecimientos

En el marco de este trabajo quiero agradecer enormemente a todas las personas que me acompañaron durante este proceso. En especial a mis padres y familia, por siempre estar junto a mí y brindarme todo su apoyo de manera incondicional en las aspiraciones y metas que deseo lograr en mi vida.

A mis amigos que siempre han estado conmigo y los buenos momentos que hemos pasado durante esta etapa de nuestras vidas. Que siempre tengan en su mente mi incondicional presencia, así como yo cuento con la suya.

A mi profesor guía, Sergio, por confiar en mi trabajo y darme las oportunidades para prosperar de manera profesional y personal durante los últimos años de mi vida universitaria, además del apoyo y presencia a lo largo de todo el presente trabajo.

Finalmente agradecer a mi compañera de vida, que estuvo presente en uno de los momentos más importantes de mi vida, ayudándome a mantener siempre el foco y siendo un gran soporte en todo momento y en cada situación.

A cada uno, muchas gracias por todo.



Resumen

Un airblast es un repentino colapso de un gran volumen de rocas que provoca la salida de aire a grandes velocidades por los puntos de extracción de una batea, provocado por la compresión del aire en la cavidad generada, al detonar los bloques masivos en métodos subterráneos como Block Caving o Panel Caving. El siguiente trabajo estudió y analizó un primer acercamiento a la implementación del acople entre el Método de Elementos Discretos (DEM) y la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para la descripción de este fenómeno. Mientras que DEM resuelve las leyes de Newton para describir la dinámica de las partículas, CFD resuelve a partir del modelo $k - \epsilon$ las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS), para evaluar la dinámica del aire. Se recrearon una serie de casos, a partir de simulaciones numéricas, evaluando la influencia del tamaño del airgap (L_{ag}), y la granulometría (d_{50}); tanto del material fragmentado, como del cave back, (el cual colapsa y comprime el volumen de aire), en la magnitud de la velocidad del aire que sale expulsado por los puntos de extracción. Se consideró un modelo geométrico simplificado y a escala de laboratorio, debido a los recursos computacionales requeridos para la utilización del método. Finalmente se propuso un modelo matemático simple que describe y predice la magnitud de un airblast a partir de los parámetros estudiados.



Abstract

An airblast is a sudden collapse of a large volume of rock that causes air to flow at high speeds through the extraction points of an underground opening, caused by the compression of the air in the cavity generated by detonating the massive blocks in underground methods such as Block Caving or Panel Caving. The following work studied and analyzed a first approach to the implementation of the coupling between the Discrete Element Method (DEM) and Computational Fluid Dynamics (CFD) for the description of this phenomenon. While DEM solves Newton's laws to describe the dynamics of particles, CFD solves the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations from the $k - \epsilon$ model to evaluate the dynamics of air. A series of cases were recreated, based on numerical simulations, evaluating the influence of the size of the air gap (L_{ag}), and the granulometry (d_{50}); both the fragmented material and the cave back, (which collapses and compresses the volume of air), in the magnitude of the speed of air that is expelled through the extraction points. A simplified geometric model was applied on a laboratory scale, due to the computational resources required for the use of the method. Finally, a simple mathematical model was proposed that can describe and predict the magnitude of an airblast based on the studied parameters.



Índice

1.	Introducción	9
1.1	General	9
1.2	Alcance del proyecto	10
2.	Objetivos	11
2.1	Objetivo general	11
2.2	Objetivos específicos.....	11
3.	Marco Teórico	12
3.1	Minería Subterránea	12
3.2	Modelamiento Numérico.....	15
3.3	Trabajos anteriores	15
4.	Metodología	18
4.1	Modelo Conceptual	18
4.2	Ecuaciones de balance.....	20
4.3	Casos de estudio	23
4.4	Confección y validación de modelo matemático	25
5.	Resultados	26
6.	Discusión de resultados	32
7.	Modelo matemático.....	34
7.1	Confección modelo	34
7.2	Validación modelo	36
8.	Conclusiones y recomendaciones.....	39
9.	Referencias.....	41
10.	Anexos.....	43



Índice de Figuras

Figura 1: Principales peligros asociados a Block Caving.	13
Figura 2: Proceso de ocurrencia de un airblast.	14
Figura 3: Modelo geométrico conceptual de la batea simplificada.	19
Figura 4: Curvas granulométricas empleadas en los casos de estudio.	24
Figura 5: Secuencia de ocurrencia del fenómeno de airblast para uno de los casos simulados.	25
Figura 6: Velocidad promedio en función del tiempo para los 15 tamaños de airgap, considerando un muckpile con $d_{50} = 3.0$ mm y un caveback con $d_{50} = 6.0$ mm.	26
Figura 7: Velocidad promedio en función del tiempo para los cuatro tamaños del muckpile, considerando un Lag = 0.43 m y un caveback con $d_{50} = 6.0$ mm.	27
Figura 8: Velocidad promedio en función del tiempo para los cuatro tamaños del cave back, considerando un Lag = 0.43 m y un muckpile con $d_{50} = 3.0$ mm.	28
Figura 9: Comparación de la velocidad máxima del aire en función del largo del airgap para las cuatro curvas del muckpile considerando un cave back con $d_{50} = 1.5$ mm.	29
Figura 10: Comparación de la velocidad máxima del aire en función del largo del airgap para las cuatro curvas del cave back considerando un muckpile con $d_{50} = 6.0$ mm.	30
Figura 11: Caudal promedio de aire en función del tiempo para los 15 tamaños de airgap, considerando un muckpile con $d_{50} = 3.0$ mm y un cave back con $d_{50} = 6.0$ mm.	31
Figura 12: Comparación del modelo matemático propuesto para la velocidad máxima de salida del aire junto a los respectivos datos experimentales normalizados.	35
Figura 13: Ajuste del modelo matemático en relación con los datos experimentales.	36
Figura 14: Comparación entre los modelos realizados por otros autores y el modelo propuesto en este trabajo.	38



Índice de tablas

Tabla 1: Resumen de las investigaciones realizadas sobre airblast a la fecha	17
Tabla 2: Parámetros utilizados en las simulaciones numéricas	23
Tabla 3: Parámetros empleados para la comparación de los modelos.....	37



Índice de ecuaciones

Ecuación 1	16
Ecuación 2	16
Ecuación 3	17
Ecuación 4	20
Ecuación 5	20
Ecuación 6	20
Ecuación 7	20
Ecuación 8	21
Ecuación 9	21
Ecuación 10	22
Ecuación 11	22
Ecuación 12	22
Ecuación 13	22
Ecuación 14	22
Ecuación 15	23
Ecuación 16	34
Ecuación 17	34
Ecuación 18	34
Ecuación 19	34
Ecuación 20	35
Ecuación 21	35



1. Introducción

1.1. General

Block Caving es un método de explotación subterráneo que permite la extracción rentable de yacimientos masivos de baja ley, debido a los bajos costos de operación y altos ritmos de producción; siempre que la geometría, tamaño y competencia de la roca lo permita. La principal complejidad del método se asocia a la dinámica de hundimiento y el posterior colapso de la roca (Gómez & Labbé, 2019).

Actualmente se han descubierto yacimientos de menores leyes y mayores profundidades, siendo este último, un parámetro crítico para el desarrollo de la operación, debido a las dificultades geomecánicas enfrentadas; como las altas tensiones a las que se ve sometido el macizo, o el incremento en la competencia de la roca. Estos desafíos geomecánicos se traducen en dificultades para colapsar la roca, así como en fragmentaciones más gruesas, lo que dificulta el manejo del material. En este contexto se encuentra uno de los principales problemas enfrentados en Block Caving: las colgaduras. Estas corresponden a “formaciones o arcos de rocas que obstruyen uno o más puntos de extracción, impidiendo el flujo gravitacional del material dentro de la batea” (R. Gómez, 2014). Cuando se conforman las colgaduras, se puede dar origen a otro fenómeno, conocido como “air blast” o estallido de aire.

Un estallido de aire corresponde al desplazamiento de grandes cantidades de aire, que sale a altas velocidades a través de uno o más puntos de extracción debido a la caída súbita de rocas; que producen la compresión de un volumen de aire conocido como “airgap” (E.T. Brown, 2002). Es importante destacar que, las colgaduras formadas en un punto de gran altura dentro del bloque fragmentado generarán un mayor volumen de aire desplazado, en comparación a una colgadura conformada más cerca del punto de extracción.

Los “air blast” pueden causar consecuencias fatales, como lo ocurrido en la mina Northparkes, Australia, en noviembre de 1999. La fuerza del estallido fue tal que ocasionó la muerte de cuatro personas; los pernos y mallas de las paredes fueron torcidos; e incluso provocó la destrucción de vehículos motorizados. Otro caso similar ocurrió en Chile, en División Salvador, en diciembre de 1999.

Considerando los nuevos descubrimientos de yacimientos, no sería raro de esperar que en un futuro próximo se desarrollen más proyectos de Block Caving en el país. Por lo que es consecuente asumir que existirá un aumento en la probabilidad de ocurrencia de los “air blast”.

Dada la gravedad de los accidentes producidos por los estallidos, y, además, la creciente tendencia de operaciones subterráneas, dan cuenta de la mayor importancia que tiene la evaluación, descripción y predicción de estos eventos, tanto para el personal, como la maquinaria e infraestructura de la mina. Esto ha provocado la necesidad de crear nuevas técnicas de estudio para los airblast; como los hechos por diferentes



autores que han realizado recientes trabajos de modelamiento numérico para lograr comprender y describir de manera precisa este peligroso fenómeno.

Por ello, este trabajo se centra en la caracterización de los parámetros involucrados en un airblast y cómo estos influyen en la magnitud del fenómeno, además de poder confeccionar una herramienta capaz de predecir, la magnitud de la velocidad máxima del aire que sale por los puntos de extracción de una batea.

1.2. Alcance del proyecto

El trabajo se centra en la caracterización del fenómeno conocido como airblast, a través de la simulación numérica de distintos casos; para comprender y analizar la ocurrencia del evento. Para ello, el estudio se limita a recrear un estallido de aire mediante la confección de un modelo geométrico simple, y a escala de laboratorio. Para posteriormente confeccionar un modelo matemático simple que describa la velocidad máxima del aire, es decir, la magnitud del estallido, incluso a escala real. También se compararán los resultados con otros trabajos hechos anteriormente por otros autores. Por último, no se encuentra dentro del proceso, la predicción de cuando puede ocurrir un airblast.



2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Realizar la caracterización de un estallido de aire utilizando el acople DEM-CFD.

2.2. Objetivos específicos

- Configurar la velocidad del aire y su caudal de salida en función de la curva granulométrica de las rocas.
- Cuantificar la velocidad y caudal del aire en función del largo del airgap.
- Definir un modelo matemático simple que permita describir la velocidad máxima de salida del aire en función de los parámetros estudiados



3. Marco Teórico

3.1. Minería Subterránea

Es sabido que Chile es un país minero, con exportaciones de metales como: oro, plata, molibdeno, hierro y en especial, el cobre. Con un 24% de la producción mundial, Chile es el mayor productor de cobre del mundo (Consejo Minero, 2023). Durante el transcurso de los últimos años, el país ha presentado un agotamiento de los yacimientos superficiales, lo que ha provocado un aumento en las actividades de explotación subterránea. En este contexto se ha requerido una adaptación por parte de la minería chilena en los procesos de planificación y explotación, con el fin de encontrar nuevos métodos rentables para la producción. Un caso muy conocido es la División Chuquicamata y su reciente transición de una mina de cielo abierto a una mina subterránea en el año 2019 (Codelco, s.f).

Dentro de la minería subterránea existen métodos como el Panel y Block Caving, siendo este último uno de los más destacados. Este se caracteriza por permitir la explotación rentable de yacimientos masivos de baja ley y una de las principales complejidades del método tiene relación con la dinámica de hundimiento y posterior colapso del macizo rocoso. En Chile existen cuatro operaciones de este tipo, todas pertenecientes a Codelco, las cuales son: División Salvador, División El Teniente, División Andina y como se mencionó anteriormente, la nueva transición de División Chuquicamata.

Como todo proceso de extracción, el método de Block Caving no está exento de problemas y peligros. Los principales peligros del método se muestran en la Figura 1, donde se aprecian fenómenos como los estallidos de rocas, las infiltraciones; tanto de agua, como de lodo, y los colapsos incontrolados del macizo. A su vez, estos colapsos desmedidos pueden conllevar al fenómeno conocido como airblast o estallido de aire.

Como se mencionó previamente, un airblast se define como “el desplazamiento de grandes cantidades de aire, que sale a altas velocidades a través de uno o más puntos de extracción debido a la caída súbita de rocas; que producen la compresión de un volumen de aire conocido como “airgap” (E.T. Brown, 2002).

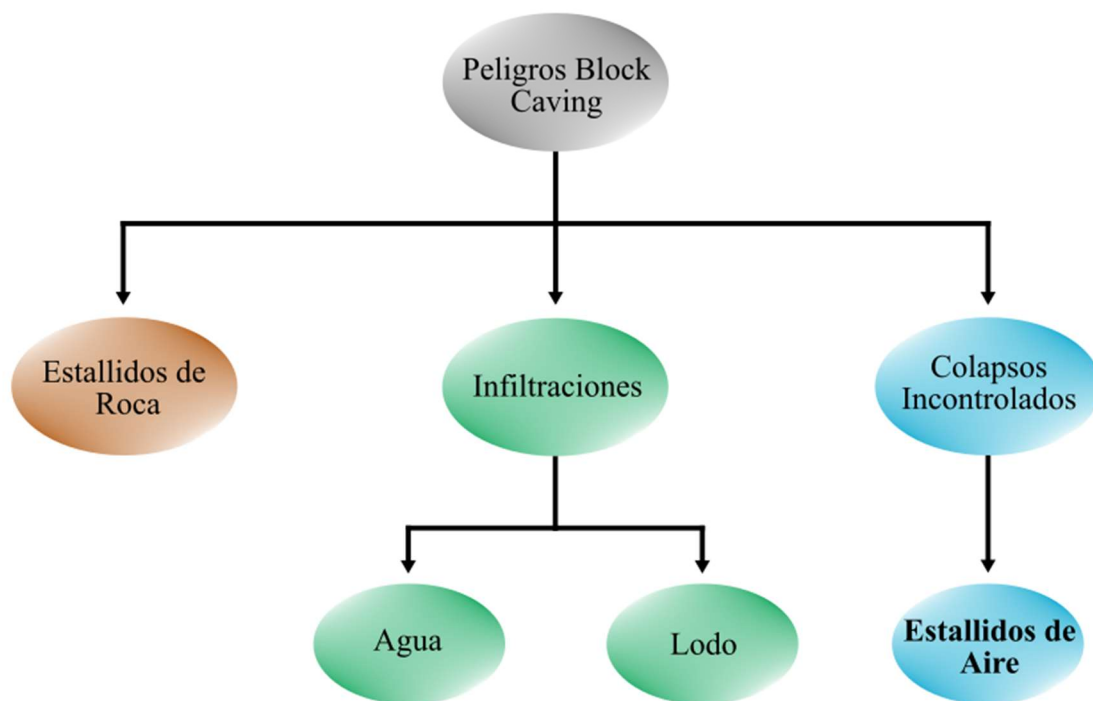


Figura 1: Principales peligros asociados a Block Caving.
Fuente: Adaptación hecha a partir de Brown (2002).

La ocurrencia de un airblast no es instantánea y es más bien un proceso que toma tiempo. En la Figura 2, se muestra la sucesión en la que se genera dicho fenómeno. En primer lugar, cuando se genera el estallido del macizo se crea una enorme capa con material fragmentado. Cuando las extracciones son demasiado rápidas, la zona conocida como cave back no alcanza a colapsar de inmediato, formando una “colgadura”. Estas colgaduras se definen como “formaciones o arcos de rocas que obstruyen uno o más puntos de extracción, impidiendo el flujo gravitacional del material dentro de la batea” (R. Gómez, 2014). Las colgaduras pueden formarse cerca del punto de extracción, o en puntos de gran altura dentro del macro-bloque.

Las extracciones desmedidas, generan una cavidad llena de aire conocida como airgap; mientras que se genera una colgadura en el cave back del macizo. Cuando las rocas del cave back finalmente colapsan, empujan el aire, el cual atraviesa el muckpile y genera las salidas de aire a altas velocidades por los puntos de extracción.

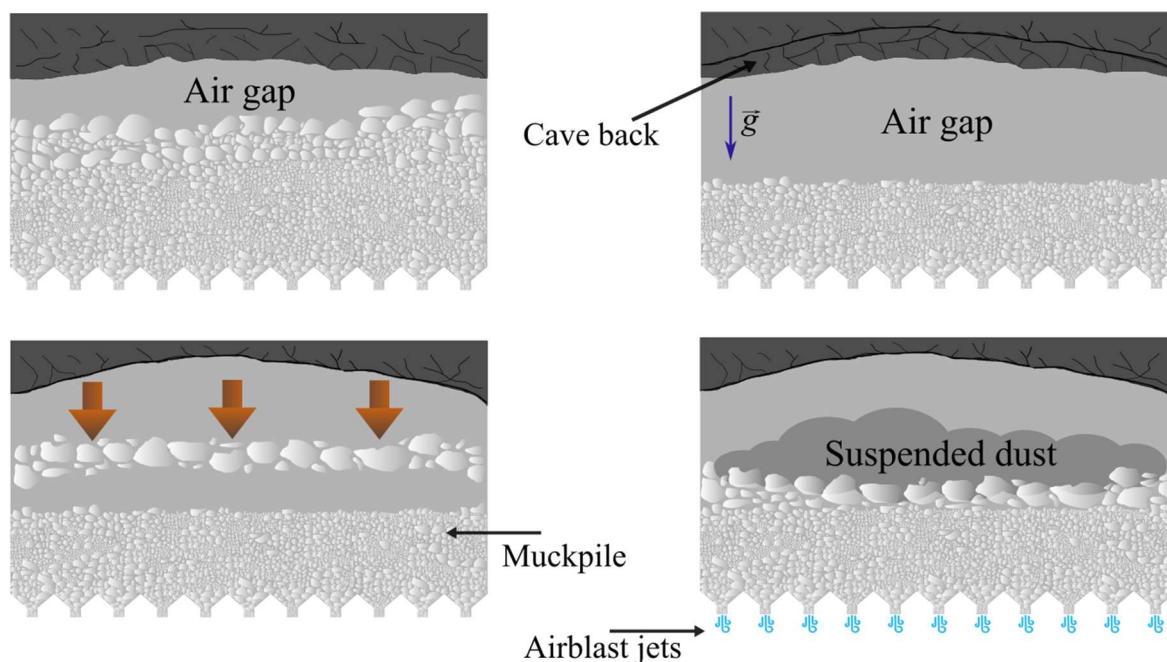


Figura 2: Proceso de ocurrencia de un airblast.
Fuente: Elaboración propia.

Existen algunos casos documentados de estos fenómenos. Entre ellos se encuentra el caso de la mina Northparkes en South Wales, Australia. El día 24 de Noviembre de 1999, se produjo el colapso de un bloque de aproximadamente 5.5 millones de (m^3), provocando un airblast que culminó con la muerte de cuatro personas, además de la destrucción y daños a los equipos e infraestructura de la mina (New South Wales Government, s.f). Aproximadamente tres semanas después, el 5 de Diciembre de 1999, ocurrió un airblast similar en División Salvador, Chile. Cuando en una sección de la mina, se produjo un colapso inesperado del bloque, se generó un arco de rocas estable, que cubría un área cercana a 15,000 (m^2), cuyo repentino desplome culminó en un masivo estallido de aire, resultando en 18 personas con heridas menores (Escobar & Tapia, 2000) (Merino & Tapia, 2001).

Estos casos dan cuenta del alto peligro que significan los estallidos de aire, pues, pueden causar grandes daños en la infraestructura, los equipos y el personal de la mina. Dada la tendencia en que las operaciones subterráneas van en aumento, no sería raro asumir que en un futuro existirán más operaciones de Block Caving en el país, y el mundo; por lo que es consecuente pensar que estos estallidos se volverán un problema más recurrente dentro de la minería.



3.2. Modelamiento Numérico

La modelización o simulación numérica es una herramienta científica y de bajo costo utilizada para estudiar y analizar los mecanismos que controlan los fenómenos físicos, (Oh et al., 2017). Esta se basa en el cálculo numérico, para encontrar soluciones a los problemas. Hoy en día, es una herramienta empleada en muchos campos de la ingeniería; y es altamente utilizada en problemas de minería y geomecánica, como en estudios de estabilidad superficiales y excavaciones subterráneas; o el estudio de los flujos de pulpas mineras a través de tuberías, entre otras aplicaciones.

Existen varios métodos de modelamiento numérico, como lo son el Método de Elementos Discretos (DEM), el Método de Elementos Finitos (FEM), la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), o el Método de Lattice-Boltzmann (LBM). Cada uno de estos métodos son empleados en diferentes áreas de estudio, según el problema en cuestión que se deba resolver.

3.3. Trabajos anteriores

La utilización del modelamiento numérico para estudiar el fenómeno de Airblast es relativamente reciente; donde los primeros pasos se dieron con el trabajo de Oh. et al., (2017), el cual estudió la implementación de un método computacional numérico para caracterizar los parámetros involucrados en airblast. Para ello se utilizó la metodología de Particle Flow Code en dos dimensiones (PFC2D), estudiando la repercusión que tiene la variación de los parámetros del muckpile (tamaño de partícula, altura del muckpile y porosidad) sobre la caída de presión, entre la entrada y salida del modelo geométrico utilizado.

Entre sus resultados se encontró que al aumentar la altura del muckpile, el aire tiene menos posibilidad de cruzar dicha zona hacia los puntos de extracción, por lo que, al definir una altura apropiada para el muckpile, se reduce la distancia que recorren las rocas al caer y, por consiguiente, disminuye el volumen de aire que estas empujan, reduciendo significativamente la magnitud del fenómeno. También encontró que, al disminuir la porosidad del medio, se reduce enormemente la presión generada por el airblast. A su vez, la porosidad del medio se relaciona estrechamente con el tamaño de las partículas; tamaños menores en las rocas significan una menor porosidad, por lo que tamaños menores en las rocas también reducen la magnitud del evento.

Posteriormente, Galindo-Torres et al., (2018), desarrolló un trabajo para demostrar la capacidad del modelamiento numérico para describir los aspectos claves de un airblast, a través de pruebas de validación empírica en laboratorio. Luego, empleó la simulación numérica, utilizando DEM y LBM para evaluar las diferencias con respecto a las pruebas de laboratorio y así demostrar el potencial que posee esta técnica para ser usada en estimar las magnitudes de un airblast, en los estudios de ingeniería. La conclusión más relevante



de este trabajo tiene relación con el ángulo que forman las rocas del muckpile; aquí se observó que mayores ángulos en el muckpile, se traducen en mayores velocidades para la salida del aire.

Más tarde, el trabajo de Palma et al., (2019), fue el primero en presentar un modelo descriptivo de la velocidad máxima del aire en un airblast, además de caracterizar cuales parámetros tienen más influencia en los resultados. De manera análoga al trabajo de Galindo-Torres et al., (2018); en este estudio se trabajó con la misma metodología DEM-LBM, y se trabajó con parámetros estudiados en los dos trabajos mencionados anteriormente. Aquí se varió el tamaño del airgap, la altura del muckpile, además de estudiar la incidencia de la variación en la permeabilidad del material fragmentado; por último, el parámetro de estudio más importante es el de la forma de la pila.

Las conclusiones más importantes fueron que una forma triangular en la pila o muckpile significan mayores velocidades del aire en el punto de extracción, además que el aumento en la permeabilidad del medio se traduce en mayores velocidades para el aire en los puntos de extracción. Finalmente, el trabajo presenta un modelo matemático que describe la velocidad máxima del aire, utilizando el número de Darcy, el tamaño promedio de las rocas y el tamaño del airgap como parámetros de entrada. Si bien, el modelo no permite describir la velocidad para todo el rango de los números de Darcy, la solución propuesta es una buena primera aproximación. Este modelo se presenta a continuación en la Ecuación (1)

$$V_{max} = 2.223\sqrt{2gL_{ag}}\exp(-1.19 \times 10^{-6}/D_a) \quad (1)$$

Recientemente el trabajo de Rojas et al., (2023) hizo avances en la descripción del fenómeno al estudiar el efecto del tamaño de las partículas y el largo del airgap en un gran número de casos. Este trabajo, a diferencia de los dos anteriores utiliza el Método de Elementos Finitos (FEM) y la ecuación de Ergun para resolver el problema. Aquí y de manera consistente con los trabajos anteriores, se obtuvo que mayores tamaños en el airgap y en las rocas que conforman el muckpile; significan mayores velocidades en los puntos de extracción. El resultado más importante de este estudio es la proposición de un modelo matemático simple que permite describir la velocidad máxima del aire en función de los dos parámetros mencionados. El modelo propuesto en este trabajo se ve presentado en la Ecuación (2)

$$V_{max} = 8.48\sqrt{2gH_{dp}}L^{0.14}D^{0.64} \quad (2)$$

Por último, se tiene el trabajo de Morales et al., (2023), el cual estudió la influencia del tamaño del airgap; el espesor del muckpile y las zonas que colapsan en el caveback, en las velocidades del aire que sale por los



puntos de extracción. De manera análoga al trabajo anterior, aquí también se utiliza la metodología FEM y la ecuación de Ergun para encontrar las soluciones del problema.

Cabe destacar que una de las partes más importantes de este trabajo corresponde a la elaboración de una matriz de riesgo para los casos estudiados. Las conclusiones de esta tesis son consistentes con los trabajos anteriores, donde un mayor tamaño en el airgap conlleva a mayores velocidades del aire en los puntos de extracción y una mayor altura en el muckpile disminuye la magnitud del evento. El modelo matemático propuesto aquí, permite la descripción de la velocidad máxima, utilizando el tamaño del airgap y el espesor del muckpile como parámetros de entrada. El modelo creado se muestra en la Ecuación (3)

$$V_{max} = 0.72\sqrt{2gH_{dp}}L_T^{-0.23}L_{ag}^{0.26} \quad (3)$$

Los estudios mencionados son el marco donde se desarrolla la investigación de este trabajo; los modelos y conclusiones encontradas en cada uno de estos son fundamentales para evaluar los resultados de la investigación realizada. El resumen de estas investigaciones se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Resumen de las investigaciones realizadas sobre airblast a la fecha.

Autor	Método	Variables de estudio
Oh et al. (2017)	PFC2D	Espesor, porosidad muckpile y tamaño de partículas
Galindo-Torres et al. (2018)	DEM - LBM	Ángulo de muckpile
Palma et al. (2019)	DEM - LBM	Forma de pila y permeabilidad
Rojas et al. (2023)	FEM	Largo de airgap, diámetro partículas
Morales et al. (2023)	FEM	Espesor muckpile, Zona de colapso y diámetro partículas



4. Metodología

Para representar el fenómeno del airblast se acoplarán dos técnicas: el Método de Elementos Discretos (DEM) y la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Mientras que el primer método es ideal para el estudio y análisis del material particulado; el segundo es empleado para describir el comportamiento de un fluido; en este caso, el aire que sale por los puntos de extracción. De este modo, es posible describir el evento con una mayor fidelidad a la realidad, en comparación a otros métodos empleados en estudios anteriores; como el trabajo hecho por Rojas et al., el cual utiliza la ecuación de Ergun para describir el flujo de aire y el Método de Elementos Finitos (FEM) para representar tanto el material fragmentado como el material que cae desde el cave back.

La ventaja del acople entre DEM-CFD es que se utilizan dos métodos muy competentes e independientes para cada uno de los elementos físicos involucrados en el fenómeno del airblast, siendo DEM óptimo para el estudio de los fragmentos de roca y por su parte, CFD es idóneo para evaluar la dinámica del aire. Al acoplar estos métodos de manera bidireccional, se puede estudiar y evaluar la influencia que tienen las partículas sobre el fluido y, a su vez, también analizar la incidencia del aire sobre las partículas. Así se tiene una metodología que junta lo mejor de ambos mundos; al trabajar por separado y traspasando la información necesaria de un software a otro.

La desventaja que presenta este acople es el alto costo de recursos computacionales en comparación al método FEM, ya que los cálculos se hacen por separado en cada uno de los softwares utilizados, lo que incrementa el tiempo de resolución. Para el trabajo se utilizaron los softwares Rocky (DEM), para resolver la dinámica de las partículas y Ansys Fluent (CFD) para la dinámica del fluido.

4.1. Modelo Conceptual

Para medir el fenómeno de estallido de aire, se representó de manera simplificada la geometría de una batea, utilizando un cilindro vertical con dos puntos de extracción en los lados opuestos como se muestra en la Figura 3. Dentro del cilindro se divisan tres zonas clave:

- I. Zona de material fragmentado o "Muckpile": Esta corresponde a la zona inferior de la batea, donde se encuentra el material fragmentado producto de la explotación, pero que aún no ha sido extraído desde los puntos de extracción. Además, posee una columna de rocas variable, debido al retiro o extracción del material.



- II. Zona aireada o "Airgap": Esta zona intermedia corresponde a todo el aire contenido entre el material fragmentado y el "cave back". Este aire es comprimido por las rocas que colapsan de la colgadura; y, por consiguiente, es expulsado a altas velocidades por ambos puntos de extracción. Esta zona puede producirse debido a diferencias entre la tasa de extracción y la tasa de propagación de fragmentación a través de la roca.
- III. Zona de colgadura o "Cave back": Esta zona corresponde a la parte superior del modelo. Aquí el macizo rocoso se encuentra fragmentado y suspendido en el techo; formando lo que se conoce como "colgadura". Son estas rocas, las que pueden colapsar de forma súbita, dando así, origen al fenómeno de "airblast".

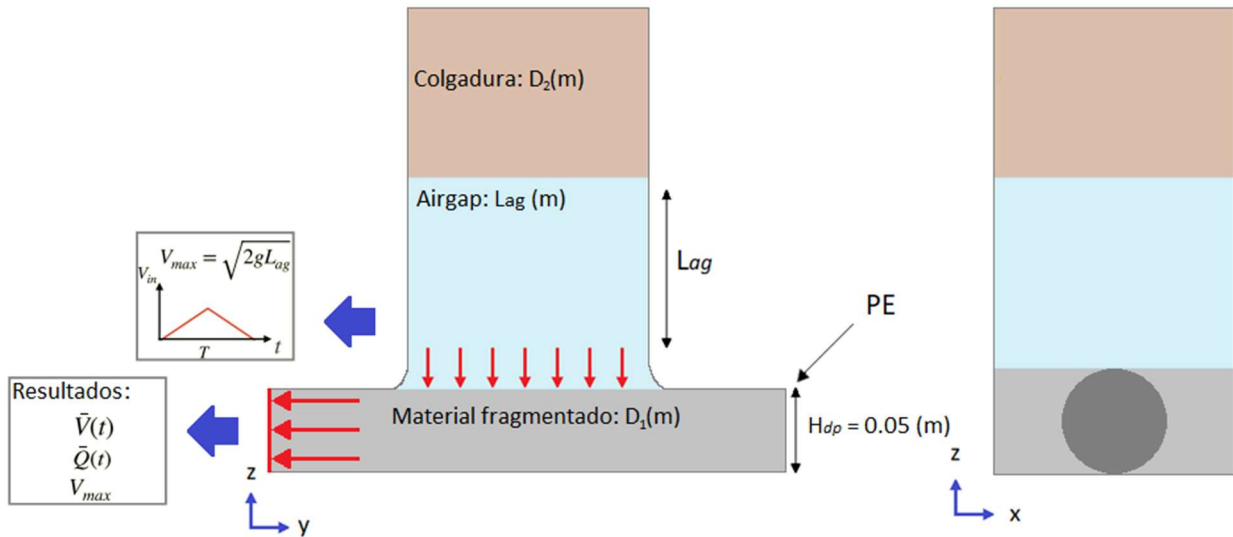


Figura 3: Modelo geométrico conceptual de la batea simplificada.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en la Figura 3 se muestran otros conceptos clave, como el área de estudio, considerando el plano xz en la salida del punto de extracción. También se presentan los tres parámetros a variar durante el trabajo: la granulometría del material fragmentado, representado como (D_1), la granulometría del material rocoso en el cave back, (D_2) y el largo del airgap, expresado como (L_{ag}). Por último, se presentan las dos variables de estudio: la velocidad promedio de salida del aire $\bar{V}(t)$ y el caudal de aire promedio que sale $\bar{Q}(t)$; ambas en función del tiempo.



4.2. Ecuaciones de balance

Por un lado, DEM emplea las tres leyes de Newton para describir el movimiento e interacciones entre las partículas, principalmente la segunda ley de Newton, además de utilizar la conservación de momentum y energía. También emplea la ecuación de rotación de Euler para describir la rotación del material particulado.

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} \vec{x}_i = \vec{F}_i \quad (4)$$

$$I_i \frac{d}{dt} \vec{\omega}_i = \vec{T}_i \quad (5)$$

Por otro lado, para describir el flujo de aire, CFD intenta resolver de manera numérica las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, la solución numérica a las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos turbulentos es extremadamente compleja; por lo que, en su lugar, el software calcula las soluciones para las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, también conocidas como ecuaciones RANS. Estas ecuaciones se representan en su forma de tensor como: (Simscale, s.f) (University of Washington, s.f)

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (6)$$

Donde U representa la velocidad promedio del fluido, u' es la fluctuación de la velocidad producto de la turbulencia, μ es la viscosidad y $\rho \overline{u_i' u_j'}$ es el término de Estrés de Reynolds. Para resolver las ecuaciones RANS se necesita expresar el estrés de Reynolds en términos del flujo promedio. Así, la solución a este esfuerzo es definida mediante la hipótesis de la "viscosidad turbulenta" según:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (7)$$



Donde μ_t es la viscosidad turbulenta y δ_{ij} es el Delta de Kronecker:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } i \neq j \rightarrow \text{Componente de Esfuerzo Normal} \\ 0, & \text{si } i = j \rightarrow \text{Componente de Esfuerzo Cortante} \end{cases}$$

La Ecuación (7) es una ecuación combinada para las componentes normal y de corte del Esfuerzo o Estrés de Reynolds. Una vez resuelta la Ecuación (7) para la viscosidad turbulenta, es posible resolver la ecuación RANS (6); es aquí donde se presentan diferentes modelos para calcular dicha viscosidad.

El modelo $k - \epsilon$, es uno de los modelos más comunes para simular características promedio del flujo para condiciones de flujo turbulento. El modelo estándar $k - \epsilon$ es un modelo de dos ecuaciones que resuelve los valores para la energía cinética turbulenta k (TKE) y la razón de difusión turbulenta ϵ , la cual determina la razón de disipación de la energía cinética.

Es así como se presentan las dos ecuaciones de transporte para ambas variables; por un lado, se tiene la ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta (TKE):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon + S_k \quad (8)$$

Donde P_k es la producción de TKE debido a los gradientes de la velocidad promedio, P_b es la producción de energía cinética turbulenta debido al empuje, S_k es un valor definido por el usuario y σ_k es el número de Prandtl turbulento para k .

Por otro lado, se tiene la ecuación de transporte para la razón de disipación ϵ , dada por:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_3 P_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (9)$$

Donde C_1 , C_2 y C_3 son constantes que varían entre los modelos de turbulencia, S_ϵ es un término definido por el usuario y σ_ϵ es el número de Prandtl turbulento para ϵ .



El modelo turbulento $k - \epsilon$ busca la solución a la razón de disipación. La energía cinética turbulenta es dada por:

$$k = \frac{3}{2} (UI)^2 \quad (10)$$

Donde U es la velocidad de flujo promedio e I es la intensidad de turbulencia. A su vez, este último término se puede definir como:

$$I = \frac{u'}{U} \quad (11)$$

Aquí, u' es la raíz cuadrada de las fluctuaciones de la velocidad de turbulencia, representada por:

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3} (u'_x{}^2 + u'_y{}^2 + u'_z{}^2)} = \sqrt{\frac{2}{3} k} \quad (12)$$

Mientras que la velocidad promedio U es calculada según:

$$U = \sqrt{U_x{}^2 + U_y{}^2 + U_z{}^2} \quad (13)$$

Además, la razón de disipación de turbulencia puede ser calculada como:

$$\epsilon = C_\mu^{3/4} \left(\frac{k^{3/2}}{l} \right) \quad (14)$$

Donde C_μ es la constante del modelo de turbulencia y l es la escala de longitud de turbulencia. Para este modelo, no es necesario definir este último término, ya que este valor se genera mediante las mismas soluciones a las ecuaciones de transporte que resuelve el software.



Finalmente, la viscosidad de turbulencia es calculada a través de:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (15)$$

Los coeficientes del modelo han sido obtenidos mediante experimentación y han evolucionado a través del tiempo. Los valores más comunes y aceptados en la actualidad son los obtenidos por Launder & Sharma (1974), y fueron los utilizados para este estudio; donde $\sigma_k = 1$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ y $C_\mu = 0.09$

4.3. Casos de estudio

Los casos de estudios fueron determinados utilizando los datos de la Tabla 2, donde la combinación entre los valores de los tres parámetros del modelo, arrojan un total de 240 simulaciones numéricas a realizar. Como se mencionó anteriormente, en cada caso se evaluarán los datos de la velocidad y el caudal de salida del aire por el punto de extracción, para cada instante de tiempo. Luego, se examinarán los valores máximos obtenidos para la velocidad, analizando la influencia de cada parámetro sobre esta.

Tabla 2: Parámetros utilizados en las simulaciones numéricas junto a sus respectivos valores.

Parámetro	Valor
Densidad aire, ρ_a (kg/m ³)	1.225
Viscosidad aire, μ (Pa · s)	1.79×10^{-5}
Densidad roca, ρ_r (kg/m ³)	2650
d_{50} , partícula muckpile, D_1 (mm)	[1.5 : 1.5 : 6.0]
d_{50} , partícula caveback, D_2 (mm)	[1.5 : 1.5 : 6.0]
Largo airgap, L_{ag} (m)	[0.10 : 0.03 : 0.52]

También se presentan las curvas granulométricas utilizadas durante el trabajo. Se crearon cuatro distribuciones uniformes continuas y con partículas esféricas, para simplificar el trabajo, debido a los altos costos computacionales que requiere el uso del acople. Para cada curva se consideraron cuatro tamaños con un 25% de masa en relación con la masa total generada por el software. Como se muestra en la Figura 4, las curvas b), c) y d) son generadas, al multiplicar los tamaños de la curva a) por un factor dos, tres y cuatro, respectivamente. Así se tienen curvas con el doble, el triple y el cuádruple de los tamaños originales.

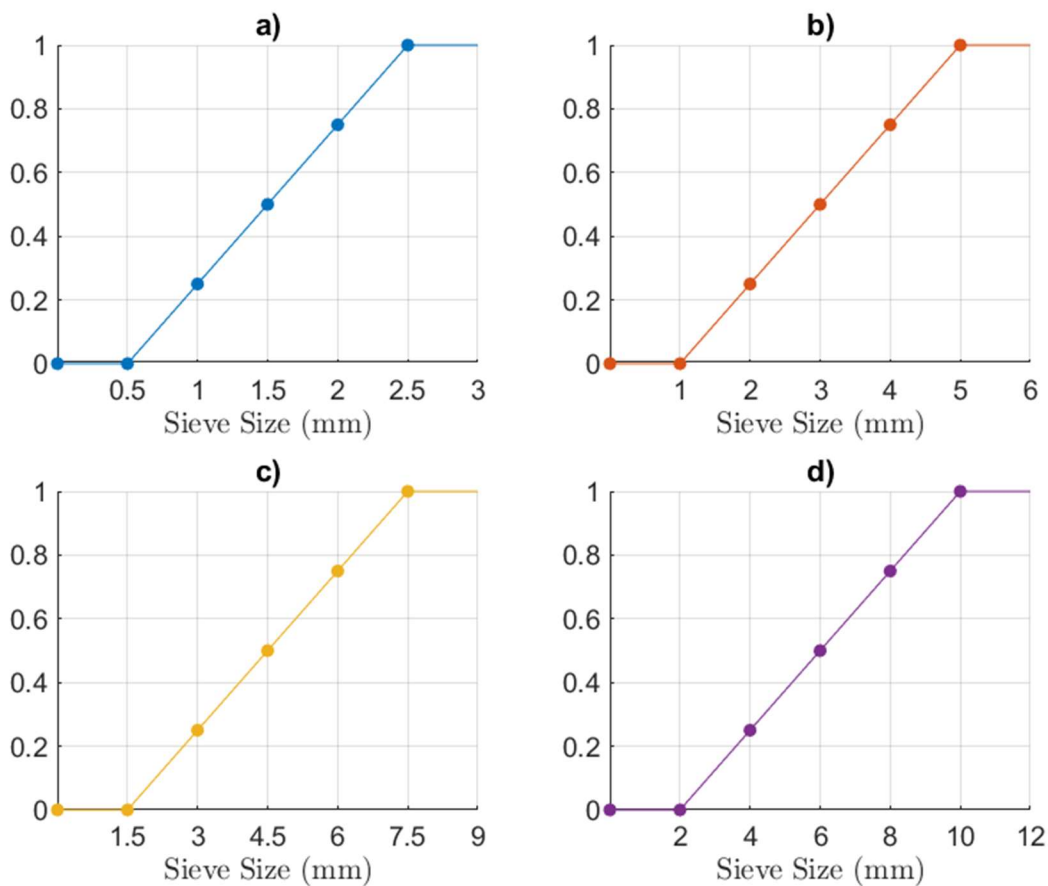


Figura 4: Curvas granulométricas empleadas en los casos de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Además, se presenta a continuación, en la Figura 5 una secuencia de imágenes de una de las simulaciones realizadas, para observar de manera visual el fenómeno del airblast. En la secuencia se puede observar la caída de las partículas de la colgadura y como estas empujan el aire que sale por los puntos de extracción; donde el flujo y la velocidad del aire se representan mediante vectores de colores, donde los vectores de colores azulados muestran las velocidades más bajas y los vectores de colores más rojizos representan las mayores velocidades del aire.

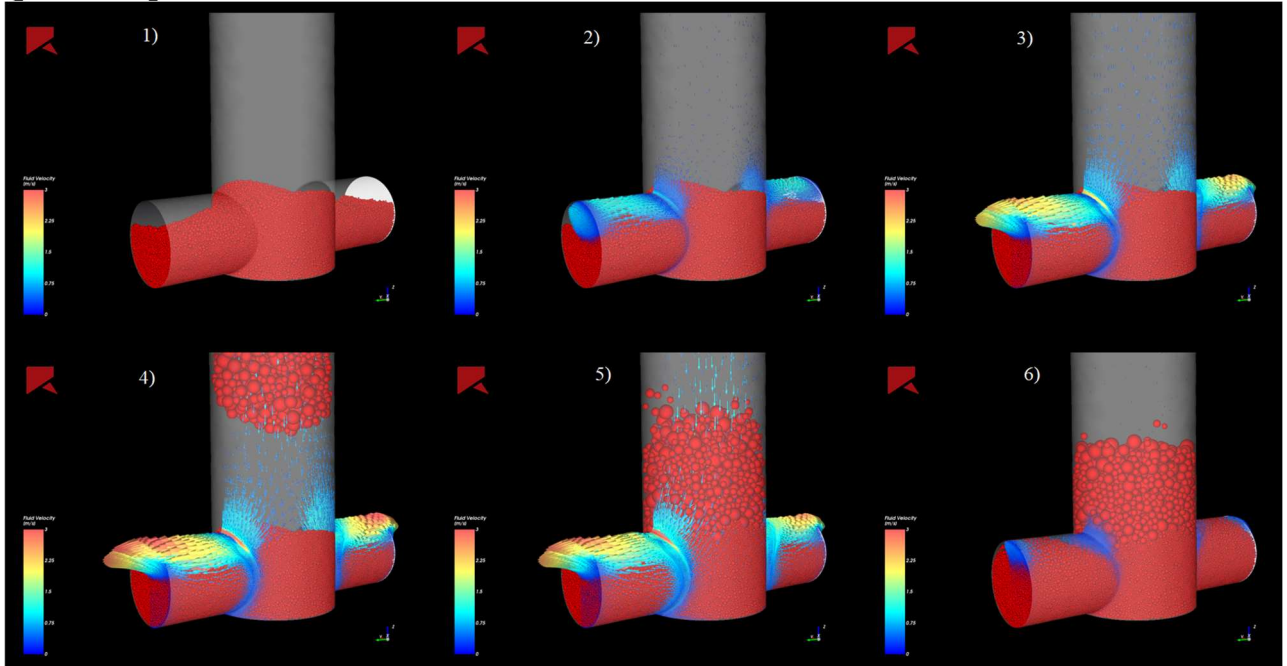


Figura 5: Secuencia de ocurrencia del fenómeno de airblast para uno de los casos simulados.
Fuente: Elaboración propia.

4.4. Confección y validación de modelo matemático

Para finalizar el trabajo se confeccionó y propuso un modelo matemático que describe la velocidad máxima de salida por los puntos de extracción en una batea, en un estallido de aire. Esto significa que el modelo también es capaz de predecir la magnitud de la velocidad del evento; pudiendo así ser utilizado posteriormente en estudios de seguridad. Para la confección del modelo se utilizó el teorema de Π de Buckingham ya que permite expresar una dimensión física en parámetros adimensionales, independiente del sistema de unidades que se utilice, normalizando el modelo y posibilitando su aplicación a una escala real.

La validación del modelo consiste básicamente en analizar mediante la literatura anterior, que el modelo propuesto es capaz de describir el fenómeno y cómo este, se comporta en relación a los modelos matemáticos creados por los otros autores. En este estudio se utilizarán los trabajos hechos por Palma et al., (2019), Rojas et al., (2023) y Morales et al., (2023), para comparar dichos modelos matemáticos con el modelo a proponer al fin de este trabajo.



5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados más importantes obtenidos para las pruebas realizadas. En primer lugar, se muestran los resultados para la velocidad en función del tiempo, considerando los 15 tamaños para el airgap; para el caso en que se tiene un caveback con un $d_{50} = 6.0$ (mm) y un muckpile con $d_{50} = 3.0$ (mm). Del gráfico mostrado en la Figura 5 se aprecia el aumento en la velocidad de salida del aire, conforme incrementa el largo del airgap.

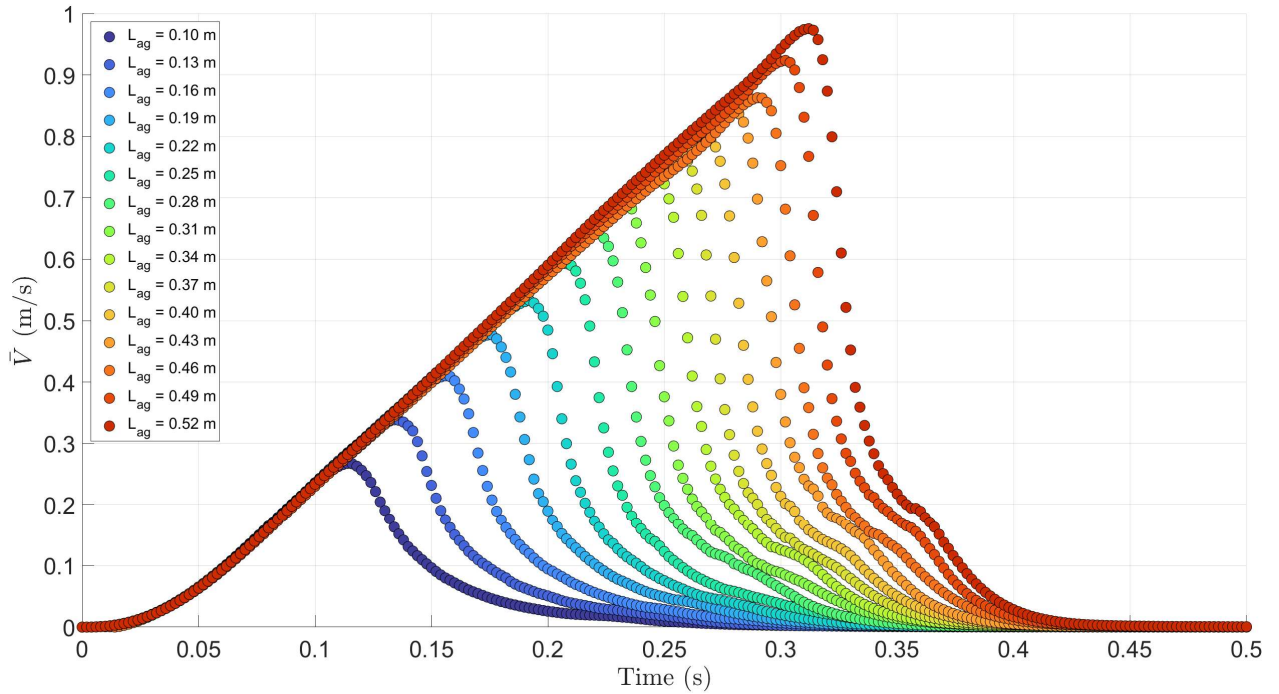


**Figura 6: Velocidad promedio en función del tiempo para los 15 tamaños de airgap, considerando un muckpile con $d_{50} = 3.0$ (mm) y un caveback con $d_{50} = 6.0$ (mm).
Fuente: Elaboración propia.**

Por otro lado, en la Figura 6, se muestra la velocidad promedio del aire en función del tiempo, comparando las cuatro curvas granulométricas utilizadas para el material fragmentado. Aquí se comparan los valores para un cave back con $d_{50} = 6.0$ (mm) y un $L_{ag} = 0.37$ (m). En este caso se observa un aumento en la velocidad al aumentar el tamaño de partícula. Siendo el valor máximo aproximado para la velocidad $V_{max} = 0.95$ (m/s).

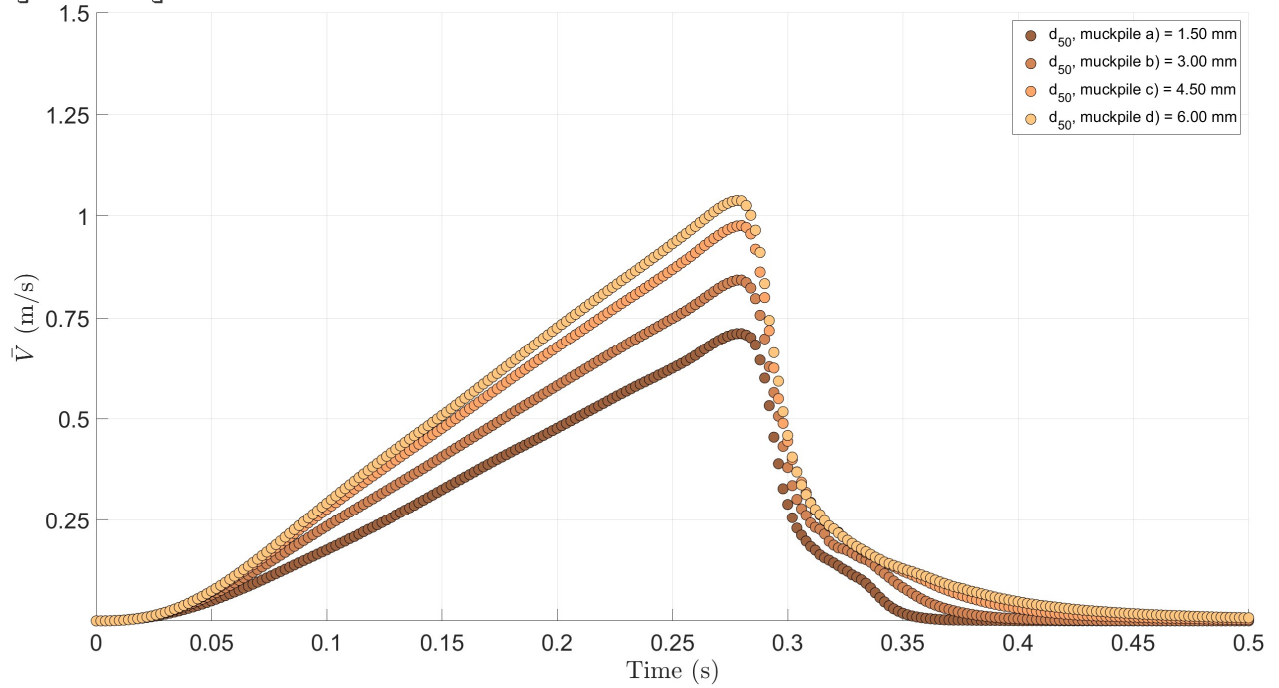


**Figura 7: Velocidad promedio en función del tiempo para los cuatro tamaños del muckpile, considerando un $L_{ag} = 0.43$ (m) y un caveback con $d_{50} = 6.0$ (mm).
Fuente: Elaboración propia.**

Análogamente, en la Figura 7, están presentes los resultados para la velocidad del aire en función del tiempo comparando los cuatro tamaños usados en el caveback; cuando se tiene un muckpile con $d_{50} = 3.0$ (mm) y un $L_{ag} = 0.43$ (m). En contraste al caso anterior, la velocidad del aire aumenta al disminuir el diámetro de las partículas. Para este caso, la velocidad máxima alcanza valores aproximados de $V_{max} = 1.5$ (m/s).

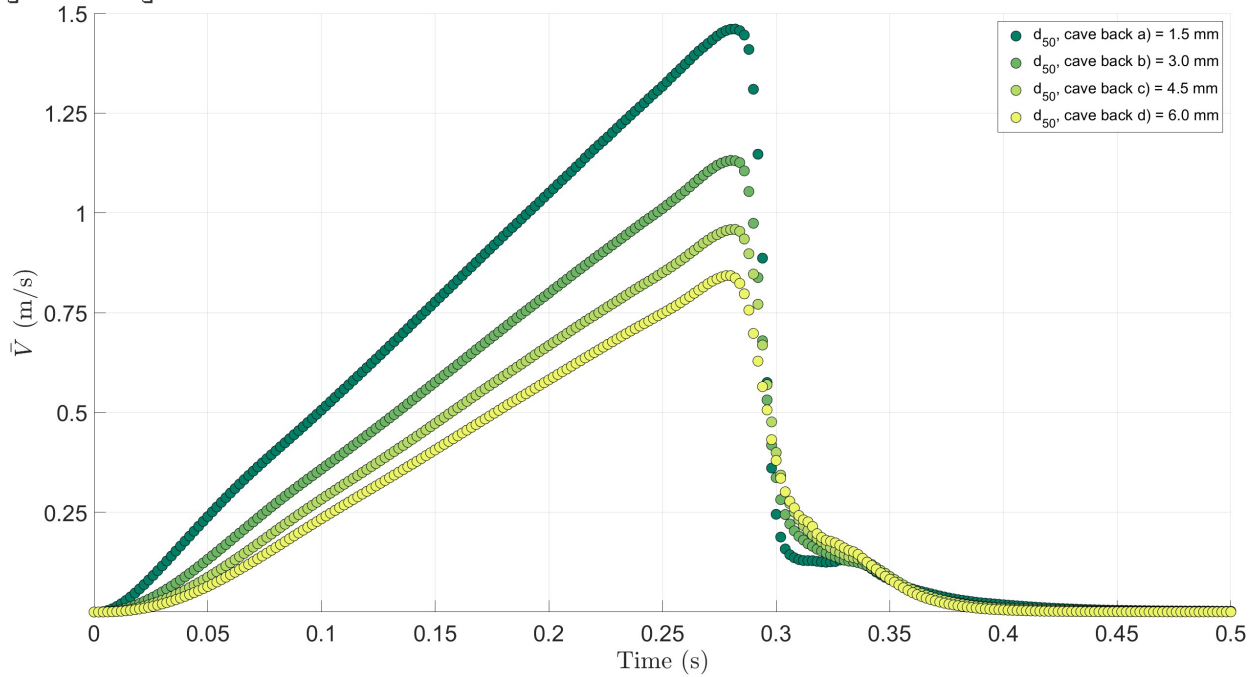


Figura 8: Velocidad promedio en función del tiempo para los cuatro tamaños del cave back, considerando un $L_{ag} = 0.43$ (m) y un muckpile con $d_{50} = 3.0$ (mm).
Fuente: Elaboración propia.

También se incorporan los resultados para la velocidad máxima del aire en función del largo del airgap, comparando las cuatro curvas granulométricas empleadas para el muckpile, para el caso en que se tiene un cave back con $d_{50} = 1.5$ (mm). Esto se presenta en la Figura 8; donde se aprecia el aumento de velocidad máxima, al aumentar tanto el largo del airgap, como el tamaño de las partículas.

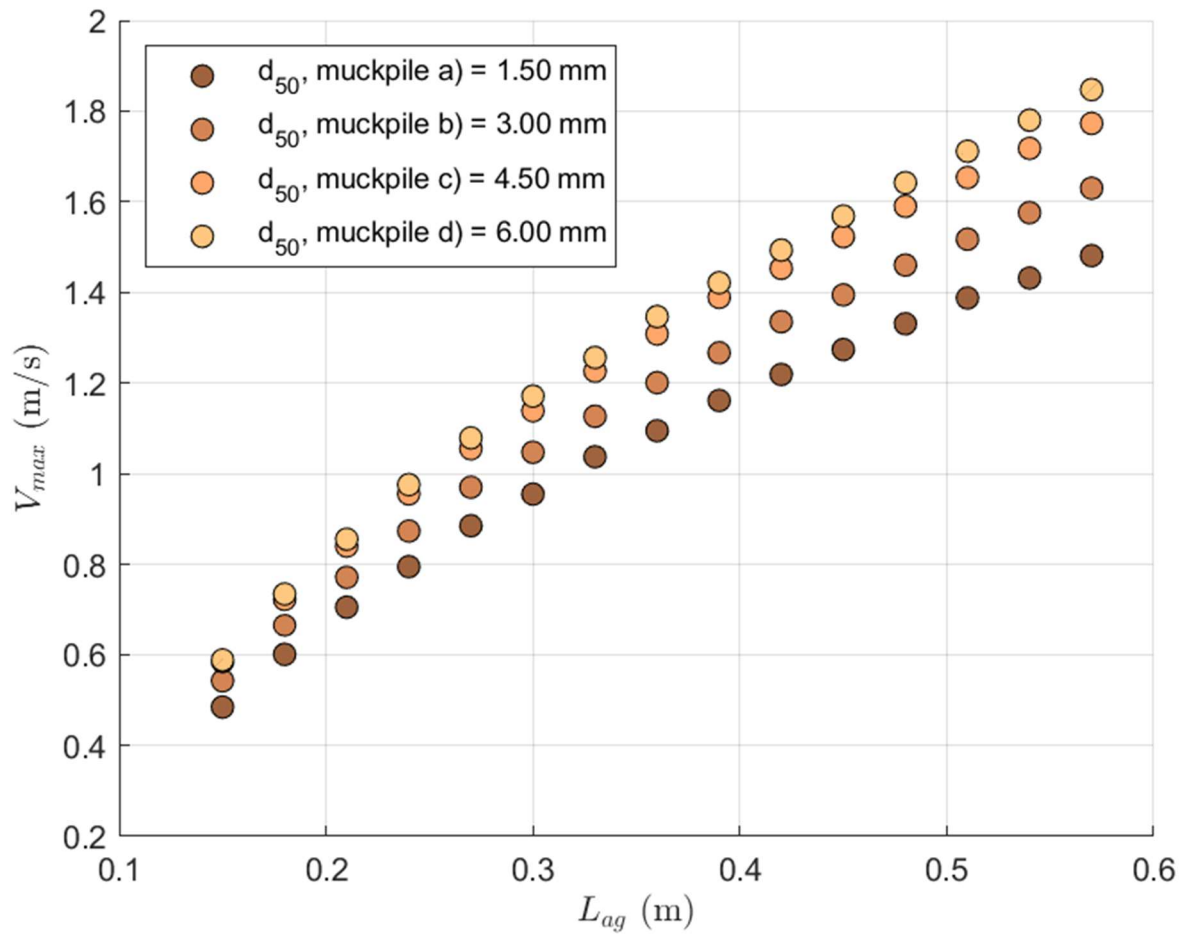


Figura 9: Comparación de la velocidad máxima del aire en función del largo del airgap para las cuatro curvas del muckpile considerando un cave back con $d_{50} = 1.5$ (mm).

Fuente: Elaboración propia.

De manera análoga, se incorporan los resultados para la velocidad máxima del aire en función del largo del airgap, pero comparando las cuatro curvas granulométricas empleadas en el cave back, para el caso en que se tiene un muckpile con $d_{50} = 3.0$ (mm). De manera similar al caso anterior, en la Figura 9, se observa un aumento en la velocidad máxima al aumentar el tamaño del airgap, pero en contraste, se aprecia que, al disminuir el tamaño de la partícula, la velocidad máxima del aire incrementa.

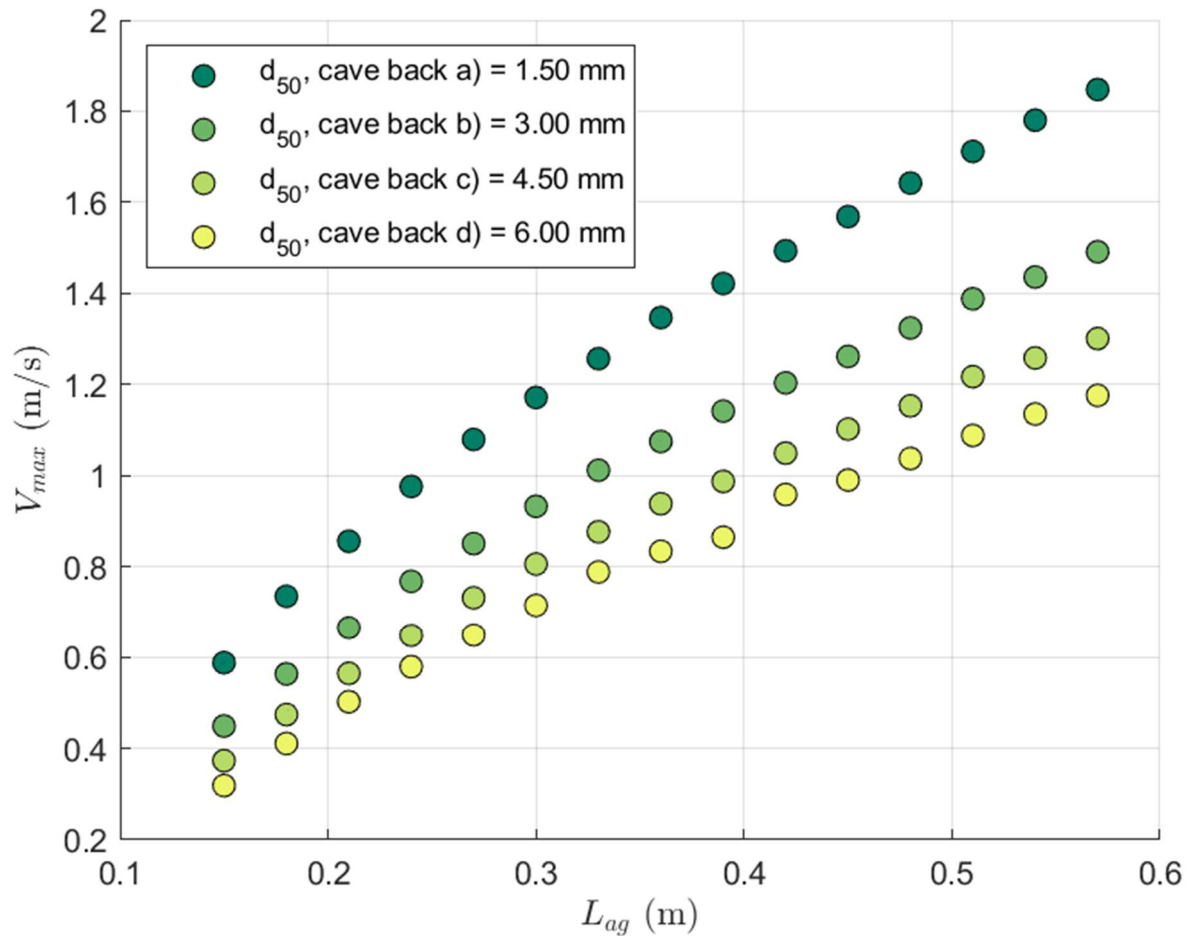


Figura 10: Comparación de la velocidad máxima del aire en función del largo del airgap para las cuatro curvas del cave back considerando un muckpile con $d_{50} = 6.0$ (mm).

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se presentan los valores para el caudal de salida en función del tiempo; para los 15 largos del airgap, para el caso en que se tiene un caveback con un $d_{50} = 6.0$ (mm) y un muckpile con $d_{50} = 3.0$ (mm). El caudal fue calculado al multiplicar el área unitaria de salida con su respectiva velocidad promedio. De igual modo, se tiene que los casos con mayor tamaño en el airgap presentan un mayor flujo promedio de aire, como se muestra en la Figura 10, donde los tres casos con los menores largos del airgap presentan una súbita disminución en el flujo de aire a partir de $t = 0.12$ (s), en comparación al resto de los casos.

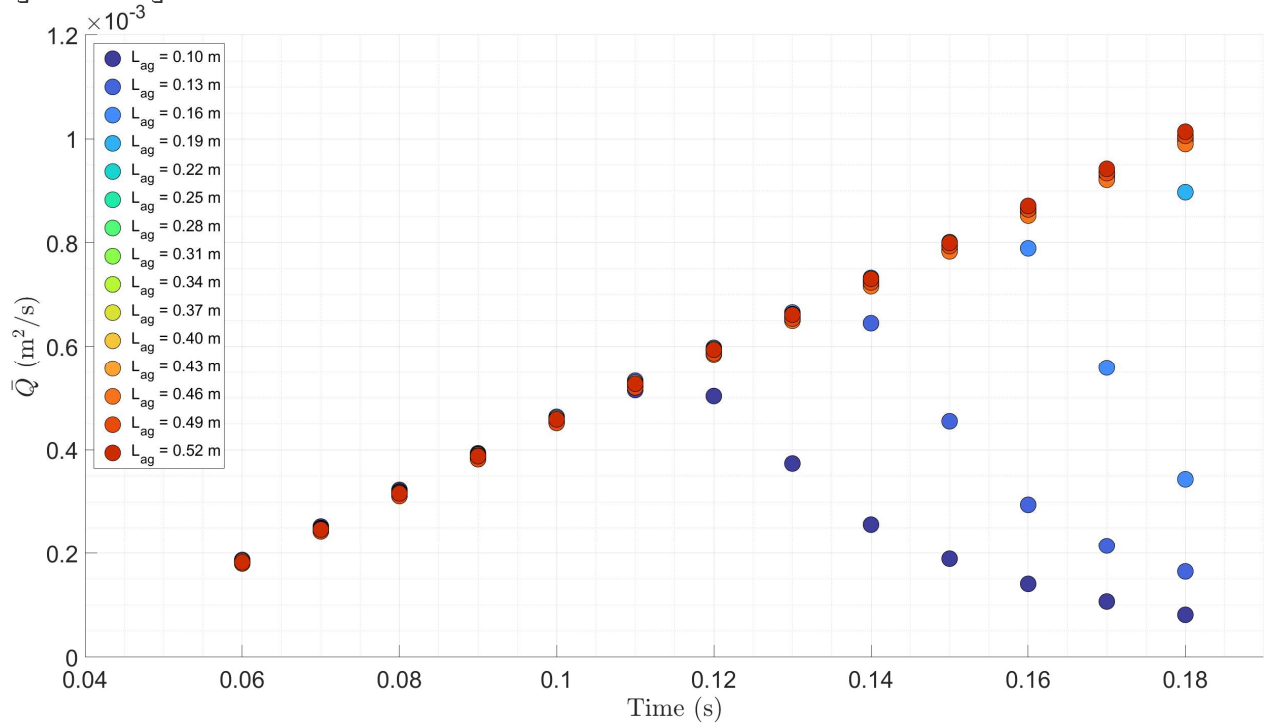


**Figura 11: Caudal promedio de aire en función del tiempo para los 15 tamaños de airgap, considerando un muckpile con $d_{50} = 3.0$ (mm) y un cave back con $d_{50} = 6.0$ (mm).
Fuente: Elaboración propia.**



6. Discusión de resultados

Se obtuvieron varios puntos a discutir en cuanto a los resultados. En primer lugar y como se esperaba a partir de la literatura, cuando se tiene un aumento en el tamaño del airgap, se tienen mayores velocidades de salida del aire; debido a que un mayor largo de airgap significa un mayor volumen de aire encerrado; que posteriormente es desplazado por las rocas del cave back, aumentando la magnitud del estallido. Por lo que estos resultados son congruentes con los obtenidos por otros autores.

En cuanto a la granulometría; se dedujo que esta también influye directamente en los resultados. Como se mencionó anteriormente, un mayor tamaño de partículas en el muckpile se traduce en mayores velocidades de salida; esto se debe a que fragmentos más grandes conllevan a una mayor porosidad en el medio y, por lo tanto, esto implica una mayor permeabilidad en el muckpile. Al presentar mayor permeabilidad, el aire tiene más espacios por donde fluir entre las partículas, ya que estos espacios significan una vía por donde el aire puede viajar con mayor facilidad hacia los puntos de extracción. Estos resultados también son consistentes con los trabajos realizados por todos los autores mencionados.

Por otra parte, y en el mismo contexto anterior, la granulometría del cave back también juega un rol preponderante en la velocidad máxima del aire. En contraste a la relación directamente proporcional que presenta el tamaño de partícula en el muckpile, con la velocidad del aire, aquí la velocidad de salida y el diámetro de los fragmentos presentan una relación inversamente proporcional, es decir, que, al disminuir el diámetro de las partículas, aumentan las velocidades observadas en los puntos de extracción. De manera análoga, esto se explica mediante la porosidad y permeabilidad del medio; partículas más pequeñas conllevan a una menor porosidad y a su vez, menor permeabilidad. Por lo tanto, el aire tiene menos espacios para filtrarse por las rocas que van cayendo y así, el volumen de aire que empuja el cave back es mayor, generando un aumento en la magnitud del airblast.

Este último punto, si bien no está estudiado en la literatura anterior, tiene congruencia con los resultados obtenidos, ya que como se explicó, se emplea el mismo razonamiento aplicado en la relación que tiene la porosidad y permeabilidad del muckpile; con la velocidad del aire, que sí fue estudiado en gran medida por los demás autores.



Por último, el caudal de aire que sale por los puntos de extracción presenta las mismas tendencias que los resultados obtenidos para la velocidad del aire, ya que, para calcular el flujo, se debe emplear la fórmula conocida para el caudal $\bar{Q} = \bar{V} \times A$, donde $A = 0.0079 \text{ (m}^2\text{)}$; este valor es una aproximación del área de salida del aire, al considerar la totalidad del área de la sección transversal del punto de extracción. Además, como se aprecia en la Figura 11, los tres casos con menores tamaños de airgap presentan una disminución súbita en el flujo de aire a partir de $t = 0.12 \text{ (s)}$, esto tiene sentido físico debido a que los tres casos en cuestión presentan el menor volumen de aire contenido en el airgap, por lo que también presentan el menor flujo de aire.



7. Modelo matemático

7.1. Confección modelo

En esta sección se presentará el modelo matemático propuesto para describir la velocidad máxima de salida del aire en función de los tres parámetros estudiados. La finalidad es encontrar un modelo general que pueda describir el fenómeno estudiado. Como se mencionó anteriormente, para desarrollar este modelo se empleará el teorema de Π de Buckingham (M. Rojas, et al., 2023).

En primer lugar, se optó por utilizar valores normalizados para la realización del modelo. Así, se tendrá la velocidad máxima de salida normalizada por la velocidad de entrada al muckpile V_0 , esta variable será la dependiente; como una función de las variables independientes; las cuales corresponden a los diámetros de las partículas, tanto del muckpile como del cave back y también el largo del airgap L_{ag} , como se presenta en la siguiente ecuación (16):

$$\frac{V_{max}}{V_0} = f(D_1, D_2, L_{ag}) \quad (16)$$

Por un lado, la velocidad de entrada V_0 se define como:

$$V_0 = \sqrt{2gH_{dp}} \quad (17)$$

Donde g corresponde a la gravedad y H_{dp} es la altura del punto de extracción. En este caso $H_{dp} = 0.05$ (m).

Además, se deben normalizar los valores de ambos d_{50} y el largo del airgap L_{ag} , obteniendo:

$$D_1 = \frac{d_{50,muckpile}}{H_{DP}}; \quad D_2 = \frac{d_{50,caveback}}{H_{DP}}; \quad L = \frac{L_{ag}}{H_{DP}} \quad (18)$$

Así, al reemplazar los términos de la ecuación (18) en la expresión (16), y asumiendo que la función f es un producto de monomios con parámetros de ajuste $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ y α_4 , se obtiene:

$$\frac{V_{max}}{V_0} = \alpha_1 \left(\frac{d_{50,muckpile}}{H_{DP}} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{d_{50,caveback}}{H_{DP}} \right)^{\alpha_3} \left(\frac{L_{ag}}{H_{DP}} \right)^{\alpha_4} \quad (19)$$



Combinando los valores de la expresión (18) en la ecuación (19), se consigue el siguiente modelo:

$$\frac{V_{max}}{V_0} = \alpha_1 D_1^{\alpha_2} D_2^{\alpha_3} L^{\alpha_4} \quad (20)$$

Aplicando la metodología de mínimos cuadrados, se obtuvieron los valores para los coeficientes; siendo estos valores, $\alpha_1 = 0.168$, $\alpha_2 = 0.211$, $\alpha_3 = -0.378$ y $\alpha_4 = 0.676$. Así, aplicando estos valores; reemplazando la ecuación (17) en la ecuación (20) y reordenando la expresión, se llega finalmente al modelo propuesto, mostrado a continuación:

$$V_{max} = 0.168 \sqrt{2gH_{DP}} D_1^{0.211} D_2^{-0.378} L^{0.676} \quad (21)$$

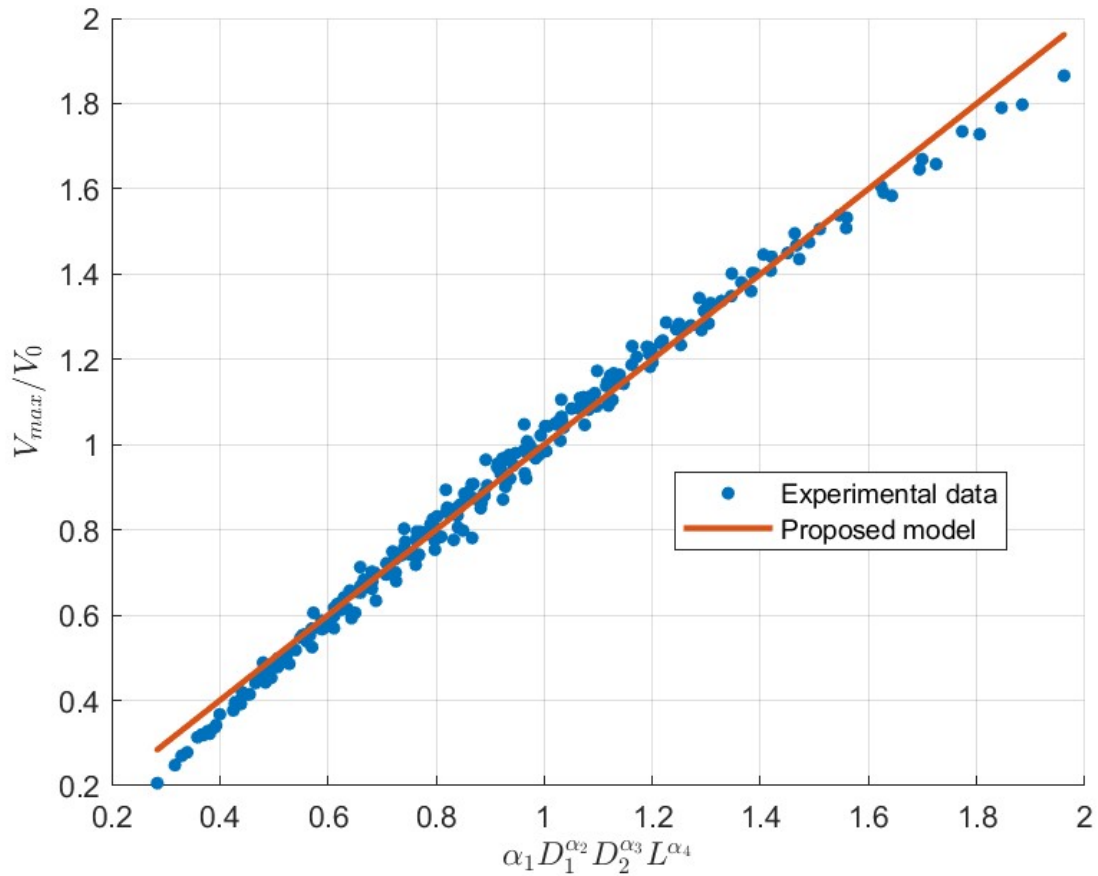


Figura 12: Comparación del modelo matemático propuesto para la velocidad máxima de salida del aire junto a los respectivos datos experimentales normalizados.

Fuente: Elaboración propia.



7.2. Validación modelo

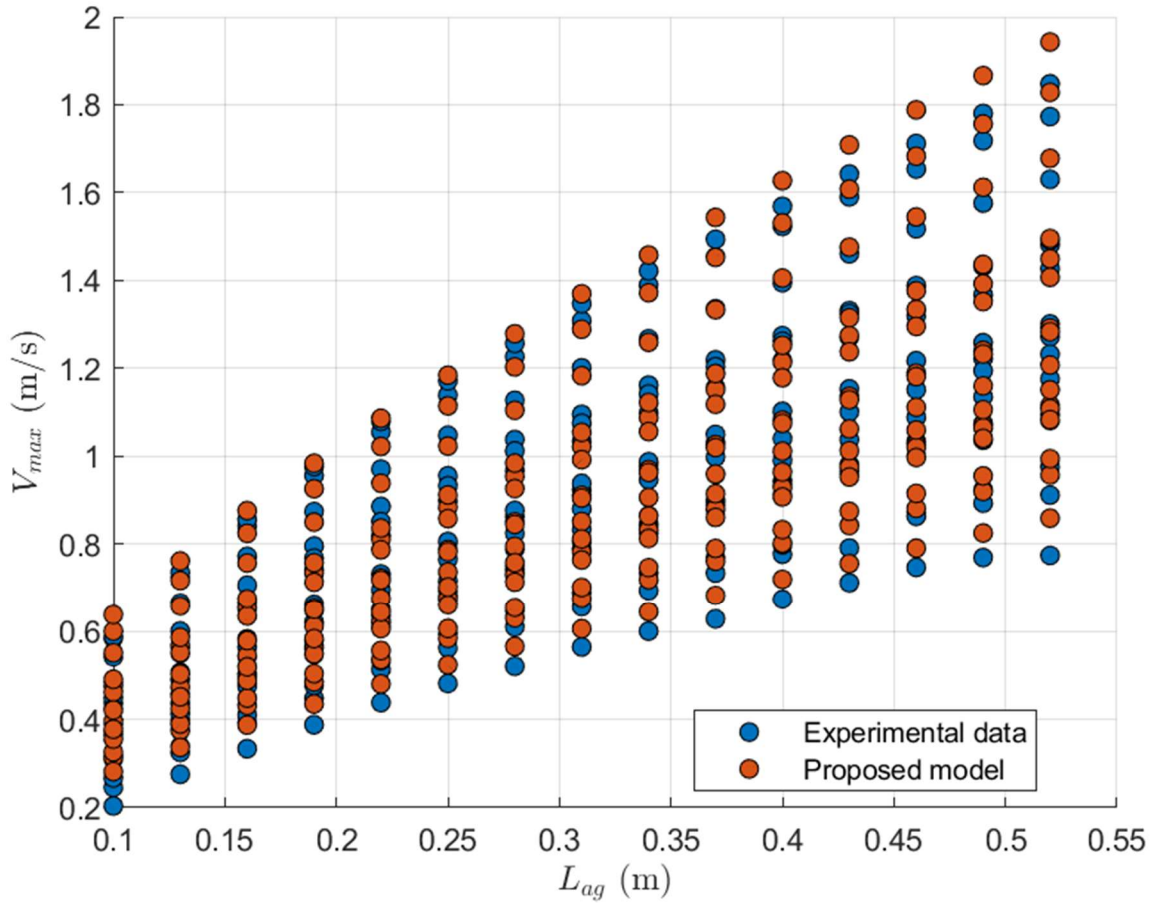


Figura 13: Ajuste del modelo matemático en relación con los datos experimentales.
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se presenta la correlación entre los datos empíricos y el modelo propuesto, los que se ajustan en una recta, tal como se aprecia en la Figura 11. Estos resultados dan a entender que el modelo se ajusta de buena manera a los datos experimentales. También es posible comparar estos datos con el modelo. Esto se ve representado en la Figura 12, donde se presentan los 240 datos experimentales para las velocidades máximas, junto a los valores calculados por el modelo. Aquí se observa una pequeña diferencia en los valores de la velocidad, sin embargo, a partir de estos y junto a la correlación que se aprecia en la Figura 11 es posible afirmar la capacidad del modelo por describir la velocidad máxima de salida.

A continuación, se presenta también la comparación de los modelos confeccionados en la literatura mencionada, con el modelo propuesto en este trabajo. Como los modelos aplican diferentes parámetros de entrada debido a las diferentes condiciones en las que se realizaron las investigaciones, esta comparación se



emplea solo como una referencia para observar si los resultados de la investigación se encuentran dentro del rango u orden de magnitud de los trabajos ya hechos.

Para el modelo de Palma et al., es necesario utilizar la permeabilidad del medio rocoso, la cual se asume como $K = 5 \times 10^{-7} \text{ (m}^2\text{)}$. Este valor de permeabilidad se emplea para calcular el número de Darcy usado en el modelo. Por otra parte, para el modelo desarrollado por Morales et al., es necesario utilizar el espesor del muckpile, siendo este valor $L_T = 2 \text{ (m)}$. Los modelos de Palma et al. y Rojas et al. requieren como parámetro de entrada el valor promedio del material fragmentado. El modelo propuesto en este estudio usa el valor del d_{50} , tanto del muckpile como del caveback como parámetros. También es necesario usar la altura del punto de extracción para los modelos de Rojas et al., Morales et al., y el desarrollado en esta tesis. Por último, los cuatro modelos en cuestión requieren del largo del airgap como valor de entrada. Todos estos parámetros se encuentran detallados en la Tabla 3, donde se muestran junto a sus respectivos valores.

Tabla 3: Parámetros empleados para la comparación de los modelos junto a sus respectivos valores.

Parámetro	Valor
Permeabilidad, $K \text{ (m}^2\text{)}$	5.0×10^{-7}
Diámetro partícula muckpile, $d_1 \text{ (m)}$	0.5
Diámetro partícula caveback, $d_2 \text{ (m)}$	0.2
Altura punto de extracción, $H_{dp} \text{ (m)}$	4.2
Altura muckpile, $L_T \text{ (m)}$	2.0
Largo airgap, $L_{ag} \text{ (m)}$	[10 : 10 : 60]

Así, en la Figura 13, es posible observar de manera visual y cuantitativa las diferencias entre cada uno de los modelos. Es adecuado afirmar que todos estos entregan valores dentro del mismo orden, y en específico, el modelo propuesto resulta en valores intermedios entre los trabajos de Rojas et al., y Morales et al., para valores de $L_{ag} \geq 40$ por lo que se puede confirmar la capacidad del modelo en describir la velocidad máxima del aire; a pesar de las simplificaciones geométricas consideradas y la realización del trabajo a una escala de laboratorio.

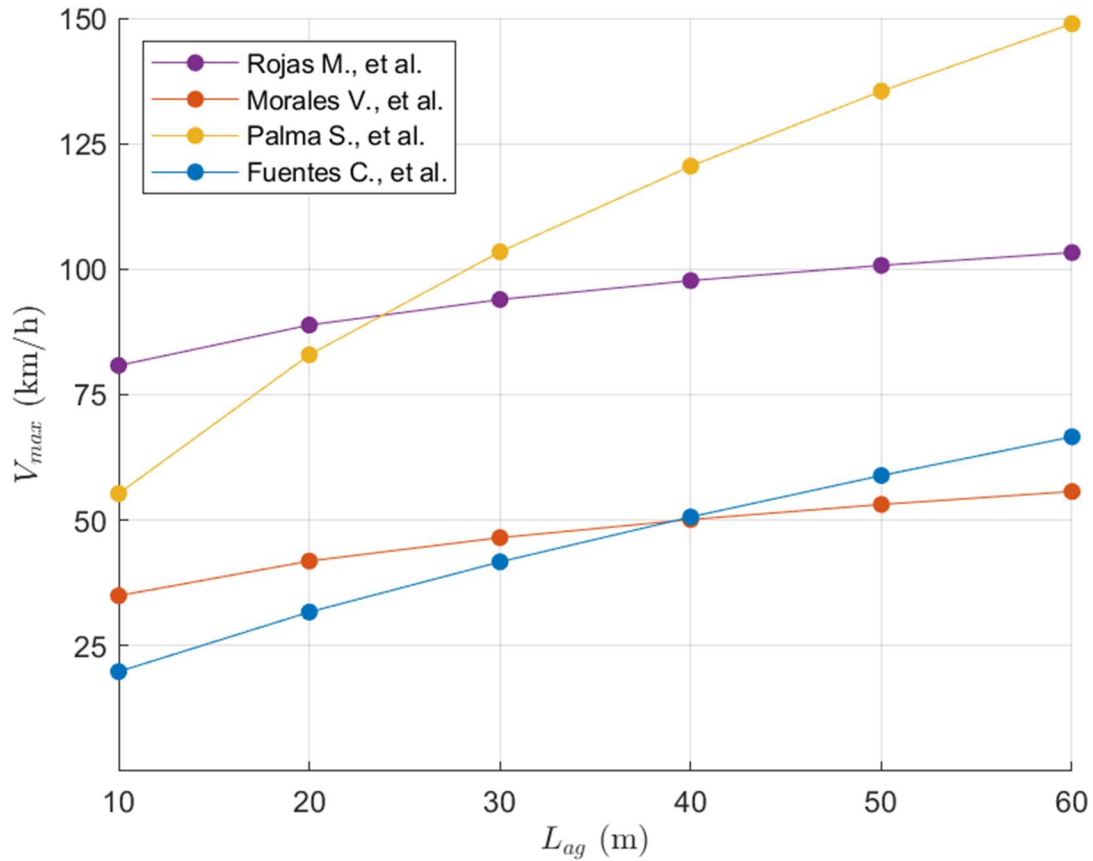


Figura 14: Comparación entre los modelos realizados por otros autores y el modelo propuesto en este trabajo.
Fuente: Elaboración propia.

Las diferencias entre los resultados de este modelo y los modelos realizados en trabajos anteriores pueden deberse a la implementación de una curva granulométrica simple, que posee diferentes tamaños para las partículas. En los otros estudios se asumía un tamaño promedio, donde todas las rocas tenían la misma dimensión. Por ello, en la confección de este modelo, se empleó el d_{50} de la curva, ya que este término puede ser usado como el tamaño característico de la curva y permite realizar la comparación.

Por otra parte, la diferencia entre los resultados puede deberse al método en sí, ya que, por un lado, FEM es un método continuo, y, por otro lado, LBM es una manera simplificada de resolver la dinámica del fluido, ya que no emplea la ecuación de Navier-Stokes. Como en este estudio se utilizó DEM, (método discreto) y el modelo $k - \epsilon$, (el cual computa las soluciones para la ecuación RANS), para resolver la dinámica del aire, las diferencias pueden deberse a las diferentes consideraciones y asunciones hechas para cada método. Por último, es posible que las diferencias también se deban a las simplificaciones geométricas hechas en la batea y la escala a laboratorio utilizada para el estudio.



8. Conclusiones y recomendaciones

A partir del estudio se puede llegar a varias conclusiones. En primer lugar y en cuanto a la metodología, es posible concluir que el método de acople entre DEM-CFD es una herramienta precisa capaz de describir el fenómeno de airblast, a pesar de las simplificaciones hechas a la batea y la escala empleada. En este contexto, los resultados fueron congruentes con otros trabajos realizados con anterioridad. Con respecto a la misma materia, cabe destacar que el método DEM-CFD utiliza mayores recursos computacionales a diferencia de los métodos usados en los estudios anteriores, siendo una desventaja al comparar las metodologías; pero a su vez, DEM-CFD presenta la ventaja de describir con mayor apego la realidad del fenómeno, al emplear dos métodos idóneos para resolver la dinámica tanto del material particulado como del fluido. Además, cada trabajo asume distintas simplificaciones y condiciones, por lo que la comparación hecha es relativa y se basa fundamentalmente en los resultados empíricos obtenidos por los otros autores. Así, este estudio evalúa la utilidad del acople, pero esto no es suficiente para determinar cuál de todos los métodos es más preciso en relación con los recursos computacionales necesarios para cada uno.

En cuanto a los parámetros estudiados, se llega a la conclusión de que los tres tienen directa relación con los resultados de la velocidad máxima del aire. Por un lado, se tiene que mientras aumenta la granulometría del muckpile, aumenta la velocidad del aire, debido al aumento de la porosidad y por lo tanto de la permeabilidad del suelo. En esta misma línea, se obtiene una relación inversa en cuanto a la granulometría del cave back, ya que, al disminuir el tamaño de las partículas, disminuye la porosidad y permeabilidad del bloque que cae, dificultando el flujo de aire entre las partículas y, por lo tanto, aumentando el volumen de aire que empujan las rocas, aumentando así la magnitud del estallido de aire. Por último, al aumentar el tamaño del airgap se observó un aumento en la magnitud de la velocidad, como era esperado, ya que al aumentar el espacio entre el material fragmentado y el cave back, aumenta también el volumen de aire que después es expulsado por los puntos de extracción.

Por otro lado, el modelo matemático se ajusta de buena manera con los datos experimentales, el cual emplea los tres parámetros estudiados como variables de entrada. Además, la comparación da cuenta de que el modelo propuesto entrega resultados dentro del mismo orden que los modelos anteriores, y también es aplicable a una escala real, ya que se normalizan los datos y estos son independientes del sistema de unidades utilizado.



A partir de los resultados y conclusiones se recomienda estudiar la incidencia del espesor del material fragmentado en la velocidad de salida del aire por los puntos de extracción. También se recomienda realizar el mismo estudio, empleando partículas con formas realistas y dos métodos diferentes, por un lado, la metodología DEM-CFD y por otro, FEM; para evaluar la relación entre los costos computacionales y los resultados obtenidos, y así decidir cuál de los métodos es más conveniente. También se recomienda considerar la confección de un modelo matemático que incluya los parámetros estudiados en todos los trabajos; la granulometría del cave back y muckpile, el tamaño del airgap y el espesor del material fragmentado. Con estas cuatro variables se podría conseguir un modelo matemático que considera los aspectos más influyentes y determinantes para el fenómeno, sin complicar en demasía el modelo. Por último, es recomendado desarrollar un estudio de laboratorio donde se recree un estallido de aire, para así calibrar y validar de manera empírica los resultados.



9. Referencias

- Brown, E. (2002). Block caving geomechanics. *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre*.
- Codelco. (s.f). *Proyecto Chuquicamata Subterránea*. Obtenido de https://www.codelco.com/mina-chuqui-subterranea/prontus_codelco/2016-04-05/194304
- Consejo Minero. (Septiembre de 2023). *Cifras actualizadas de la minería*. Obtenido de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2023/09/Cifras-Actualizadas-de-la-Mineria-2023-Septiembre.pdf>
- Escobar, R., & Tapia, M. (2000). An underground air blast – Codelco Chile – Division Salvador. *MassMin 2000*.
- Galindo-Torres, S., et al., (2018). An airblast hazard simulation engine for block caving sites. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.034>
- Gómez, R. (2014). Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving. *Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile*.
- Gómez, R., & Labbé, E. (2019). Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del “block caving”. *Boletín Geológico y Minero*. doi: 10.21701/bolgeomin.130.1.011
- Merino, L., & Tapia, R. (2001). Cavability of Inca Sector, El Salvador Mine. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*.
- Morales, V., et al., (2023). Evaluación de las velocidades del aire en función del espesor de la capa de material fragmentado en casos de airblast en minería de caving. *Memoria de Ingeniera Civil de Minas. UTFSM*.
- New South Wales Government. (s.f). *Northparkes Air Blast*. Obtenido de <https://www.resourcesregulator.nsw.gov.au/safety/safety-events-and-education-programs/learning-from-disasters/learning-from-disasters/1999>
- Oh, J., et al., (2017). Evaluation of air blast parameters in block cave mining using particle flow code. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1342064>

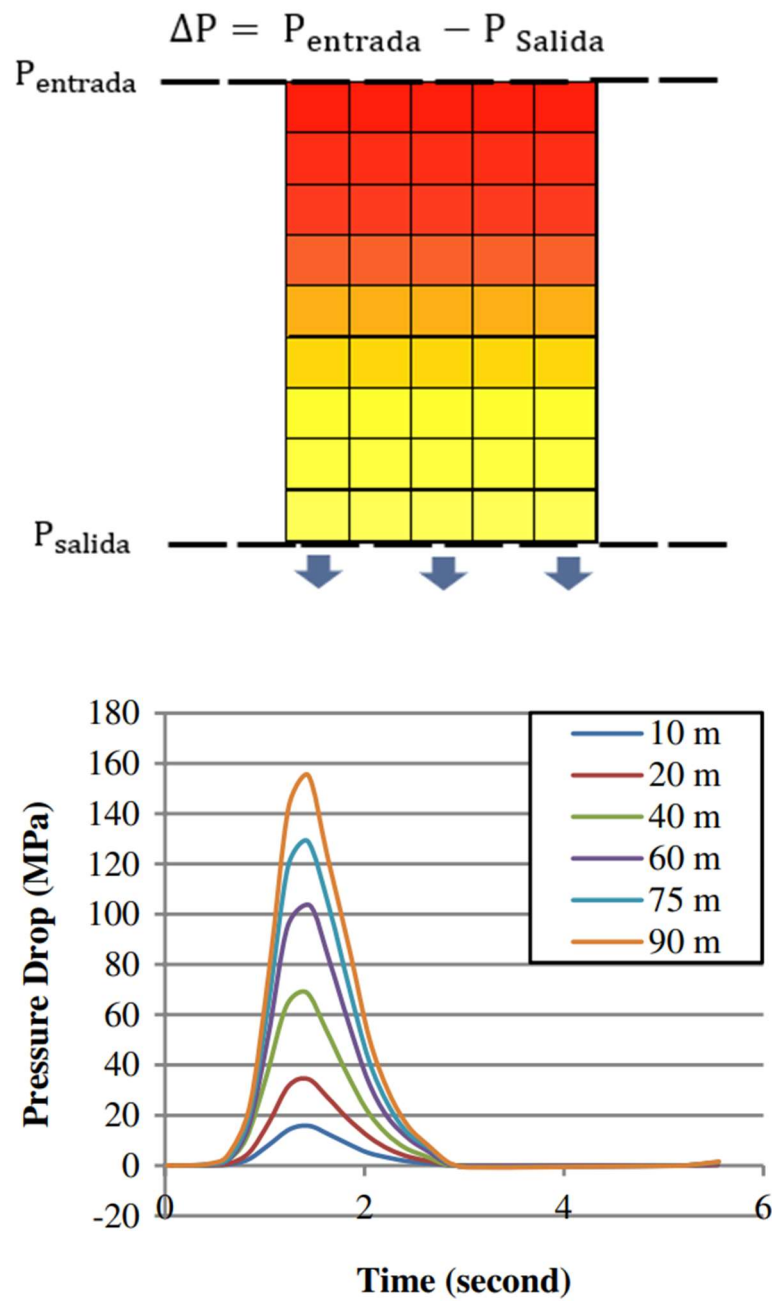


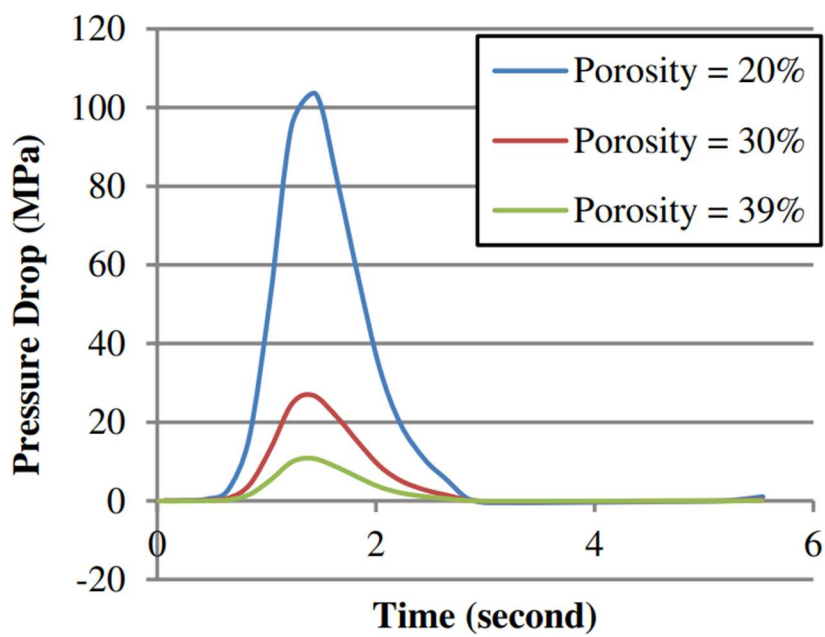
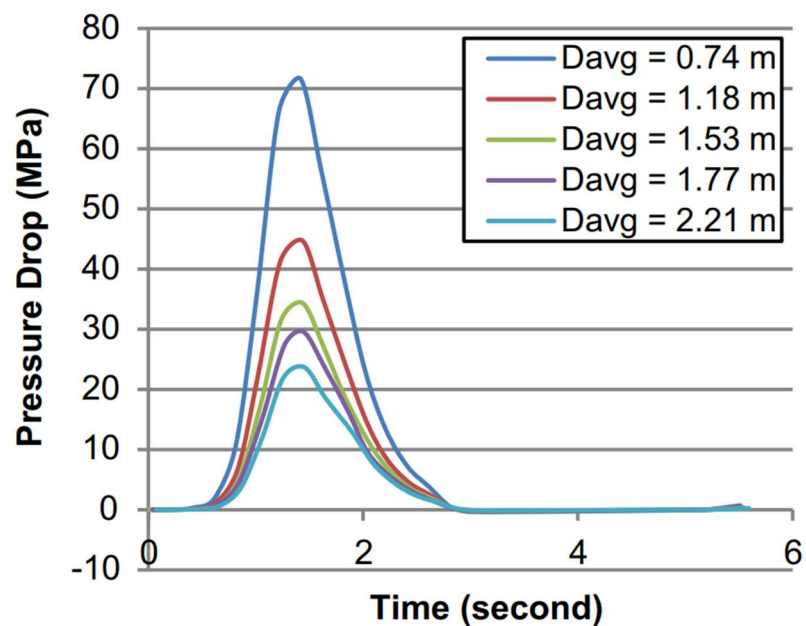
- Palma, S., et al., (2019). Universal laws for air velocities in airblast events during block caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.12.007>
- Rojas, M., et al., (2023). A novel model for air velocities in airblast events in block caving mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105559>
- University of Washington. (s.f). *Standard $k-\epsilon$ Model*. Obtenido de <https://courses.washington.edu/mengr544/handouts-10/Fluent-k-epsilon.pdf>
- Simscale. (s.f). *$k-\epsilon$ Turbulence Model*. Obtenido de <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-epsilon/>



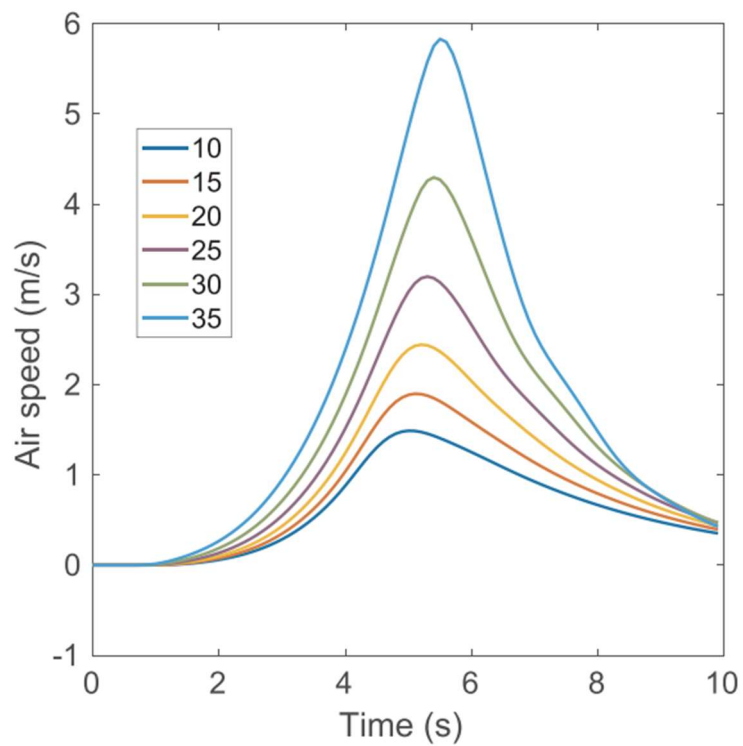
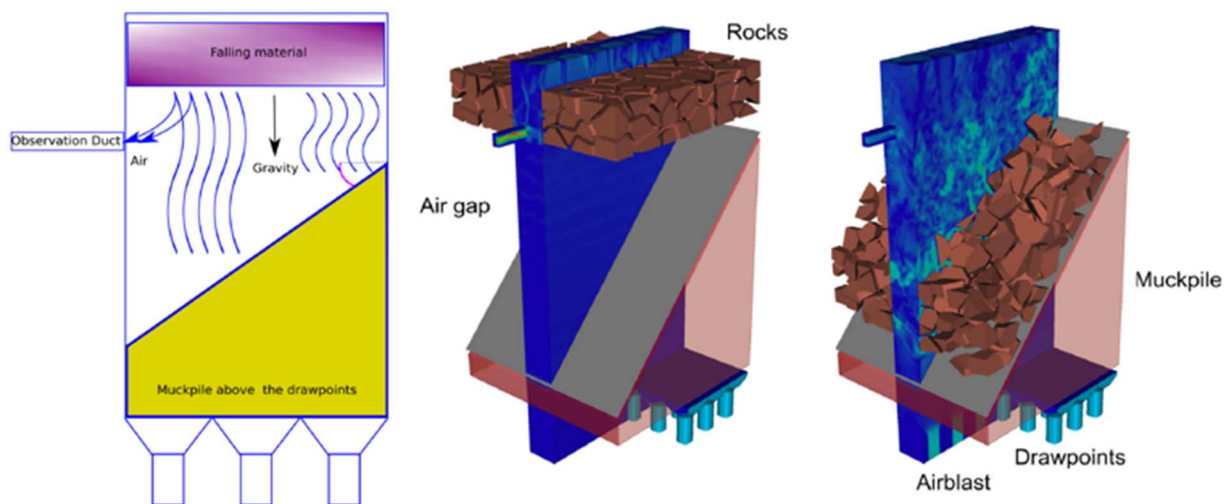
10. Anexos

A continuación, se adjuntan algunos de los resultados obtenidos en los trabajos de autores anteriores:

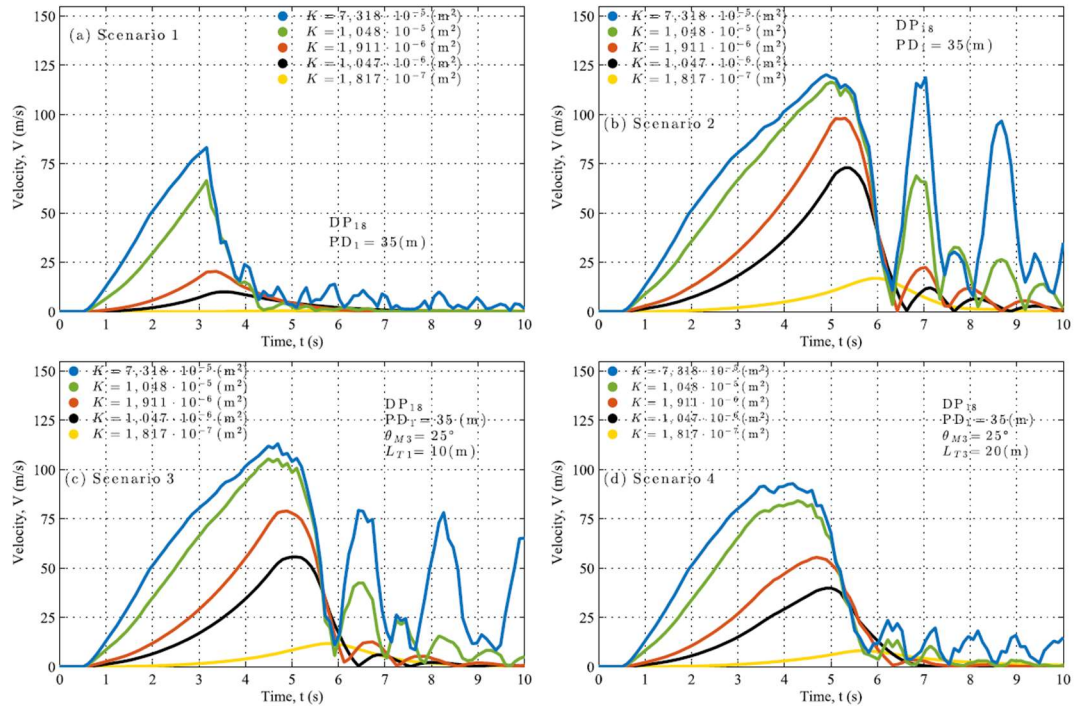
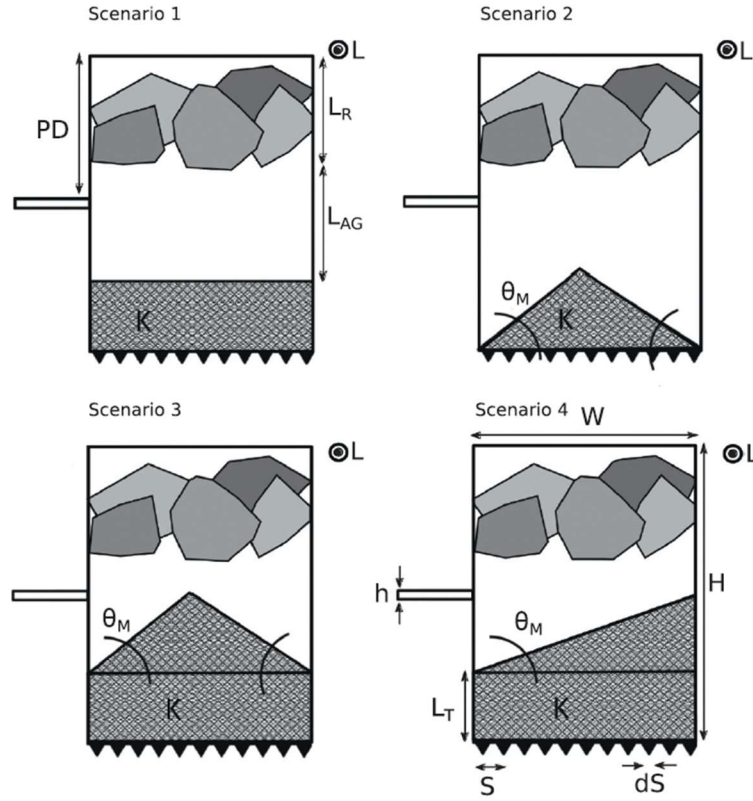


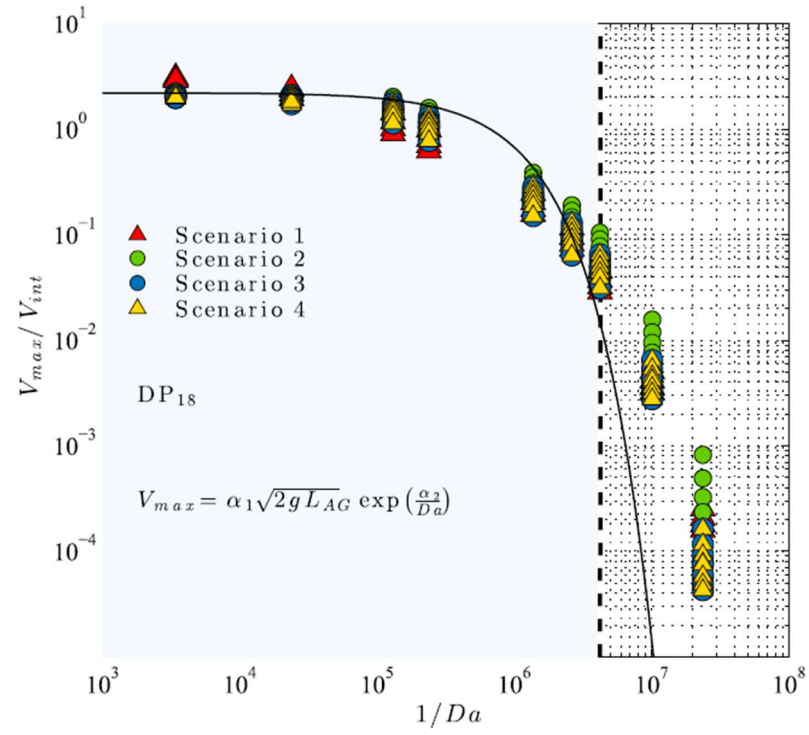


Metodología y resultados obtenidos por Oh J., et al. (2017)

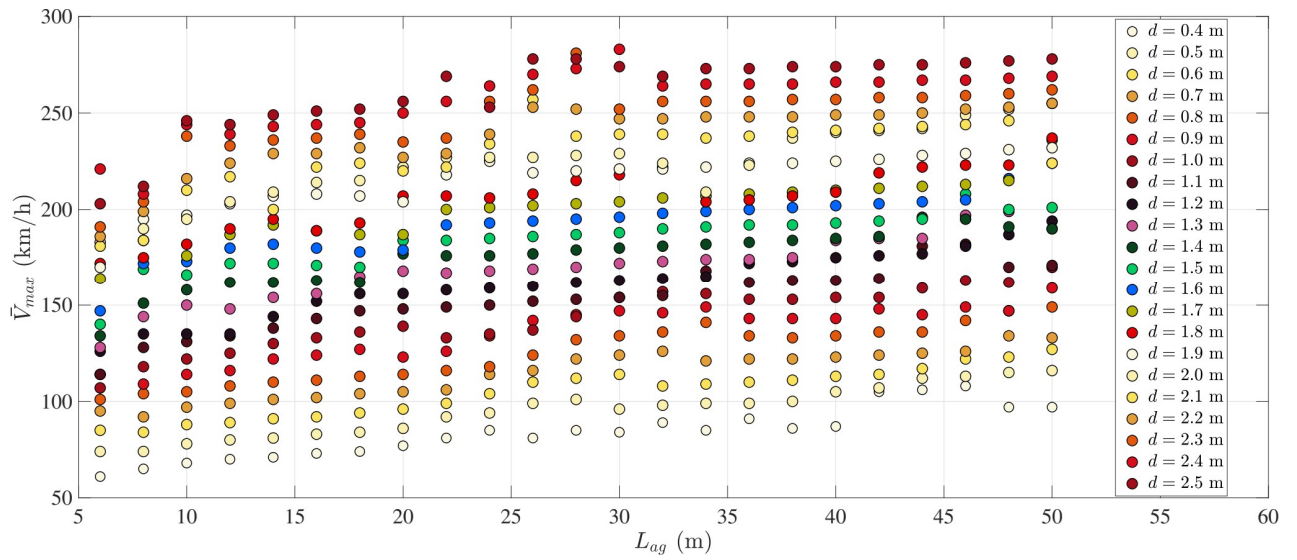
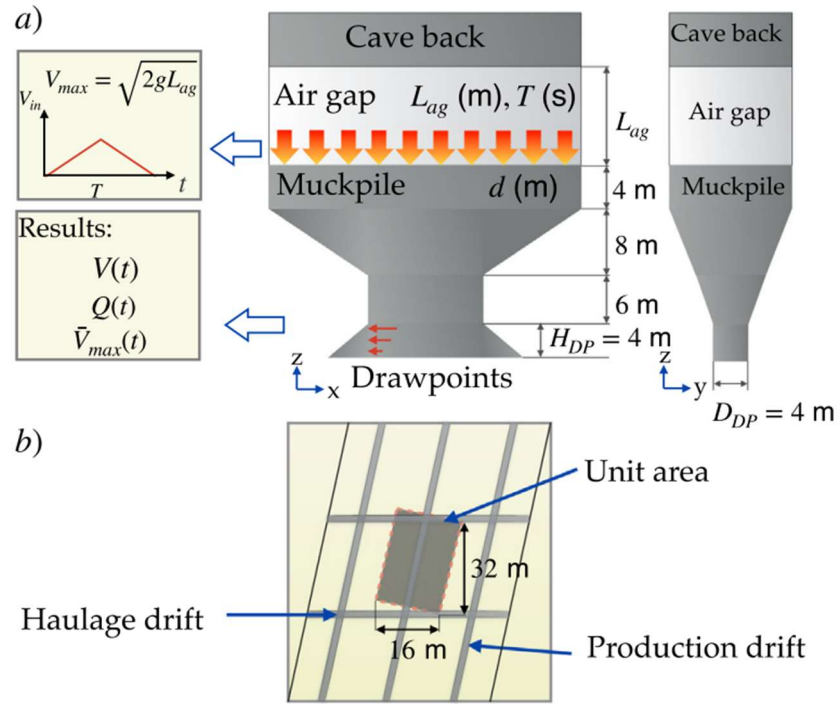


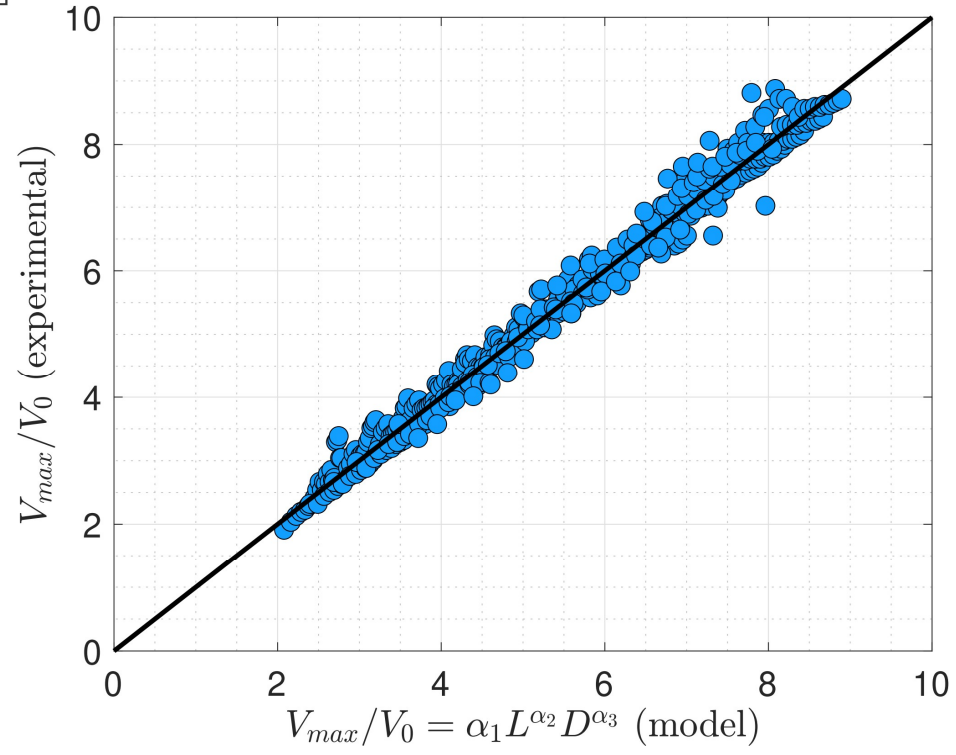
Método y resultados obtenidos por Galindo-Torres., et al. (2018)



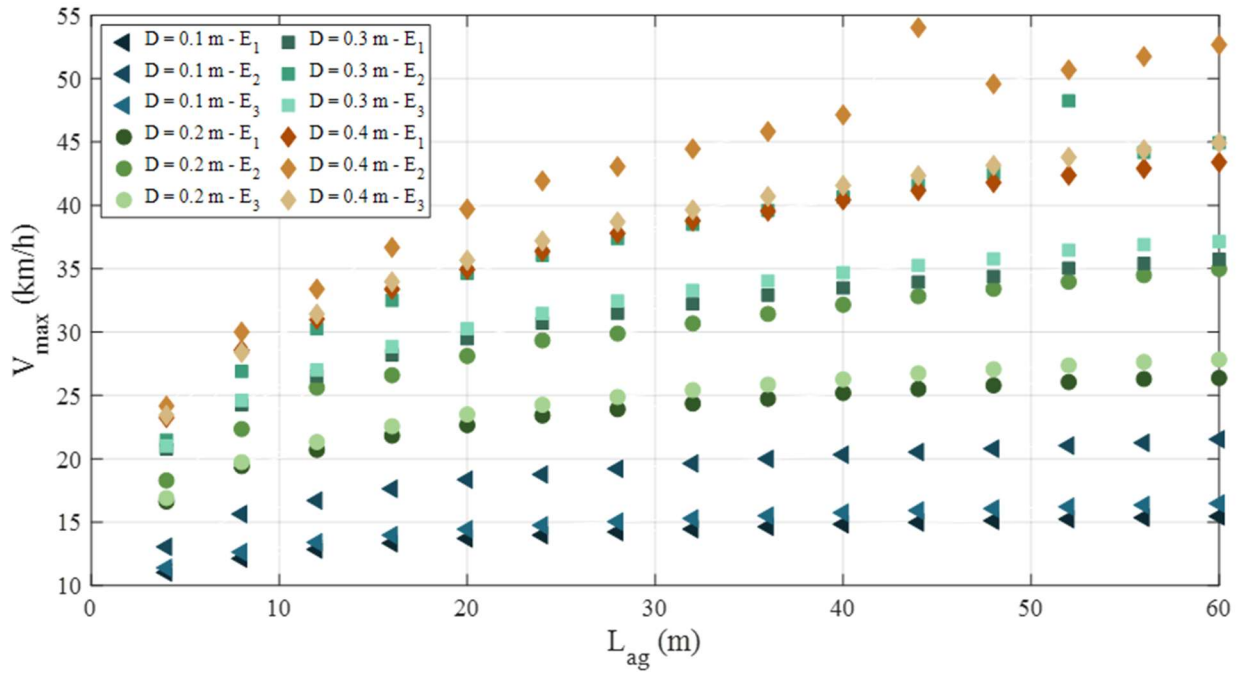
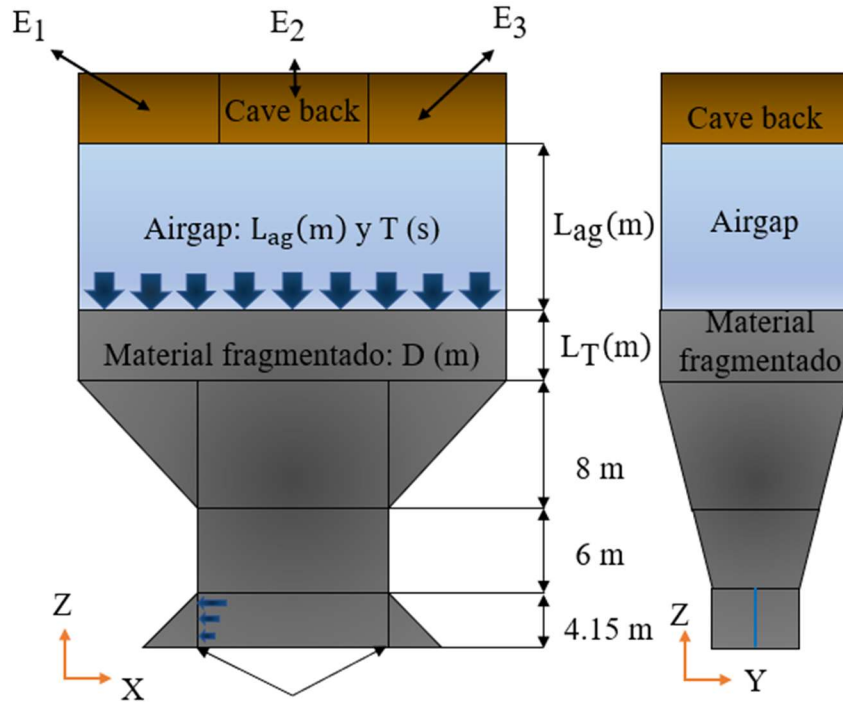


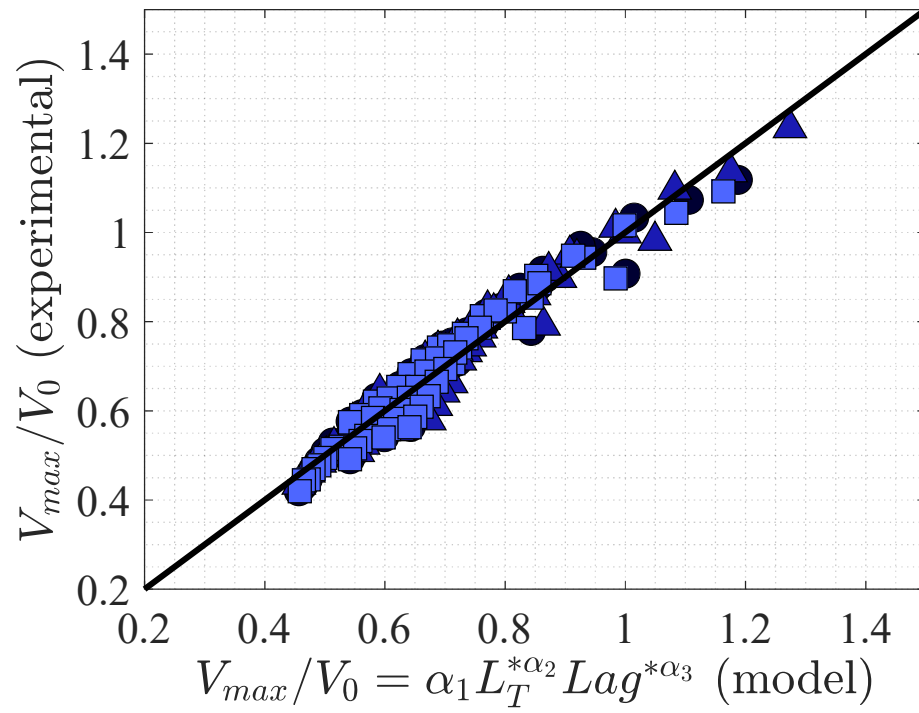
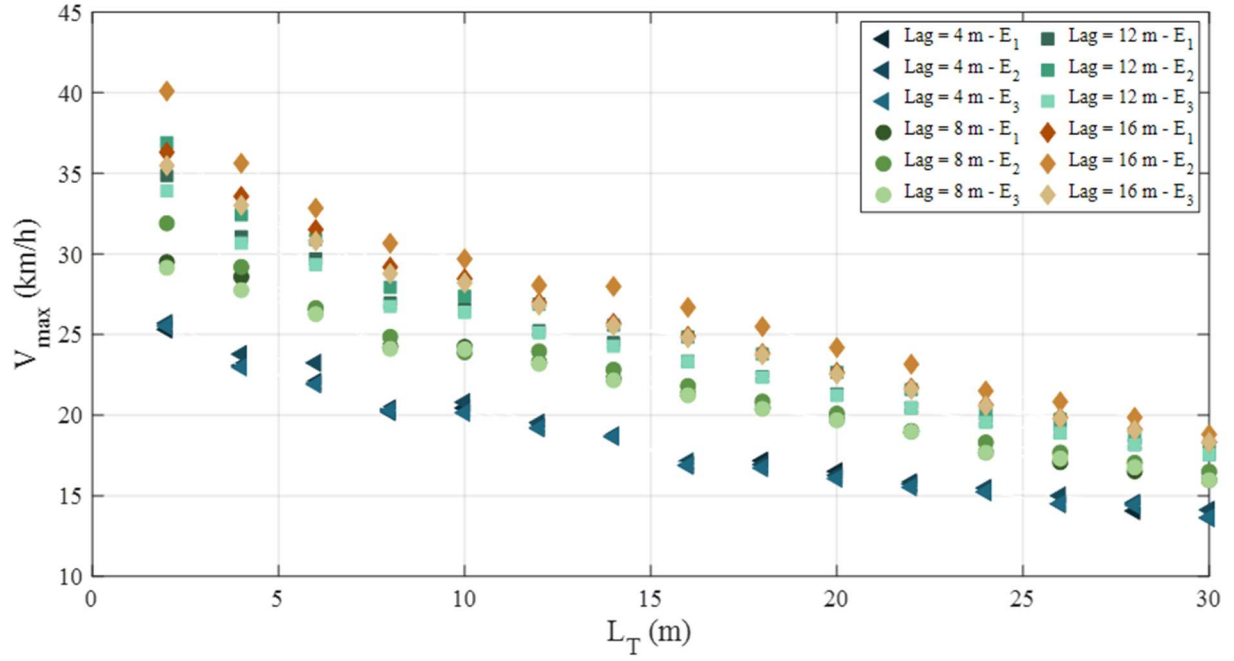
Método, resultados y modelo obtenidos por Palma S., et al. (2019)





Método, resultados y modelo obtenidos por Rojas M., et al. (2023)





Métodología, resultados y modelo obtenidos por Morales V., et al. (2023)