



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE COLGADURAS**

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

**SEBASTIÁN ANTONIO LÓPEZ DÍAZ**

**PROFESOR GUÍA:  
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MIGUEL FUENZALIDA NAVARRETE  
DIEGO OLIVARES BRÛLÉ**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2016**

## RESUMEN

La minería de *block/panel caving* es considerada actualmente una de las mejores opciones para explotar yacimientos masivos a gran productividad y a bajo costo. Este método de explotación basa su funcionamiento en el flujo gravitacional del mineral, es por ello que resulta fundamental asegurar tanto el hundimiento de la roca como la continuidad de la extracción de la misma. Existen ciertos problemas en la continuidad operacional de una mina de caving, tal como la formación de colgaduras y la aparición de sobre tamaños, éstos interrumpen el flujo normal de mineral en los puntos de extracción y además, para solucionar el problema es necesario recurrir a explosivos, lo que implica un aumento de los costos e interferencias producidas por la tronadura de éstos.

Numerosos estudios en silos y en piques de traspaso han sido realizados con el fin de predecir la formación de colgaduras, sin embargo, la información respecto a la formación de colgaduras en puntos de extracción es limitada. El laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile ha estudiado distintas variables que tienen un efecto en torno a la formación de colgaduras como lo son: esfuerzos verticales, finos, humedad, granulometría y variables de diseño para el sistema de extracción de minería continua (Fuenzalida, 2012; Orellana, 2012; Gómez, 2014 y Olivares, 2014). Todas las variables anteriores son de importancia para entender la formación de colgaduras considerando distintos escenarios, sin embargo, aún existen variables a las cuales no se les ha medido el impacto.

El objetivo general de ésta investigación es cuantificar experimentalmente el efecto de las variables de diseño de las bateas y la granulometría en la frecuencia de colgaduras y sobre tamaños. Para cumplir ello se propuso una metodología experimental que consideró un modelo físico construido a partir de una búsqueda de información respecto de las bateas y equipos utilizados actualmente, así como la granulometría observada en puntos de extracción de la Mina Esmeralda de El Teniente.

El plan experimental consistió en la realización de 7 experimentos a una escala 1:50, considerando tres distintos tipos de bateas, la primera considerada como caso base y dos más en las cuales se varió la longitud y la altura respectivamente. Para la batea del caso base, se consideraron tres granulometrías distintas (fina, intermedia y gruesa). Mientras tanto, para la batea corta como para la batea alta solo se utilizó la granulometría fina y gruesa.

Además, se realizó un análisis de imágenes con el fin de comprender qué tipo de tamaños y que combinación de éstos son los que participan en la formación de un arco estable de una colgadura, para ello se analizaron imágenes de un punto de extracción en estado colgado y en estado normal.

Las principales conclusiones fueron que: como se esperaba, la masa entre colgaduras aumentó a medida que la granulometría utilizada fue más fina, por otro lado, un aumento en el ángulo de la batea resultó en un aumento en la masa entre colgaduras y al reducir el largo de la batea la masa entre colgaduras aumentó. La masa entre sobre tamaños aumentó a medida que la granulometría utilizada fue más fina, por otro lado, no existió una correlación entre la aparición de sobre tamaños y la geometría de la batea y se corroboró que la aparición de sobre tamaños es muy variable. Respecto al análisis de imágenes, se concluyó que dentro de la batea existe un fenómeno denominado segregación, el cual consiste en el movimiento preferencial de finos y una acumulación de gruesos dentro de la batea, esto entrega nuevas condiciones para la predicción de colgaduras. Como regla se estableció que sobre un 25-30% de gruesos (tamaño medio sobre 28% del ancho punto de extracción) existe un 60% de probabilidad de no flujo.

## ABSTRACT

Block/panel caving mining is actually considered to exploit bulk ore deposits with high productivity and low cost. This exploitation method is based in the correct performance of ore flow gravity, therefore, it is fundamental to ensure both caving of the rocks and continuity of extraction. There are certain problems in the operational continuity of a caving mine, such as the formation of hang ups and the appearance of oversizes, these problems disrupt the normal ore flow in drawpoints and also, to solve these problems it is necessary to use explosives, which implies an increase in costs and an increase of operational interferences, due to the blasting of hang ups and oversizes.

A large number of studies about silos and ore passes have been done in order to predict the hang ups formation. However, the data about formation of hang ups is limited. The Block Caving Laboratory of Universidad de Chile has researched different variables that have an impact in hang ups formation, such as: vertical loads, fines, humidity, fragmentation and geometry variables for extraction system of continuous mining. The last variables are very important to understand the hang up formation considering different scenarios, however, it exists variables that does not have a measured effect yet.

The aim of this research is to understand which is the effect of drawbell design and ore fragmentation in hang ups frequency, oversizes frequency and kind of flow. In order to accomplish the objective, a methodology was proposed, using a scaled physical model constructed based on a benchmarking about drawbells and equipment used actually in block caving mines. The particle size distribution was scaled from the observed fragmentation in drawpoints of Esmeralda Mine in El Teniente.

The experimental plan consisted in seven experiments conducted in a model with a scale 1:50. Three different kinds of drawbells were tested, the first was considered as the case base and the other two had different length and the height respectively. For the base case drawbell 3 scaled fragmentations were tested (fine, intermediate and coarse). Meanwhile, for the short and high drawbell, only the fine and the coarse fragmentations were used.

A secondary objective of this engineering thesis, was to develop an image analysis and understand what kind of size and what kind of mixture of particles were the principal components of a formation of a hang up. Consequently, an image analysis of a drawpoint was carried out considering two status: hang up state and normal flow state.

The main conclusions were: As expected, the mass between hang ups increases with finer fragmentation, on the other hand, an increase in the drawbell angle increases the mass between hang ups and a decrease in the drawbell length increases the mass between hang ups. The mass between oversizes increases with finer fragmentation, furthermore it did not exist a relation between oversize frequency and drawbell geometry and it was checked that the oversizes apparition is very variable. About the image analysis, it was concluded that inside of drawbell occurs a phenomena called segregation, which it consists in preferential movement of fines and an accumulation of coarses inside of drawbell, this gives new conditions to hang ups prediction, as a rule, it was established that above 25-30% of coarse size (mean size above 28% of drawpoint width) exists a 60% of no flow probability.

## AGRADECIMIENTOS

*Quisiera agradecer principalmente a mi familia (Mamá, Momito, Yiyo y Mati), sin ellos sin duda que no habría podido lograr esto. Siempre me han apoyado en cada una de mis decisiones y, aunque a veces iba en contra de la corriente, ellos siempre confiaron en que podía lograr cada uno de los desafíos que he tomado en mi vida. Sin esa confianza, sin ese apoyo constante que me dieron y me dan cada uno de los fines de semana que viajo a verlos, esto habría sido mucho más difícil.*

*También, y no menos importante, quiero agradecer a mi princesa, Lore. Ha estado conmigo los últimos tres años de mi carrera y gracias a ella aprendí a ordenarme, a ser más responsable y a cumplir con mis deberes. Su apoyo incondicional, fuerza y amor que me entrega cada día me hacen el hombre más feliz del mundo.*

*No quiero dejar a nadie fuera de mis agradecimientos, por lo que también le agradezco a mis abuelos, tíos, primos, amigos, etc. Y a toda la gente de mi querido pueblo Entre Ríos, pueblo pequeño ubicado en la comuna de Molina, dónde la mayoría siempre me preguntó cómo iba con mi carrera y me dio ánimo para seguir adelante.*

*Le agradezco al fútbol, baby fútbol y futbolito por la inmensa cantidad de amigos que me entregó a lo largo de mi carrera. Sin duda son dos los equipos con los que pasé muchas alegrías: Remechones y J.P., con los últimos aún seguimos jugando y ojalá que lo sigamos haciendo por mucho tiempo más.*

*Le agradezco a todos los amigos que he conocido y con los que he compartido durante mi carrera, con algunos ahora comparto mucho menos con otros más, pero con cada uno de ellos pasé buenísimos momentos. Se viene a mi mente cada carrete en el cual solamente íbamos a pasarlo bien sin siquiera saber que pasaría, eso era impagable, las anécdotas son imborrables.*

*Respecto a mi memoria, le agradezco en primer lugar a mi profesor guía Raúl Castro, por confiarme éste importante trabajo y también por compartir su infinita sabiduría en minería y block caving. En segundo lugar a Diego Olivares (Doli), sin duda fue un inmenso aporte ayudándome a sacar el proyecto a flote en el momento en que más complicado me vi. Y en tercer lugar a Miguel Fuenzalida, quién fue un gran aporte para mejorar y entender de mejor manera todo lo que había hecho.*

*Finalmente, le agradezco a toda la gente del BCLab, en especial a aquellos que se dieron el tiempo de sentarse conmigo junto al modelo experimental a “tirar saca”. Y también agradecerles por los buenos momentos y por tener siempre esa disposición a “tirar la talla” y reírnos, estoy convencido que cuando hay buena onda y alegría el trabajo se hace mejor y se avanza más. Sergio, Asieh, Doli, Mena, Lefonse, Gerson, Lenin, Jimmy, Casafont, Vane, Liz, Yina y David. ¡Gracias!*

# TABLA DE CONTENIDO

ABSTRACT .....	ii
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    Introducción .....	1
1.2    Motivación del trabajo .....	2
1.3    Objetivos .....	3
1.3.1    Objetivo general .....	3
1.3.2    Objetivos específicos .....	3
1.4    Alcances .....	4
1.5    Metodología de investigación .....	4
1.6    Contenidos por capítulo .....	6
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1    Introducción .....	7
2.2    Minería de caving y flujo gravitacional .....	7
2.3    Comportamiento de materiales granulares.....	11
2.4    Análisis de similitud .....	12
2.5    Colgaduras en puntos de extracción .....	13
2.5.1    Colgaduras de arcos mecánicos .....	13
2.6    Modelos físicos de colgaduras .....	15
2.6.1    Estudio del flujo gravitacional confinado y su aplicación a minería de caving (Fuenzalida, 2012).....	15
2.6.2    Evaluación de variables de diseño del sistema de minería continua a partir de experimentación en laboratorio (Orellana, 2012) .....	15
2.6.3    Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving (Gómez, 2014) .....	16
2.6.4    Influencia de fino y humedad en flujo gravitacional confinado (Olivares, 2014)...	17
2.7    Conclusiones del capítulo .....	18
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	19
3.1    Introducción .....	19
3.2 <i>Benchmarking</i> .....	19
3.2.1    Bateas .....	19
3.2.2    LHD.....	21
3.3    Descripción equipo de laboratorio .....	23
3.3.1    Bateas .....	23
3.3.2    Sistema de extracción y modelo .....	25

3.3.3	Dimensiones escaladas .....	27
3.3.4	Caracterización del material .....	28
3.4	Granulometrías .....	29
3.5	Colgaduras .....	31
3.6	Zonas de extracción (IEZ) .....	32
3.7	Plan experimental .....	33
3.8	Procedimiento experimental .....	34
3.9	Conclusiones del capítulo .....	36
RESULTADOS Y ANÁLISIS .....		37
4.1	Introducción .....	37
4.2	Masa entre colgaduras .....	37
4.3	Análisis de producción.....	43
4.4	Altura de colgaduras .....	44
4.5	Número de baldadas antes de una colgadura .....	46
4.6	Masa entre sobre tamaños .....	47
4.7	Masa entre interferencias .....	54
4.8	Análisis de las zonas de extracción (IEZ).....	55
4.9	Conclusiones del capítulo .....	58
ANÁLISIS DE IMÁGENES .....		60
5.1	Introducción .....	60
5.1.1	Objetivos.....	60
5.1.2	Alcances.....	60
5.2	Revisión bibliográfica.....	61
5.3	Metodología experimental .....	62
5.4	Resultados y análisis .....	67
5.4.1	Distribución de tamaños .....	67
5.4.2	Número de partículas.....	70
5.4.3	Análisis final.....	72
5.5	Conclusiones del capítulo .....	76
CONCLUSIONES.....		77
6.1	Conclusiones generales.....	77
6.2	Recomendaciones y trabajo futuro .....	79
BIBLIOGRAFÍA .....		80
ANEXO A .....		82
Análisis dinámico sistema .....		82
ANEXO B .....		91

Histogramas 7 experimentos masa entre colgaduras .....	91
ANEXO C .....	95
Análisis de producción por baldada (histogramas).....	95
ANEXO D .....	99
Histogramas 7 experimentos masa entre sobre tamaños .....	99
ANEXO E.....	103
Distribución de tamaños en el punto de extracción .....	103
Número de partículas en una colgadura .....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema motivación del trabajo.....	3
Figura 2: Metodología de investigación.....	5
Figura 3: Clasificación de materiales granulares (Kvapil, 2008).....	8
Figura 4: Angulo de reposo y coeficiente de fricción vs coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008).....	9
Figura 5: Elipsoides de movimiento y extracción (Kvapil, 2008).....	10
Figura 6: Tipos de flujo (Kvapil, 2008).....	10
Figura 8: Arco mecánico (Kvapil, 2008).....	14
Figura 9: Diagrama de fuerzas del arco mecánico (Kvapil, 2008).....	14
Figura 10: Diseño de batea y relación con tipo de hundimiento, avanzado (a) convencional (b).....	19
Figura 11: Dimensiones de la batea, vista 3D.....	20
Figura 14: LHD Caterpillar R1700G.....	21
Figura 15: Disposición espacial LHD en sección de 4 x 4.4 m <sup>2</sup> .....	22
Figura 16: Dimensiones batea caso base, vista isométrica.....	23
Figura 17: Dimensiones batea corta, vista isométrica.....	24
Figura 18: Dimensiones batea alta, vista isométrica.....	24
Figura 19: Esquema flujo de mineral en batea.....	25
Figura 20: Modelo físico y sus componentes.....	26
Figura 21: Sistema de extracción y punto de extracción 1 (vista lateral).....	26
Figura 22: Granulometrías medidas en puntos de extracción. Mina Esmeralda - El Teniente (Garcés, 2015).....	30
Figura 24: Medición altura de una colgadura.....	32
Figura 25: Posicionamiento marcadores, vista lateral y vista en planta.....	32
Figura 26: Procedimiento experimental.....	35
Figura 27: Masa entre colgaduras vs d <sub>80</sub> .....	39
Figura 28: Masa entre colgaduras vs ángulo de batea.....	39
Figura 29: Masa entre colgaduras vs largo de batea.....	40
Figura 30: Histograma masa entre colgaduras para cada experimento agrupados por fragmentación.....	40
Figura 31: Modelo multivariable, masa entre colgaduras vs d <sub>80</sub> .....	41
Figura 32: Modelo multivariable, masa entre colgaduras [ton] vs d <sub>80</sub> [m].....	42
Figura 33: Productividad por baldada, experimento 1.....	44
Figura 34: Medida de la altura de una colgadura.....	44
Figura 35: % de colgaduras altas >4cm vs ángulo de batea.....	46
Figura 36: Ejemplo de sobretamaño.....	48

Figura 37: Masa entre sobre tamaños vs $d_{80}$ .....	48
Figura 38: Histograma Masa entre sobre tamaños para todos los experimentos.....	49
Figura 39: Curvas de distribución de tamaños en función del eje mayor de las partículas.....	52
Figura 40: Masa entre interferencias (colgaduras + sobre tamaños) vs $d_{80}$ .....	55
Figura 41: Altura de interacción y ángulos de flujo dentro de la batea.....	56
Figura 42: Altura de interacción vs $d_{80}$ .....	57
Figura 43: Altura de interacción vs ángulo de batea.....	57
Figura 44: Altura de interacción vs largo de batea.....	58
Figura 45: Resultados uso de BCF, método de Robin Kear y nuevo método (BCF, 2005).....	62
Figura 46: Imagen punto de extracción 2 experimento 6.....	63
Figura 47: Esquema sección a analizar.....	64
Figura 48: Comparación métodos de medición imágenes, Fu acumulado.....	65
Figura 49: Comparación métodos de medición imágenes, fu retenido.....	65
Figura 50: Imagen analizada con GIMP (Imagen 434).....	67
Figura 51: Comparación distribuciones de tamaños fu (retenido) en punto de extracción.....	68
Figura 52: Comparación distribuciones de tamaño Fu (acumulado) en punto de extracción.....	69
Figura 53: Probabilidad de colgadura en función del porcentaje de gruesos en el punto de extracción.....	70
Figura 54: Frecuencia de colgaduras en función del número de partículas en el arco.....	71
Figura 55: Distribuciones de porcentajes retenidos para cada granulometría.....	73
Figura 56: Framework simulación predicción de colgaduras.....	74
Figura 57: Esquema de fuerzas simplificado.....	82
Figura 58: Esquema cuña de material.....	84
Figura 59: Esquema batea.....	85
Figura 60: Esquema modelo.....	85
Figura 61: Esquema cuña.....	88
Figura 62: Área de carga.....	89
Figura 63: Histograma masa entre colgaduras, experimento 1.....	91
Figura 64: Histograma masa entre colgaduras, experimento 2.....	91
Figura 65: Histograma masa entre colgaduras, experimento 3.....	92
Figura 66: Histograma masa entre colgaduras, experimento 4.....	92
Figura 67: Histograma masa entre colgaduras, experimento 5.....	93
Figura 68: Histograma masa entre colgaduras, experimento 6.....	93
Figura 69: Histograma masa entre colgaduras, experimento 7.....	94
Figura 70: Productividad por baldada, experimento 2.....	95
Figura 71: Productividad por baldada, experimento 3.....	96
Figura 72: Productividad por baldada, experimento 4.....	96
Figura 73: Productividad por baldada, experimento 5.....	97
Figura 74: Productividad por baldada, experimento 6.....	97
Figura 75: Productividad por baldada, experimento 7.....	98
Figura 76: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 1.....	99
Figura 77: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 2.....	99
Figura 78: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 3.....	100
Figura 79: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 4.....	100
Figura 80: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 5.....	101
Figura 81: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 6.....	101
Figura 82: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 7.....	102



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de fuerzas en materiales granulares (Pineda, 2012).	12
Tabla 3: Factores de escala, análisis de similitud.	13
Tabla 4: Frecuencia de colgaduras a partir de razón D/d (como se cita en Hustrulid, 2004).	13
Tabla 5: Resumen efecto de variables en parámetros operacionales (Orellana, 2012).	16
Tabla 6: Parámetros de la batea.	20
Tabla 7: Dimensiones bateas minas de block/panel caving (Codelco, 2011).	20
Tabla 8: Características equipos LHD Caterpillar.	22
Tabla 9: Movimiento del sistema de extracción.	27
Tabla 10: Dimensiones escaladas	28
Tabla 12: Propiedades del material (Garcés, 2015).	28
Tabla 13: Coeficiente de uniformidad y curvatura para granulometrías experimentos.	29
Tabla 14: Tamaños característicos y porcentaje de columna extraída asociado.	30
Tabla 18: Diferentes tipos de colgaduras (Olivares, 2014).	31
Tabla 19: Plan experimental	33
Tabla 20: Resultados frecuencia de colgaduras.	38
Tabla 21: Parámetros de ajuste para la masa entre colgaduras.	41
Tabla 23: Parámetros de ajuste modelo multivariable escala mina.	42
Tabla 24: Resumen de productividades por baldada.	43
Tabla 25: Resumen tipos de colgaduras	45
Tabla 26: Resumen número de baldadas antes de una colgadura.	46
Tabla 27: Resumen frecuencia de sobre tamaños.	47
Tabla 28: Número de ocurrencias de sobre tamaños a distinto número de baldadas desde el descuelgue.	50
Tabla 29: Resumen frecuencia de sobre tamaños considerando nueva restricción.	51
Tabla 30: Porcentajes de sobretamaños en diferentes granulometrías.	52
Tabla 31: Relación promedio entre los ejes principales de las partículas.	52
Tabla 32: Frecuencia inicial de sobre tamaños.	53
Tabla 33: Comparación entre frecuencias de sobre tamaños.	53
Tabla 34: Resumen de interferencias.	54
Tabla 35: Altura de interacción en la batea.	55
Tabla 36: Frecuencia de colgaduras en piques de traspaso (como se cita en Hustrulid and Sun, 2004).	61
Tabla 37: Información punto de extracción.	63
Tabla 38: Clasificación de partículas.	66
Tabla 39: Distribución de tamaños porcentaje retenido fu, colgaduras y flujo.	67
Tabla 40: Distribución de tamaños porcentaje acumulado Fu, colgaduras y flujo.	68
Tabla 41: Probabilidad de colgadura a partir de diferentes porcentajes de grueso en el punto de extracción.	69
Tabla 42: Análisis número de partículas que forman una colgadura.	71
Tabla 43: Resumen del efecto de las variables.	77
Tabla 44: Dimensiones cuña.	86
Tabla 45: Dimensiones bateas	87
Tabla 46: Datos y cálculos	87
Tabla 47: Fuerza de empuje LHD a distintos "K"	88
Tabla 48: Fuerza empuje LHD	90
Tabla 49: Distribución de tamaños en caso de colgaduras, imágenes.	103

Tabla 50: Distribución de tamaños en caso de flujo, imágenes.....	104
Tabla 51: Análisis número de partículas por arco de colgadura. ....	105
Tabla 52: Análisis número de partículas flujo.....	106

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008). ....	9
Ecuación 2: Excentricidad elipsoide.....	11
Ecuación 3: Modelo predictivo de colgaduras. ....	17
Ecuación 4: Determinación ángulo de flujo (Vargas, 2010). ....	25
Ecuación 5: Coeficiente de uniformidad (Craig, 2004).....	29
Ecuación 6: Coeficiente de curvatura (Craig, 2004). ....	29
Ecuación 7: Escalamiento kg a ton.....	38
Ecuación 8: Sumatoria de fuerzas en eje "x" .....	83
Ecuación 9: Fuerza de empuje LHD .....	83
Ecuación 10: Fuerza de roce peso cuña.....	83
Ecuación 11: Fuerza de roce peso batea.....	83
Ecuación 12: Coeficiente de roce .....	83
Ecuación 13: Fuerza peso cuña .....	83
Ecuación 14: Fuerza peso batea.....	83
Ecuación 15: Fuerza peso columna mineral .....	84
Ecuación 16: Sumatoria de fuerzas eje "y" .....	84
Ecuación 17: Cálculo masa cuña de material .....	84
Ecuación 18: Constante c .....	84
Ecuación 19: Cálculo masa batea .....	84
Ecuación 20: Ecuación de Janssen .....	86
Ecuación 21: Fuerza de empuje LHD .....	86

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

En la actualidad, la minería está pasando por un período de cambio. Los problemas económicos de las grandes potencias consumidoras de todo tipo de metales han tenido un impacto significativo en el mercado de los commodities. Las bajas en los precios del cobre, hierro, níquel, oro han generado un ambiente de incertidumbre en la industria minera, la cual hace poco tiempo disfrutaba de los altos precios de los mismos metales. Ésta incertidumbre se suma al agotamiento de los actuales yacimientos y al descubrimiento de otros con condiciones mucho más extremas (altitud, profundidad). Este ambiente, que se ha generado varias veces en la historia de la industria minera, ha coincidido con el desarrollo de estudios innovadores disruptivos, que han permitido levantar los procesos y hacer de la minería una actividad competitiva nuevamente.

Respecto a lo anterior, la minería subterránea cada día está siendo considerada como una mejor opción para yacimientos profundos y también para aquellos yacimientos antiguos explotados a rajo abierto, los cuales están sufriendo transiciones para ser explotados por métodos subterráneos (Flores, 2004). Uno de los métodos subterráneos masivos que tiene los menores costos y gran capacidad de producción es el *block/panel caving*, el cual también posee la mayor productividad por trabajador y tiene el mayor potencial de automatización (Brown, 2007).

Minería de caving es toda aquella explotación en la cual se realiza un corte basal (socavación) a un cuerpo mineralizado, producto de éste corte el material se hunde por efecto de los esfuerzos in situ y la acción de la gravedad y es recuperado en un nivel de producción inferior, mediante puntos de extracción (Laubscher, 2006). En el caso de *block/panel caving* el cuerpo mineralizado se divide en bloques o paneles, los que posteriormente son socavados.

En los últimos 30 años la minería de *caving* ha experimentado numerosos cambios, debido fundamentalmente a la necesidad de ser más productivos y a los cambios en la naturaleza de los yacimientos (Flores, 2014). Todos estos cambios han sido realizados en torno a procesos clave, los cuales son: diseño minero, obras civiles y producción. El diseño de una mina de *block caving* debe considerar fundamentalmente la estrategia minera a seguir, la altura de columna, el *layout* del nivel de extracción y el tipo de hundimiento (estrategia y geometría).

Los dos últimos puntos del párrafo anterior agrupan una gran cantidad de características y variables que deben ser definidas de acuerdo al tipo de yacimiento y a la naturaleza en la cual se encuentra. Una de ellas es la geometría de las bateas, su largo, su alto y los ángulos utilizados en éstas quedan definidos por el tipo de layout y por el tipo de hundimiento a utilizar.

Además del diseño, las bateas tienen un impacto significativo en producción, pues en conjunto con las características granulométricas del mineral, los puntos de extracción van a definir la productividad y continuidad de la operación. Esto es debido fundamentalmente a la formación de colgaduras y aparición de sobretamaños en los puntos de extracción.

Una colgadura es una interferencia en el flujo, la cual puede ocurrir en el punto de extracción o en la batea. El flujo se detiene debido a la formación de un arco estable compuesto de material grueso o fino. La presencia de colgaduras y de una fragmentación gruesa con una alta cantidad de fragmentos sobre 2 m<sup>3</sup> afecta negativamente la tasa de producción (Laubscher, 1994) y es necesario realizar reducciones secundarias con el fin de restablecer el flujo. Consecuentemente, la presencia de colgaduras aumenta los costos mina (Gómez, 2014). A su vez, un sobre tamaño es aquella roca que tiene una dimensión tal que no puede ser cargada correctamente por el equipo LHD, con lo cual una reducción secundaria también debe llevarse a cabo.

Por lo anterior, existe una oportunidad de mejorar los actuales procesos, teniendo en cuenta que el diseño minero, a partir de la elección de un espaciamiento de los puntos de extracción y la estrategia de socavación, y la consecuente optimización de los parámetros geométricos de la batea, van a tener un efecto posterior en la continuidad operacional, generando una mayor o menor frecuencia de colgaduras. Cuantificar cuánto es el efecto del diseño de la batea sobre la frecuencia de colgaduras es sobre lo que trata esta investigación.

### 1.2 Motivación del trabajo

Actualmente, las minas explotadas por *block caving* se hacen cada vez más profundas, lo que provoca que se enfrenten a nuevos desafíos, tales como mineral primario (grandes colpas, alta resistencia y bajas leyes) y altas concentraciones de esfuerzos. Esto ha provocado que, para mantener las productividades, se ponga atención en aquellos problemas que afectan seriamente la continuidad operacional.

Las colgaduras y sobre tamaños, son las principales interferencias operacionales en los puntos de extracción, éstas afectan la continuidad operacional y además aumentan los costos. A la fecha la predicción de colgaduras se ha realizado a partir de observaciones en terreno (Maass, 2012; Hurtado et al, 2009), experimentos (Gómez, 2014; Olivares 2014) y simulaciones (BCF, 1996). Sin embargo, existe aún la necesidad de cuantificar el efecto de las principales variables en la frecuencia de colgaduras.

En un ambiente de *block caving* existen distintas variables, controlables y no controlables, que podrían determinar el tipo de flujo de un mineral. Dentro de las variables no controlables, se incluyen las propiedades del mineral y, principalmente la granulometría resultante de la fragmentación primaria. Dentro de las variables que si son controlables, se incluye todo el diseño minero, tal como el diseño de las bateas (alto, largo y sus ángulos), el diseño de puntos de extracción y la estrategia de socavación. Cabe destacar que todas éstas variables controlables son dependientes entre si y en conjunto definen una malla de extracción.

La Figura 1 muestra un esquema de las variables que son importantes para caracterizar el flujo gravitacional y con ello tener información adecuada sobre la frecuencia de colgaduras y sobre tamaños.

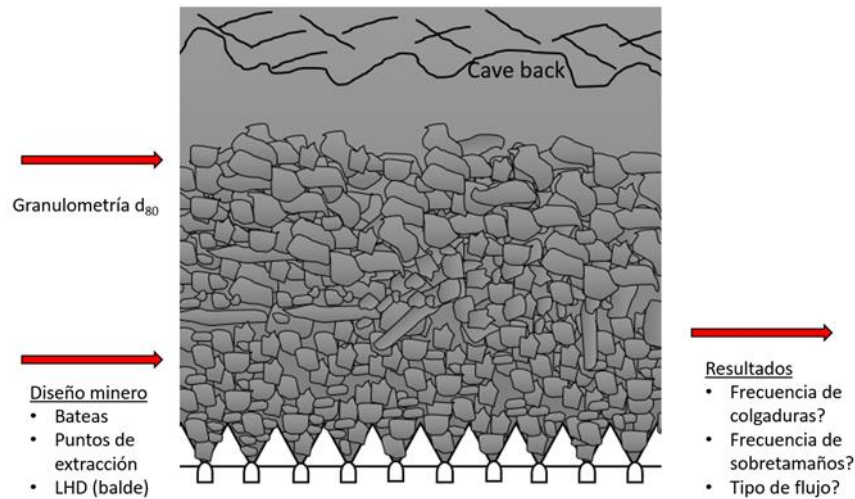


Figura 1: Esquema motivación del trabajo.

Este estudio busca responder la siguiente pregunta:

- ¿Es posible conocer la frecuencia de colgaduras y sobretamaños, al conocer la granulometría ( $d_{80}$ ) y el diseño de un tipo de batea y LHD?

Cabe destacar que en toda la investigación se consideró el indicador  $d_{80}$  para representar el tamaño de las curvas granulométricas, se utilizó éste indicador debido a que representa a los tamaños gruesos que son los que participan en la formación de colgaduras.

### 1.3 Objetivos

Los objetivos de este estudio fueron separados en general y específicos y se mencionan a continuación.

#### 1.3.1 Objetivo general

El objetivo general de ésta investigación fue cuantificar experimentalmente el efecto de las variables de diseño de las bateas y la granulometría en la frecuencia de colgaduras y sobre tamaños.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Tal de cumplir el objetivo general, se consideraron los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar información acerca del diseño de bateas, tipos de equipos LHD y distribuciones de tamaño de partículas en minas de block caving.
- Diseñar y construir un modelo físico, además de preparar el material para llevar a cabo los experimentos.
- Determinar, a través de experimentos, el efecto de la geometría de la batea (altura, longitud y ángulo) y granulometría (fina, intermedia y gruesa) en la frecuencia de colgaduras, frecuencia de sobre tamaños y zonas de extracción.
- Realizar un análisis de imágenes para comprender la distribución de tamaños que existe en el arco de una colgadura y en la vecindad de éste.

### 1.4 Alcances

El estudio experimental tuvo los siguientes alcances:

- Los experimentos se realizaron en un modelo físico a escala 1:50.
- Los experimentos consideraron la extracción desde sólo una batea (dos puntos de extracción).
- Los esfuerzos que actuaron en el modelo fueron bajos comparados con los esfuerzos compresivos de la roca utilizada. Por lo tanto, la fragmentación no fue observada ni estudiada durante el flujo.
- El modelo físico representó una altura de columna constante (el modelo fue rellenado durante los experimentos).
- El material utilizado fue mineral primario chancado (andesita) proveniente de la mina El Teniente. Esto con el objetivo de lograr una similitud en el ángulo de fricción y forma de las partículas del modelo con los fragmentos de la mina.

### 1.5 Metodología de investigación

La metodología de la investigación fue realizada con el fin de cumplir los objetivos planteados, tanto los generales como los específicos. Los siguientes puntos describen paso a paso cada una de las etapas realizadas.

1. *Benchmarking*: Una revisión sobre las bateas, equipos LHD y granulometrías observadas en las minas de *block caving* fue realizada.
2. Determinación de las variables a estudiar: A partir del *benchmarking* y la revisión bibliográfica se determinó cuáles son las variables que podrían tener el mayor efecto en la frecuencia de colgaduras.
3. Construcción del modelo físico y preparación del material: Ya determinadas las variables a estudiar, fue posible construir el modelo físico, con cada una de sus dimensiones definidas. Además a la vez se preparó el material, a partir de una curva de distribución granulométrica definida anteriormente.
4. Caracterización del material: Resultó fundamental caracterizar el material debido a que toda conclusión obtenida de éste estudio, es aplicable para el tipo de material utilizado. Por ello se determinó el factor de forma, la densidad aparente y el coeficiente de resistencia a la compresión UCS.
5. Realización de los experimentos: Se realizaron los experimentos, con una pauta estándar, con el fin de desarrollar el mismo procedimiento en cada uno de ellos. Fue de importancia que el experimentador se apegara lo más posible a la pauta con el fin de evitar posibles errores.

6. Análisis de los experimentos: Los resultados de los experimentos fueron analizados y discutidos, tal de obtener conclusiones sobre el efecto de las variables estudiadas.
7. Desarrollo de modelo predictivo: A partir de las conclusiones obtenidas fue posible desarrollar modelos que consideraran las variables planteadas y que predijeran la frecuencia de colgaduras.

La metodología propuesta anteriormente se esquematiza en la Figura 2.

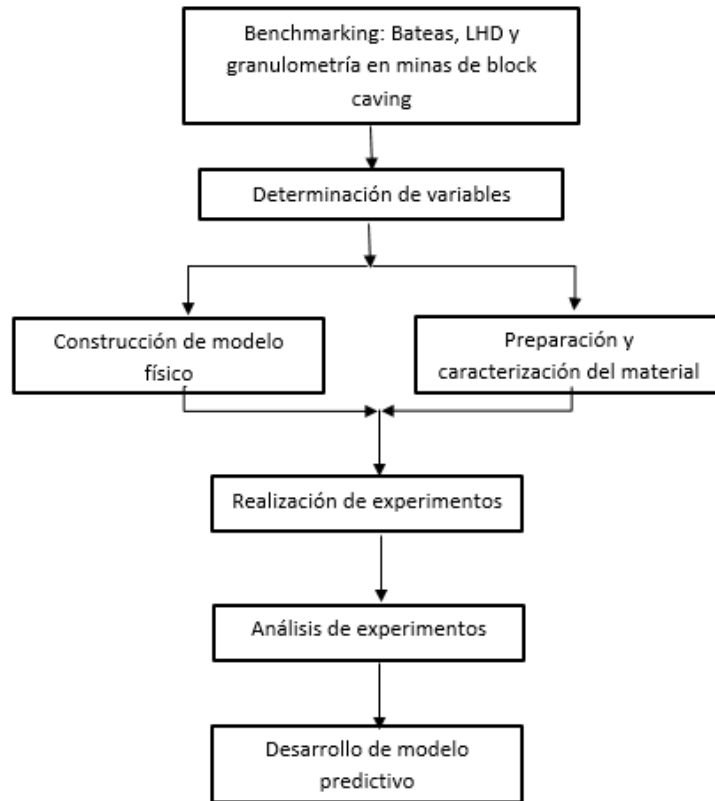


Figura 2: Metodología de investigación.

### 1.6 Contenidos por capítulo

Los contenidos de ésta investigación se dividen en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Se muestra la introducción del trabajo que a su vez contiene la motivación, los objetivos, los alcances y la metodología de la investigación.

Capítulo 2: Corresponde a los antecedentes del presente estudio, en términos del flujo gravitacional, propiedades de los materiales y los estudios relacionados con colgaduras realizados a la fecha.

Capítulo 3: Describe la metodología experimental, incluyendo un estudio de *benchmarking* realizado, el equipo de laboratorio considerado y construido, la granulometría y el tipo de material, y el plan experimental a desarrollar.

Capítulo 4: Se muestran los resultados obtenidos y su respectivo análisis para los experimentos realizados, principalmente en relación a la frecuencia de colgaduras, frecuencia de sobretamaños y tipo de flujo.

Capítulo 5: Se muestra el estudio de análisis de imágenes de puntos de extracción con su revisión bibliográfica, metodología, resultados, análisis y conclusiones.

Capítulo 6: Se presentan las conclusiones generales del estudio, las recomendaciones y el trabajo futuro.



## CAPÍTULO 2

---

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Introducción

El presente capítulo muestra una revisión de los estudios realizados y el conocimiento existente acerca de los principales temas que involucra el presente estudio, tales como el la minería de *caving* y el flujo gravitacional, materiales granulares y las colgaduras en puntos de extracción.

#### 2.2 Minería de *caving* y flujo gravitacional

La minería de *caving* es toda aquella explotación minera en la cual se utiliza el hundimiento natural de la roca para poder extraerla. El proceso de *caving* en una mina de *block/panel caving* transforma la roca in situ a roca quebrada, la cual fluye hacia los puntos de extracción y ésta es extraída por equipos mecanizados localizados en el nivel de producción (Castro, 2007).

Para tener éxito en una mina de *caving* es fundamental entender los conceptos y mecanismos que gobiernan el flujo gravitacional, debido principalmente a que éste afecta la recuperación del mineral y la dilución (Susaeta, 2004). Estos dos últimos fenómenos afectan de manera significativa al negocio minero y además, considerando que en éste tipo de minas existe un alto capital inicial invertido en desarrollos, un mal entendimiento del flujo puede resultar en el fracaso de la mina.

Un aspecto fundamental a la hora de entender el flujo gravitacional es conocer el tipo de mineral que presenta el yacimiento a explotar. Actualmente, la tendencia de la mayor parte de las minas de *block caving* en el mundo es a extraer mineral primario asociado a pórfidos cupríferos, el cual se caracteriza por tener una alta resistencia, bajas leyes y se fragmenta en partículas gruesas. La clasificación de tamaños de un material es muy importante en el estudio del flujo gravitacional, debido a las diferencias que pueden existir entre dos materiales, por ejemplo, una mezcla de materiales puede contener varias formas (redondeadas, angulares, triangulares, etc.) y tamaños (bloques, fragmentos, grava, arena, polvo, etc) (Kvapil, 2008).

Materiales con formas y tamaños distintos también poseen un comportamiento diferente. Se ha notado que la presencia de un bajo porcentaje de partículas finas (10 – 15%) dentro de una mezcla de partículas gruesas, puede cambiar el comportamiento final del material grueso. Debido principalmente a que bajo algunas condiciones la movilidad de la mezcla de material grueso puede ser mejorada por la adición de material fino, sin embargo, en algunos casos las partículas finas con una cierta cantidad de humedad pueden aumentar la viscosidad y generar una mezcla con un comportamiento plástico y un barro que reduce la movilidad del material grueso (Kvapil, 2008; Olivares, 2014).

## CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Existen numerosas clasificaciones de los materiales, Kvapil (2008) distinguió e idealizó cuatro tipos de materiales gruesos, con el fin de definir de mejor manera la técnica de transporte ideal dependiendo del comportamiento del material. La Figura 3 muestra la clasificación, la cual consiste en:

- Tipo 1: Material grueso con partículas grandes y redondeadas con un tamaño y forma aproximadamente uniforme.
- Tipo 2: Material grueso compuesto de partículas angulares y tabulares con más o menos el mismo tamaño.
- Tipo 3: Mezcla de partículas grandes, fragmentos de roca, gravilla y arena.
- Tipo 4: Mezcla compleja de grandes bloques, partículas y fragmentos de tamaño medio, gravilla, arena y polvo de roca.

Respecto a la aplicabilidad de transporte gravitacional el rango A es solo para tolvas y el rango B es para piques de traspaso y bateas (Kvapil, 2008). En el caso de minas de caving la mezcla de material se encuentra en el rango B y consecuentemente para los experimentos también.

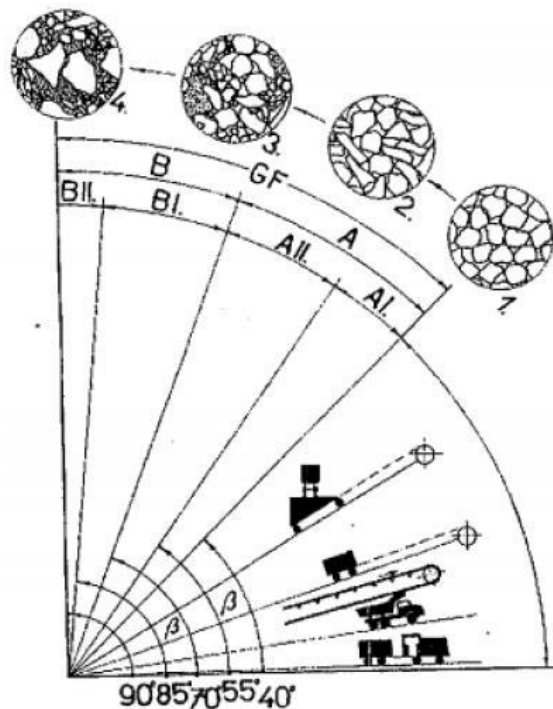


Figura 3: Clasificación de materiales granulares (Kvapil, 2008).

Como se mencionó anteriormente existe una amplia gama de posibilidades de generar mezclas de tamaño distintas, las cuales tienen características de movimiento diferentes. La movilidad de una partícula depende fundamentalmente de su fricción interna, la cual puede ser cuantificada por el coeficiente de fricción interna  $f$  que es posible determinar por distintos métodos, siendo el más simple de ellos el que utiliza el ángulo de reposo del material  $\phi$ . Además, el coeficiente de fricción puede ser utilizado para obtener el coeficiente de movilidad a partir de la Ecuación 1.

## CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

$$m = 1 + 2f^2 - 2f\sqrt{(1 + f^2)}$$

Ecuación 1: Coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008).

El coeficiente de movilidad va desde 0 a 1. La Figura 4 muestra un gráfico que relaciona el ángulo de reposo, con el coeficiente de fricción interna y el coeficiente de movilidad. Aquellos materiales con el coeficiente de movilidad más alto son aquellos con un ángulo de reposo bien bajo (Kvapil, 2008).

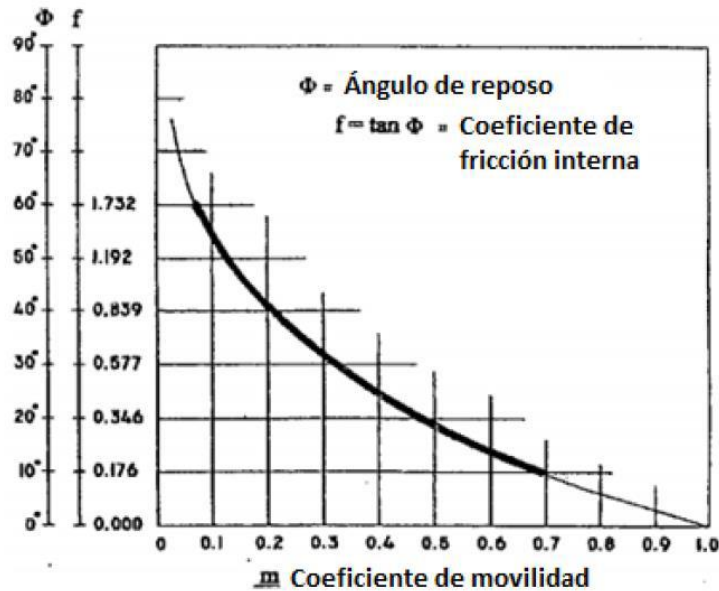


Figura 4: Ángulo de reposo y coeficiente de fricción vs coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008).

Las propiedades de los materiales y sus mezclas influyen en el tipo de flujo gravitacional, pero no son las únicas variables en cuestión, es necesario conocer cómo se comporta el flujo y cuáles son los parámetros que lo caracterizan. El primero en realizar experimentos fue Kvapil (1965), el cual usando arena como material, definió que la forma que tiene el flujo corresponde a un elipsoide, el cual puede ser un elipsoide de movimiento ( $E_L$ ) o un elipsoide de extracción ( $E_Z$ ). El elipsoide de movimiento ( $E_L$ ) representa a la zona de movimiento (MZ) el cual queda definido por el límite entre las partículas que, debido a la extracción, han cambiado su posición inicial y las partículas estacionarias. El elipsoide de extracción ( $E_Z$ ) representa a la zona de extracción (EZ) que corresponde a aquellas partículas que han cambiado su posición inicial y que han sido removidas por la extracción de una masa dada (Kvapil, 2008; Fuenzalida, 2012).

En la Figura 5 se muestran los parámetros explicados anteriormente y cómo se relacionan entre ellos.

## CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

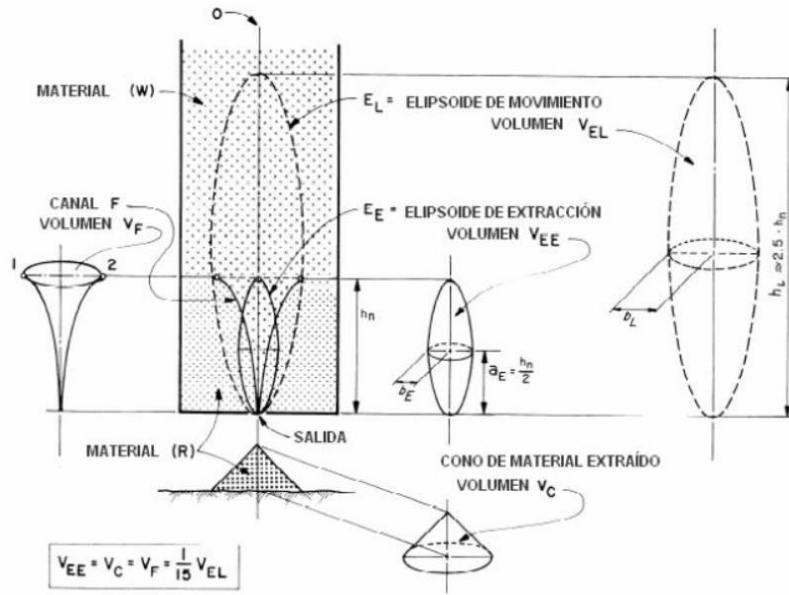


Figura 5: Elipsoides de movimiento y extracción (Kvapil, 2008).

Distintos tipos de materiales van a tener distintas configuraciones de elipsoides de movimiento y de extracción, los experimentos de Kvapil (2008) muestran que a medida que se utiliza un material más grueso, los elipsoides se hacen más anchos. La Figura 6 muestra lo mencionado anteriormente.

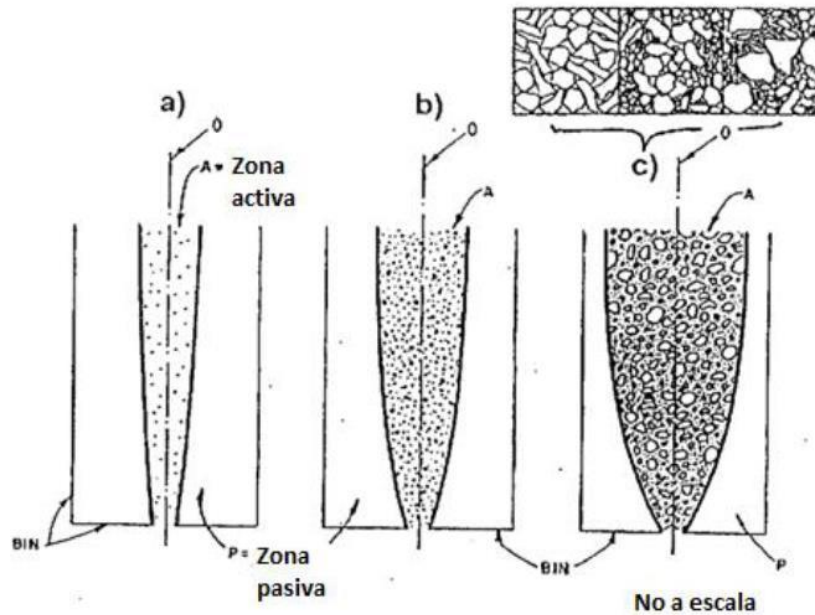


Figura 6: Tipos de flujo (Kvapil, 2008).

## CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Además de visualizar gráficamente este fenómeno, la forma del elipsoide de extracción puede quedar definida por su excentricidad, la cual puede determinarse mediante la Ecuación 2.

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sqrt{(a^2 - b^2)}$$

*Ecuación 2: Excentricidad elipsoide.*

Donde, (a) es el semi eje mayor y (b) es el semi eje menor del elipsoide. A medida que la excentricidad aumenta, el elipsoide de extracción se adelgaza y por el contrario, cuando la excentricidad disminuye, el elipsoide aumenta su volumen. La excentricidad no sólo depende del tamaño de partícula y la altura del elipsoide sino que de una serie de factores:

- Forma de los fragmentos
- Rugosidad de la superficie de las partículas
- Fricción entre partículas
- Porcentaje de polvo
- Porcentaje de finos, arenas y arcillas
- Contenido de humedad
- Compresibilidad
- Compactación
- Plasticidad
- Resistencia de los fragmentos
- Magnitud, distribución y dirección de los esfuerzos externos
- Tasa de extracción

### 2.3 Comportamiento de materiales granulares

El material granular puede definirse como un conglomerado de partículas macroscópicas discretas que no tienen cohesión. El comportamiento de materiales granulares está estrechamente relacionado a la interacción entre las partículas. Existen distintos tipos de interacciones entre partículas; tales como, las fuerzas electrostáticas y adhesivas, la cohesión capilar y las fuerzas de Van der Waals (Andreotti et al, 2014).

Si no existe cohesión entre las partículas la forma que toma el material queda determinada por las condiciones de borde y la fuerza de gravedad. Además si el material está seco y existe una cantidad muy pequeña de humedad o es nula, entonces es posible omitir las fuerzas electrostáticas, aerodinámicas y capilares, y es posible hablar de un material seco sin cohesión. Por ende, las principales fuerzas presentes, son las dictadas por la fricción y las colisiones inelásticas que ocurren en los contactos entre las partículas y las paredes (Gómez, 2014).

En el caso de un experimento a escala de flujo gravitacional, éste debe ser afectado principalmente por dos fuerzas: gravedad y fricción, principalmente debido a que éstas son las fuerzas dominantes en el problema a escala mina. Sin embargo, al considerar partículas de bajo tamaño existen otras fuerzas que pueden afectar el flujo granular, mencionadas en el párrafo anterior. Estas fuerzas deben ser cuantificadas para lograr un entendimiento del fenómeno y poder seleccionar el tamaño de las partículas correctamente. La Tabla 1 muestra un resumen de éstas fuerzas y las causas que las provocan (Castro, 2001).

## CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Tabla 1: Tipos de fuerzas en materiales granulares (Pineda, 2012).

Fuerza	Causa
Van der Waals	Fuerzas atractivas y repulsivas debido a dipolos permanentes o inducidos.
Fuerzas capilares	Humedad condensada en la superficie de la partícula.
Electrostática	Interacción de partículas con una carga eléctrica.
Magnética	Movimiento de partículas cargadas, tal como electrones. También se produce una tracción adicional cuando las partículas se encuentran magnetizadas.

Un estudio de las fuerzas que gobiernan el flujo gravitacional al modificar el tamaño de los fragmentos fue realizado por Pineda (2012). Los resultados mostraron que para el material de un tamaño menor que el tamiz #50 (300  $\mu\text{m}$ ) se presentó un comportamiento en el cual la gravedad fue sólo 34 veces mayor que las fuerzas de Van der Waals. Para tamaños menores las fuerzas de Van der Waals se hacen más fuertes que la gravedad. Por este motivo que se recomienda que en cualquier experimento a escala, se elimine los finos más pequeños que el tamiz #50.

### 2.4 Análisis de similitud

En todo estudio que involucre escalamiento es necesario indicar los factores de escala utilizados para aquellas variables más importantes a medir. Un prototipo es una forma de estudiar ciertos fenómenos, incluyendo la mayor cantidad de variables, por otra parte, un modelo físico es una representación simplificada del prototipo, la cual solo incluye las variables esenciales para replicar el fenómeno que ocurre en el prototipo. Un análisis de similitud muestra que el flujo gravitacional en el modelo físico y el prototipo pueden ser similares si se cumplen las siguientes similitudes (Castro, 2006):

- Similitud geométrica: Esto incluye las dimensiones de la columna (altura y área), dimensiones del punto de extracción y la distribución de tamaños del material.
- Similitud cinemática: Esto incluye la tasa de extracción.
- Similitud dinámica: Para validar este tipo de similitud se deben cumplir las siguientes condiciones:
  - Partículas del material contenido en el modelo deben poseer la misma distribución granulométrica que las del prototipo.
  - Partículas del modelo deben poseer la misma masa específica, coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad que el prototipo.
  - El material usado en el modelo debe tener el mismo ángulo de fricción que el prototipo.

En el caso de flujo gravitacional para *block caving*, el proceso es complejo y es difícil considerar todas las variables y condiciones, tal como el agua y barro, fragmentación y fracturas, estructuras del macizo rocoso y esfuerzos. Sin embargo, existen otras condiciones que si pueden ser replicadas y escaladas mediante un modelo físico, las cuales se detallan en la Tabla 2 y también se muestra el factor de escala de cada una de ellas el cual está relacionado con el factor de escala de longitud.

*Tabla 2: Factores de escala, análisis de similitud.*

Variable	Factor de escala
Largo	$\lambda_L$
Área	$\lambda_L^2$
Volumen	$\lambda_L^3$
Velocidad	$\lambda_L^{\frac{1}{2}}$
Tiempo	$\lambda_L^{\frac{1}{2}}$
Peso	$\lambda_L^3$
Esfuerzos	$\lambda_L$
Ángulo de fricción	1

## 2.5 Colgaduras en puntos de extracción

Una colgadura corresponde a la formación de un arco estable de rocas o bloques que obstruyen un punto de extracción, impidiendo el libre flujo gravitacional lo cual provoca que se cierre (Gómez, 2014). Las colgaduras con tamaños gruesos generalmente son llamadas arcos mecánicos.

Existen numerosos estudios asociados al flujo en silos y piques de traspaso, los cuales se han utilizado para definir reglas y ciertas aproximaciones y así poder predecir de cierta forma la frecuencia de las colgaduras. Una de las reglas más conocidas es la cual relaciona el tamaño máximo de partícula (d) con la abertura de la estructura (D). Ésta relación permite predecir la posible condición de flujo que se puede tener en un sistema de traspaso de mineral (Gómez, 2014). La Tabla 3 muestra las reglas definidas.

*Tabla 3: Frecuencia de colgaduras a partir de razón D/d (como se cita en Hustrulid, 2004).*

Razón	Frecuencia de colgaduras
$D/d > 5$	Baja
$5 > D/d > 3$	Probable
$D/d < 3$	Muy alta

### 2.5.1 Colgaduras de arcos mecánicos

La formación de arcos en materiales gruesos, tal como, mineral y estéril, puede resultar en problemas operacionales en minas de caving y son mucho más frecuentes que los arcos continuos. Estos arcos se pueden formar en cualquier sector sobre la zona de extracción y estudios en silos indican que éste tipo de arcos en materiales gruesos tienen una forma parabólica, como se puede observar en la Figura 7.

## CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

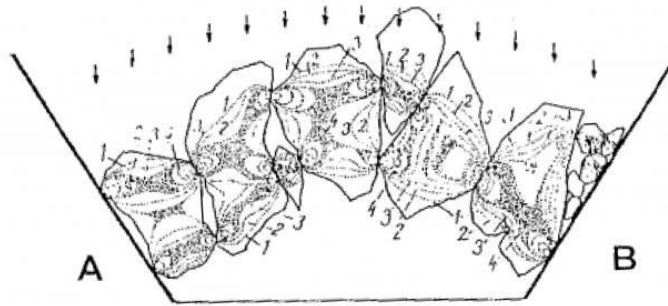


Figura 7: Arco mecánico (Kvapil, 2008).

La parte inferior de una batea generalmente tiene muros inclinados en un ángulo  $\alpha$ . La altura del arco será menor si la inclinación de los muros es más pronunciada. Además, el ángulo  $\alpha$  puede afectar a la zona de concentración de esfuerzos, debido a que si los muros son más inclinados entonces la zona de concentraciones de esfuerzos puede aumentar significativamente.

La Figura 8 muestra la altura del arco como función de la inclinación de los muros, se muestran, además, la distribución de esfuerzos formadas debajo del arco (Kvapil, 2008).

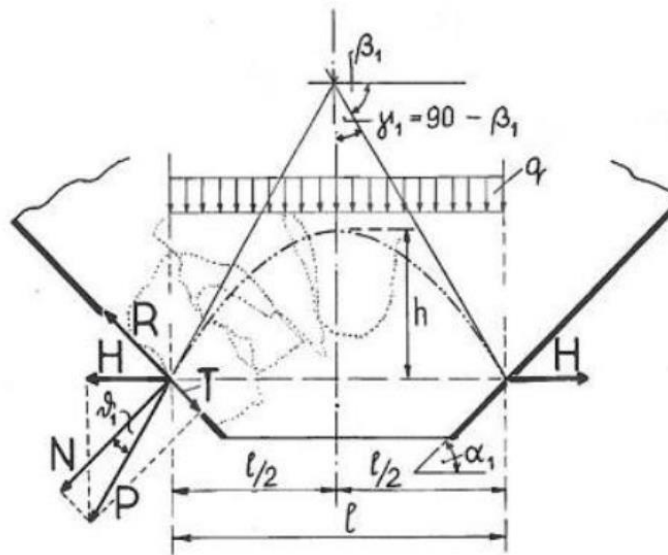


Figura 8: Diagrama de fuerzas del arco mecánico (Kvapil, 2008).

Según Kvapil (2008) la formación de arcos sobre un punto de extracción con materiales gruesos se puede generar mediante las siguientes condiciones:

1. La reducción de la apertura del punto de extracción es la principal causa de la formación de arcos.
2. La capa inferior de bloques se tranca en la salida del material.
3. La línea media de un arco tiene forma parabólica.
4. La altura del arco depende de la inclinación de los muros del punto de extracción.
5. Al disminuir la altura del arco se incrementan los esfuerzos en los muros del punto de extracción.



6. Punto de extracción con muros excesivamente inclinados son peligrosos en operación ( $\alpha > 60^\circ$ ).
7. El arco se forman más fácilmente si la movilidad del material grueso es baja.
8. Arcos planos pueden ser formados si las partículas son más irregulares y fuertes.
9. Los arcos se forman más fácilmente si los bloques de rocas son más grandes.
10. Una apertura pequeña facilita la formación de arcos y una apertura grande lo reduce.

### **2.6 Modelos físicos de colgaduras**

Desde hace un tiempo a la fecha, son varios los estudios que directa o indirectamente han experimentado con colgaduras en puntos de extracción. Principalmente, el laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile, se ha comprometido a aumentar el conocimiento sobre este problema operacional de las minas de block caving con diferentes estudios: (Fuenzalida, 2012; Orellana, 2012; Gómez, 2014 y Olivares, 2014).

Debido a la importancia de estos estudios y la influencia que tienen en la presente investigación se presenta un resumen de cada uno de ellos.

#### **2.6.1 Estudio del flujo gravitacional confinado y su aplicación a minería de caving (Fuenzalida, 2012)**

El objetivo principal de este estudio fue mejorar el entendimiento sobre los mecanismos físicos en un flujo gravitacional confinado aplicado a minería de *caving* a través de un set experimental. Además de estudiar el efecto de la sobrecarga aplicada en la capacidad de fluir del material.

Se desarrollaron un total de 20 experimentos, destinados a medir distintas variables como la condición de flujo (flujo libre, flujo intermitente o no flujo), las zonas de movimiento y extracción, fragmentación, grado de confinamiento y capacidad de fluir del material. Los experimentos se diferenciaron entre si variando el tamaño característico del material y la carga aplicada por la prensa.

Las principales conclusiones del estudio fueron:

- El material más grueso tuvo un mayor grado de compactación que el más fino.
- A mayor esfuerzo vertical aplicado, ambos materiales presentaron un mayor grado de compactación y un mayor índice de ruptura.
- A mayor esfuerzo vertical aplicado, mayor es el esfuerzo radial ejercido por el material hacia las paredes del cilindro.
- A mayor esfuerzo vertical aplicado, la altura de extracción disminuye.
- A medida que aumentan los esfuerzos verticales aplicados menor es la probabilidad de un flujo normal y libre, en consecuencia, aumenta la probabilidad de colgaduras debido fundamentalmente a la compactación del material.

#### **2.6.2 Evaluación de variables de diseño del sistema de minería continua a partir de experimentación en laboratorio (Orellana, 2012)**

Este estudio, pese a tener como tema de estudio la minería continua, es de los trabajos que se han hecho que tiene más relación con la presente investigación, debido fundamentalmente a que se busca establecer el efecto de distintas variables de diseño en el tipo de flujo y éxito del sistema de minería continúa, esto último es la diferencia. En este estudio se probaron distintos tipos de bateas, cambiando el ancho del punto de extracción y el ángulo de ellas.

## CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El objetivo principal de la investigación fue el estudio y desarrollo, a través de la modelación, de los fundamentos que sustenten las características del diseño del sistema de minería continua para una explotación de *block/panel caving*. Para ello se buscó establecer el efecto de las variables de diseño del sistema en los índices operacionales y ver si se cumple la similitud dinámica de la modelación a través de materiales granulares equivalentes.

Se desarrolló un total de 12 experimentos en los cuales se variaron distintas variables como la granulometría del material, el ángulo de la batea, la sección de la galería zanja, acortamiento del punto de extracción (distancia calle-visera) y otras más relacionadas con la minería continua, como lo es el equipo dozer y sus variables.

Los principales resultados y conclusiones se resumen en la Tabla 4 donde se observan las diferentes variables analizadas y su efecto en los parámetros operacionales.

*Tabla 4: Resumen efecto de variables en parámetros operacionales (Orellana, 2012).*

Variable	Variación	Productividad	Colgaduras	Esfuerzos	Fuerzas Dozer	Flujo
Fragmentación		Si	Si	No	No	Si
Ángulo batea	58° <sup>v/s</sup> 53°	No	S/I	Si	No	S/I
Sección galería	16 <sup>v/s</sup> 12 [m <sup>2</sup> ]	Si	Si	S/I	S/I <sup>40</sup>	S/I
Distancia calle visera	3.1 <sup>v/s</sup> 2.1 [m]	Si	Si	Si	S/I	S/I
Ápex		Si	Si	Si	S/I	S/I
Equipo Dozer		Si	No	No	Si	Si
Descuelgue		Si	Si	No	No	No

Además de lo anterior, se tiene como resultado principal y útil para esta investigación que al disminuir la sección del punto de extracción (galería zanja) un 25% la masa entre colgaduras disminuyó un 77% y además, al aumentar la altura de la batea un 28% la masa entre colgaduras disminuyó un 50%.

### **2.6.3 Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving (Gómez, 2014)**

Esta investigación, más reciente que las anteriores, tuvo como uno de sus objetivos principales analizar las colgaduras y crear un modelo de ellas a partir de la experimentación, por lo que fue la primera investigación que tuvo como uno de sus temas centrales las colgaduras.

El objetivo principal de la investigación fue proponer un modelo de conminución del material granular además de un modelo de predicción de la frecuencia de colgaduras basados en ensayos experimentales a escala de laboratorio, bajo altos esfuerzos verticales.

## CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La metodología consideró la realización de 30 ensayos (incluyendo réplicas), considerando 3 curvas granulométricas distintas y 5 distintas cargas aplicadas.

Las principales conclusiones respecto a las colgaduras fueron que el tamaño de los fragmentos es uno de los principales factores que influye en la formación de arcos de roca, además una variable con un efecto también significativo fue la presión vertical ejercida.

En relación a lo último se generó un modelo exponencial que logró representar la tendencia de lo observado en los ensayos. El modelo generado se muestra en la Ecuación 3:

$$H_g = H_{go} * \exp(-r \cdot \sigma_v)$$

*Ecuación 3: Modelo predictivo de colgaduras.*

Donde,  $H_g$  es el material extraído entre eventos de colgadura (frecuencia de colgaduras) [masa/# colgaduras];  $H_{go}$  y  $r$  son parámetros de ajuste del modelo que dan cuenta de la tendencia a colgarse para diferentes esfuerzos aplicados propios del material ensayado y  $\sigma_v$  corresponde al esfuerzo vertical aplicado (MPa).

### **2.6.4 Influencia de fino y humedad en flujo gravitacional confinado (Olivares, 2014)**

Como continuación del trabajo realizado por Fuenzalida (2012) se realizó éste estudio, el cual principalmente añadía a lo estudiado anteriormente verificar el efecto de material fino y la presencia de agua en el flujo.

El objetivo general de la investigación fue cuantificar de manera experimental la influencia que tiene el material fino y la humedad en el flujo gravitacional confinado. Y uno de los objetivos secundarios de interés fue generar un modelo multivariable de predicción de colgaduras en función de la carga vertical, presencia de finos y humedad.

Se realizaron 18 experimentos en los cuales se varió la granulometría del material, la humedad presente, la cantidad de finos y la carga vertical con el fin de estudiar el tipo de flujo y estudiar el impacto en la formación y tipo de colgaduras una alta presencia de finos en los puntos de extracción.

Los principales resultados de esta investigación fueron los siguientes:

- El principal factor de colgaduras fue la aparición de grandes colpas en el punto de extracción (material seco y sin presencia de finos).
- La presencia de humedad influyó significativamente en el tipo de flujo haciéndolo intermitente y en algunos casos nulo. Además con la presencia de humedad se registró la mayor cantidad de colgaduras.
- La presencia de humedad y finos disminuyó la capacidad de fluir del material, generando un mayor índice de colgaduras.
- Una gran presencia de finos (sobre 20%) y presencia de humedad (6%) o cargas verticales muy altas (10 Mpa), generó que la fluidez del material se viera drásticamente disminuida y en algunos casos el flujo fue inexistente.

### 2.7 Conclusiones del capítulo

De la revisión bibliográfica realizada se puede concluir lo siguiente:

- En primer lugar, fue importante conocer la influencia que puede llegar a tener una mezcla de partículas en las características del flujo gravitacional, el hecho de que un pequeño cambio en el porcentaje de finos o un aumento de la humedad puedan cambiar totalmente el comportamiento del material refleja lo anterior. Al conocer las propiedades del material, también se hace importante conocer los experimentos realizados a la fecha y cómo se han parametrizado los elipsoides de extracción y de movimiento y cómo el material influye en su tamaño.
- El comportamiento del material, está influenciado por las fuerzas que afectan a las partículas que lo componen, si se quieren realizar experimentos de flujo gravitacional a escala, es importante considerar que las partículas más pequeñas pueden experimentar fuerzas cohesivas que superan en magnitud a las fuerzas gravitacionales y de fricción, por lo que deben ser eliminadas al momento de experimentar para replicar lo que sucede en una mina de *block caving*.
- Se han realizado análisis de similitud con el fin de establecer cuáles son los factores de escala que deben ser utilizados al momento de escalar todo tipo de variables importantes dentro de los experimentos. Una tabla con un resumen de estos factores fue encontrada.
- Respecto a las colgaduras, existen estudios que han sido realizados principalmente en silos con aperturas circulares. Estos estudios han arrojado numerosas relaciones que pueden predecir de cierta manera las colgaduras. Los resultados han sido utilizados para predecir colgaduras en puntos de extracción, que si bien son una aproximación no reflejan correctamente el fenómeno de una colgadura en una mina de *block caving*.
- Los estudios que han sido realizados por el laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile, han aumentado significativamente el conocimiento acerca de las colgaduras, sin embargo, aún sigue existiendo una falta en el conocimiento acerca de ellas, como lo es por ejemplo, el efecto de las variables de diseño de una batea y la granulometría en la frecuencia de colgaduras y el tipo de flujo

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Introducción

Tal de cumplir los objetivos planteados se desarrolló una metodología experimental que incluyó los estudios de *benchmarking* que se realizaron para establecer las bases de los experimentos, el equipo de laboratorio construido, las curvas granulométricas preparadas y la caracterización del material utilizado, la forma en la cual se realizaron los experimentos y los resultados que se esperaba obtener de ellos. Finalmente, se incluye un plan experimental que muestra en detalle los experimentos realizados.

#### 3.2 Benchmarking

Se realizó un *benchmarking* para comprender principalmente que se está utilizando actualmente en la industria minera y, específicamente, en minas de *block caving* en términos de tipos de bateas y equipos LHD, con el fin de construir un set experimental que tenga bases en los actuales métodos de operación de las minas de *block caving*, para después, mediante la experimentación poder determinar cuáles son los parámetros geométricos de una batea que más influyen en el flujo gravitacional o el efecto de cierto tipo de LHD sobre otro.

##### 3.2.1 Bateas

El objetivo de una batea es conectar el nivel de producción con el nivel de hundimiento para posteriormente recibir el material quebrado y dejarlo disponible para su extracción en el nivel de producción. La geometría de la batea depende de la técnica de hundimiento utilizada. En hundimiento avanzado la batea es construida totalmente desde el nivel de producción hacia arriba una vez que el nivel de hundimiento ya ha sido socavado (Figura 9 (a)). En este tipo de hundimiento la altura de la batea queda definida por la diferencia de cotas entre el nivel de hundimiento y producción. En hundimiento convencional la batea es construida en dos etapas (Figura 9 (b)). La primera parte de la batea es construida antes de la socavación desde el nivel de producción, y luego la segunda parte se construye simultáneamente con la socavación del nivel de hundimiento.

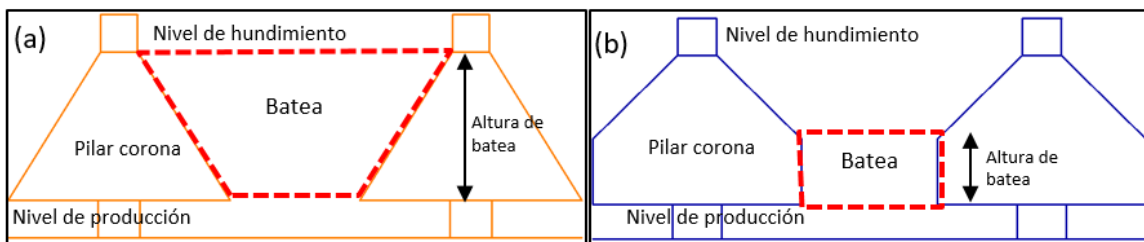


Figura 9: Diseño de batea y relación con tipo de hundimiento, avanzado (a) convencional (b).

Una batea puede ser parametrizada por 8 parámetros de diseño, los cuales son descritos en la Tabla 5. Una vista 3D de una batea es mostrada en la Figura 10, en ella también se pueden observar los parámetros mencionados anteriormente.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Tabla 5: Parámetros de la batea.

Parámetro	Símbolo	Descripción
Largo de batea	L	Distancia entre dos puntos de extracción de una batea.
Altura de batea	H	Distancia entre la visera y el límite superior de la batea.
Ancho superior de batea	$T_W$	Ancho superior de la batea.
Largo superior de batea	$T_H$	Largo superior de la batea.
Ancho punto de extracción	$D_W$	Ancho de la galería zanja (punto de extracción).
Alto punto de extracción	$D_H$	Altura de la galería zanja (punto de extracción).
Ángulo zanja	$\alpha$	Ángulo de la batea hacia el pilar zanja
Ángulo crown pillar	$\beta$	Ángulo de la batea desde el techo de la galería zanja al ápex del <i>crown pillar</i> .

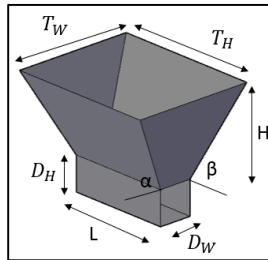


Figura 10: Dimensiones de la batea, vista 3D.

Se realizó un estudio de las bateas utilizadas por las minas de *block/panel caving* de CODELCO. Las minas consideradas fueron Andina, El Teniente y el proyecto Chuquicamata subterráneo. En la Tabla 6 se muestran las bateas, el tipo de hundimiento utilizado y los principales parámetros explicados anteriormente.

Tabla 6: Dimensiones bateas minas de *block/panel caving* (Codelco, 2011).

Mina	Hundimiento	L [m]	H [m]	$T_W$ [m]	$T_H$ [m]	$D_W$ [m]	$D_H$ [m]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]
III Panel, Andina	Convencional	12,5	9,8	10,5	12,5	3,6	3,7	73°	90°
Chuquicamata Subterráneo	Convencional	14,6	7,0	13,8	14,6	4,4	4	61°	90°
Diablo Regimiento, El Teniente	Avanzado	14	16	16,3	34	4,5	4	70°	58°
Reservas Norte, El Teniente	Avanzado	13	14,2	17,3	34,7	3,6	3,9	64°	53°

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Además de las bateas encontradas, también se investigó sobre las bateas utilizadas en minas de *block caving* en el mundo. Una de las alternativas interesantes, distinta a lo que se realiza en las minas de CODELCO, es lo que actualmente investiga la mina Ridgeways Deeps, en la cual se han probado un total de 133 bateas (que hoy están en producción) con 14 diseños diferentes. Los diseños se diferencian en la forma en que las bateas fueron puestas en producción, lo innovador es el diseño que se utiliza para construir la batea en un solo evento de tronadura.

### 3.2.2 LHD

Los equipos LHD han sido utilizados en minería subterránea, específicamente en minería de *caving* desde la década de los 70' y 80'. Los cargadores de bajo perfil (LHD) se introdujeron como una alternativa al sistema de extracción que se tenía en esa época; traspaso de mineral íntegramente mediante piques, debido fundamentalmente al cambio en las características del mineral, el cual pasó de ser secundario (baja resistencia y alta ley) a ser primario (alta resistencia y baja ley). Los LHD se han caracterizados por tener una alta productividad y una gran capacidad de transportar fragmentos de gran tamaño.

Desde la fecha en que se introdujeron en la industria hasta hoy, han sido numerosos los tipos de LHD que se han creado, cambiando en su capacidad, tamaño, tipo de energía utilizada, etc. Sus capacidades van desde 1.5 toneladas a 25 toneladas. Además, gran parte de los LHD utilizan petróleo como combustible y otros eléctricos, y existen otros más innovadores y que de seguro serán los que se utilizarán en el futuro, LHD autónomos, los cuales eliminan el uso de trabajadores, haciendo una operación más segura y controlable.

Debido a la gran gama de marcas que existen en el mercado, la similitud en sus equipos y la cantidad de LHD existentes, se estudiaron sólo los LHD de la marca Caterpillar y aquellos tamaños que son más utilizados en las minas de *block caving*. En la Figura 11 se muestra uno de los LHD.



Figura 11: LHD Caterpillar R1700G.

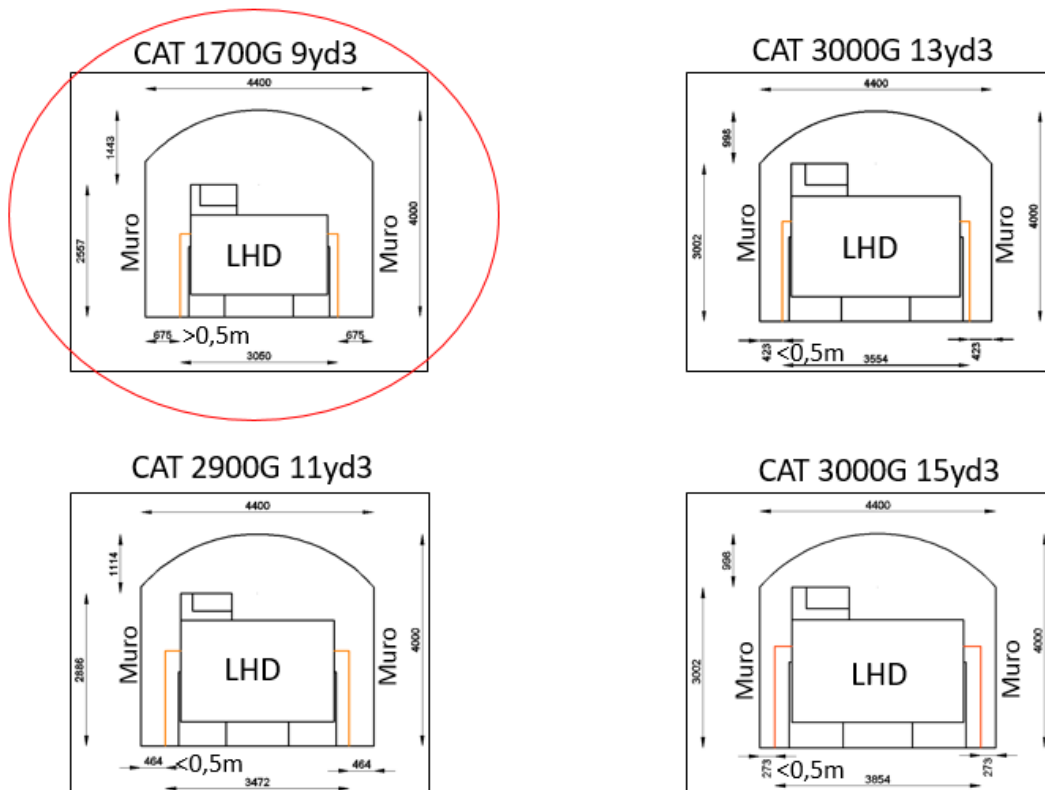
La Tabla 7 muestra cuatro equipos LHD con sus características, además se muestra la distancia a los muros y el techo considerando una sección de un alto de 4 metros por un ancho de 4.4 metros.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

*Tabla 7: Características equipos LHD Caterpillar*

Medidas	EQUIPOS CAT			
	R3000H	R3000H	R2900G	R1700G
Capacidad de carga [ton]	20	20	17.2	14
Capacidad del balde [ $yd^3$ ]	15.2	13.7	11.6	8.6
Alto (con cabina) [mm]	3002	3002	2886	2557
Ancho (con balde) [mm]	3854	3554	3472	3050
Distancia a caja lateral [mm]	273	423	464	675
Distancia a techo [mm]	998	998	1114	1443

La Figura 12 muestra gráficamente el espacio que ocupa cada uno de los LHD anteriores en una sección de 4 por 4.4 metros cuadrados.



*Figura 12: Disposición espacial LHD en sección de 4 x 4.4 m<sup>2</sup>*

Se puede observar, que según la norma de seguridad, la cual consiste en dejar 0.5 metros de distancia a los muros, el equipo de 9  $yd^3$  es el único que la cumple. Es decir, el LHD 1700G es el de mayor capacidad que podría transitar seguro en esa galería.



### 3.3 Descripción equipo de laboratorio

Los experimentos de flujo gravitacional se realizaron en el laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile. Se experimentó con un modelo físico a una escala 1:50 que representa una columna de 50 metros, además se construyó un sistema de extracción automático y electrónico que emula la extracción realizada por un equipo LHD en una mina de *block caving*.

#### 3.3.1 Bateas

Como se mencionó anteriormente, el tipo de batea está sujeto al tipo de hundimiento que se utiliza en una mina de *block caving*. Uno de los objetivos de esta investigación fue estudiar el efecto de las variables de diseño de una batea en la frecuencia de colgaduras y sobre tamaños y para ello fue necesario considerar los dos tipos de hundimiento que se utilizan actualmente, convencional y avanzado, y a partir de las bateas asociadas experimentar cambiando sus variables de diseño.

En primer lugar se consideró una batea para hundimiento convencional, considerando las dimensiones que poseen las bateas que posiblemente se utilizarán en el proyecto Chuquicamata subterráneo. La Figura 13 muestra una vista isométrica de ésta batea con sus dimensiones, que se utilizó como el caso base.

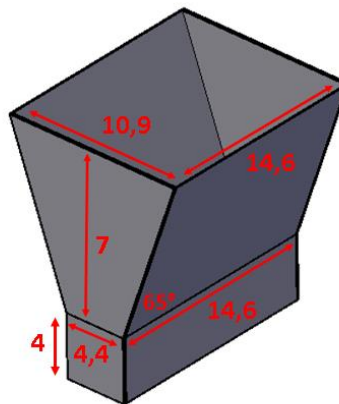


Figura 13: Dimensiones batea caso base, vista isométrica.

A partir de ésta batea y con el fin de estudiar el efecto del largo se construyó una segunda batea, en la cual se cambió el largo de 14,6 metros de la batea caso base por una más corta de 12 metros, las demás dimensiones se mantuvieron constantes, con el fin de estudiar sólo ésta variable. Ésta batea fue denominada como batea corta y la Figura 14 muestra una vista isométrica de ella.

### CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

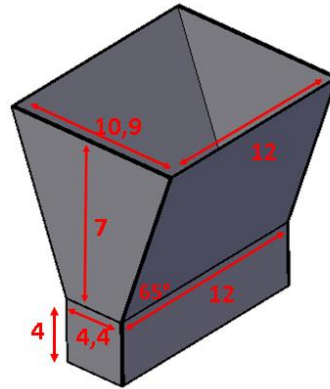


Figura 14: Dimensiones batea corta, vista isométrica.

En tercer lugar, considerando el hundimiento avanzado y a partir de la batea del caso base, se construyó una tercera batea en la cual se cambió el alto de la batea caso base de 7 metros por una batea más alta de 15 metros, además se mantuvo el ancho superior de la batea caso base, en consecuencia, el ángulo zanja de ésta última batea cambió de 65° a 77°. Por lo anterior, en ésta batea se estudió tanto el alto como el ángulo, las demás dimensiones se mantuvieron constantes, a fin de estudiar sólo éstas variables. Ésta batea fue denominada como batea alta y la Figura 15 muestra una vista isométrica de ella.

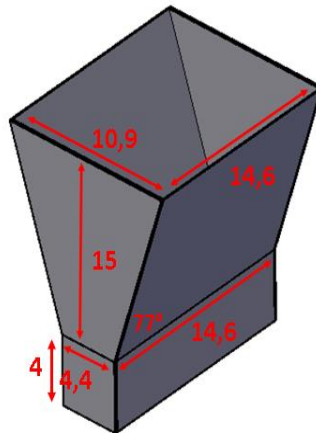


Figura 15: Dimensiones batea alta, vista isométrica.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el caso de las dos bateas para hundimiento convencional, como se puede apreciar en la Figura 16 y 17, el ángulo hacia el crown pillar es de  $90^\circ$  esto es debido a que éstas bateas son construidas en dos fases y en la primera fase se construye un cajón el cuál es íntegramente representado por éstas bateas, sobre ese cajón al socavar el nivel de hundimiento se construye una segunda parte de la batea, la cual tiene un ángulo de  $45^\circ$  aproximadamente hacia el crown pillar. Las bateas construidas no consideraron la segunda fase de la construcción, debido fundamentalmente a lo mostrado por (Vargas, 2010) donde se define el ángulo de flujo de la zona de extracción como lo indica la Ecuación 4, para ello es necesario conocer el ángulo de fricción propio del material, que en el caso de minerales va desde  $35^\circ$  a  $45^\circ$  lo que da un rango para el ángulo de flujo de  $62.5^\circ$  a  $67.5^\circ$ . Por lo tanto, cómo el ángulo desde el límite superior de la batea hacia el pilar corona es de  $45^\circ$ , el diseño de las bateas construidas no debiese tener un efecto en el flujo de mineral hacia el punto de extracción, con ésta consideración la construcción de las bateas fue mucho más simple. La Figura 16 muestra un esquema de lo explicado anteriormente.

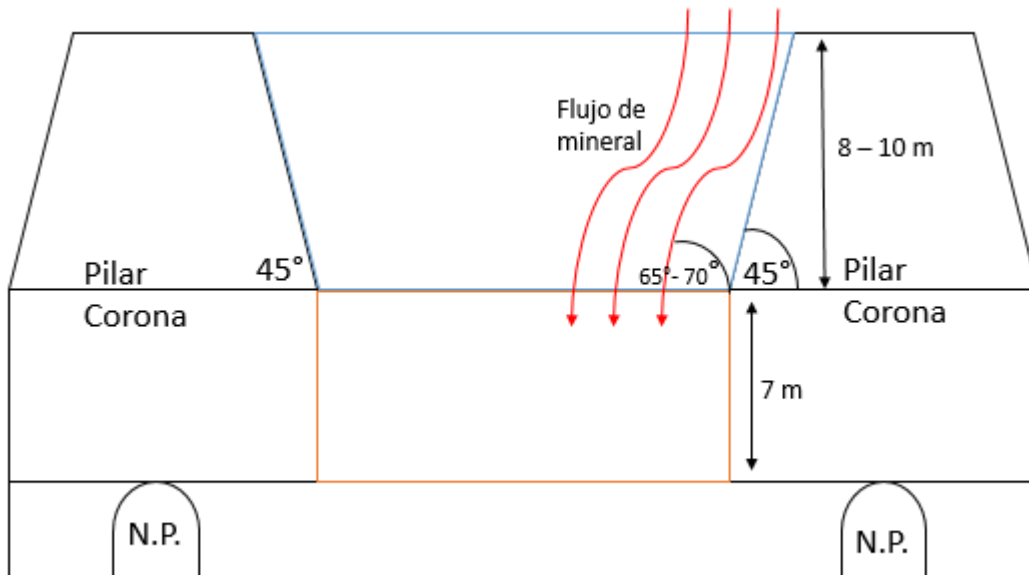


Figura 16: Esquema flujo de mineral en batea.

$$\alpha = 45 + \frac{\varphi}{2}$$

Ecuación 4: Determinación ángulo de flujo (Vargas, 2010).

### 3.3.2 Sistema de extracción y modelo

El modelo físico y el sistema de extracción emulan el proceso de extracción desde dos puntos de extracción en una batea. En la Figura 17 es posible observar los diferentes componentes del modelo cargado con material y marcadores.

### CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL



Figura 17: Modelo físico y sus componentes

En la Figura 18 se puede observar el sistema de extracción automático, el punto de extracción 1, el LHD 1 y el punto de descarga.



Figura 18: Sistema de extracción y punto de extracción 1 (vista lateral).

El sistema de extracción automático del modelo físico se diseñó en base al LHD (Cat R1700G) de 9 yd<sup>3</sup> mencionado anteriormente, su funcionamiento es mostrado y explicado en la Tabla 8. Como se muestra en la Tabla 8, la principal parte del equipo LHD que se consideró para construir fue su balde, el cual fue debidamente escalado de acuerdo a sus dimensiones (volumen y ancho) y forma. Cabe destacar que el LHD funciona electrónicamente y para extraer ejerce una fuerza sobre la pila de mineral, tanto para penetrar como para levantar el material, el cálculo de ésta fuerza se puede revisar en el ANEXO A.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Tabla 8: Movimiento del sistema de extracción.

Fase	Esquema	Descripción
1.Inicial		El sistema de extracción fue activado y ubicado a una distancia $L1$ de la pila de mineral.
2.Movimiento		El sistema de extracción se movió desde $L1$ hacia la pila (desde $a$ hasta $b$ ). La distancia $L2$ dependió del ángulo de reposo $\alpha$ del material
3.Carga		El sistema de extracción avanzó en contra de la pila cargando el mineral. El sistema de extracción tiene como límite de avance el punto $c$ , el cual está definido por la visera del punto de extracción.
4.Transporte		El sistema de extracción transportó el mineral hacia la abertura ubicada en el punto $h$ .
5.Descarga		El sistema de extracción descargó el mineral en la abertura.

### 3.3.3 Dimensiones escaladas

La escala elegida para realizar los experimentos se basó en un análisis realizado anteriormente por Olivares (2014), el cuál estudió los distintos tipos de escala que podrían ser utilizados en un modelo físico, llegando a la conclusión de que al momento de elegir la escala es necesario considerar, en primer lugar la representatividad que es posible alcanzar con el tamaño elegido y la factibilidad de posteriormente escalar los resultados. En segundo lugar, es necesario considerar que a mayor escala más espacio y tiempo es necesario para realizar los experimentos y que a menor escala la constructibilidad del modelo se hace muy complicada.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Respecto a la representatividad del modelo físico, Castro (2007) desarrolló un modelo a gran escala (1:10) y una de sus principales conclusiones fue que para los experimentos de flujo gravitacional no es necesario construir grandes modelos, pues los fenómenos estudiados pueden ser representados por escalas mucho menores.

Debido a lo anterior, se eligió la escala 1:50 ya que ésta permite construir un modelo y un sistema de extracción con un tamaño adecuado y representa una columna de mineral que puede replicar los fenómenos que ocurren dentro de una batea y en un radio cercano a ella, respecto a las colgaduras y sobre tamaños.

Las dimensiones escaladas (1:50) del modelo físico, material utilizado y LHD son presentadas en la Tabla 9.

*Tabla 9: Dimensiones escaladas*

Equipo	Escala	1:1	1:50
Dimensiones del modelo físico	Altura [m]	50	1
	Volumen [m <sup>3</sup> ]	23.62	0.19
Mineral	Densidad aparente [t/m <sup>3</sup> ]	1.61	1.61
	Cantidad Material [t]	38.03	0.30
LHD	Ancho de balde [m]	3.05	0.06
	Capacidad de balde [t]	14	0.000112
	Volumen de balde [yd <sup>3</sup> ]	8.60	0.000068

Como se explicó anteriormente, tres diferentes diseños de batea fueron usados en los experimentos. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las imensiones de cada batea y las dimensiones escaladas utilizadas en la construcción de éstas.

### 3.3.4 Caracterización del material

El material del modelo consistió en mineral fragmentado (Andesita) proveniente de la mina El Teniente. Se trató de roca competente y en la Tabla 10 se pueden observar sus principales características.

*Tabla 10: Propiedades del material (Garcés, 2015).*

Ítem	Valor	Comentario
<i>Uniaxial Compressive Strength</i> (UCS)	115 MPa	Alta resistencia
<i>Rock Quality Designation</i> (RQD)	97	Muy buena calidad
Discontinuidades por metro	3 discontinuidades/metro	Estructuras muy separadas
<i>Geological Strength Index</i> (GSI)	60	Buena calidad
Factor de forma (eje mayor/eje medio)	1.7	Partículas irregulares

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Además de las características anteriores fue posible caracterizar las curvas granulométricas utilizadas en los experimentos a partir del coeficiente de uniformidad ( $C_U$ ) (Ecuación 5) y el coeficiente de curvatura ( $C_Z$ ) (Ecuación 6). Los cuales están definidos de la siguiente forma:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

*Ecuación 5: Coeficiente de uniformidad (Craig, 2004).*

$$C_Z = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}}$$

*Ecuación 6: Coeficiente de curvatura (Craig, 2004).*

Donde  $d_{10}$  está definido como el tamaño efectivo y representa el tamaño bajo el cual se encuentra el 10% de las partículas, y  $d_{60}$  y  $d_{30}$  representar el tamaño bajo el cual se encuentra el 60% y 30% de las partículas, respectivamente. A mayor índice de uniformidad, mayor es el rango de tamaño de las partículas. Un coeficiente de curvatura entre 1 y 3 indica una buena graduación de las partículas (Olivares, 2014).

La Tabla 11 muestra un análisis realizado a las 3 curvas granulométricas utilizadas en los experimentos, las cuales se describen en el siguiente punto.

*Tabla 11: Coeficiente de uniformidad y curvatura para granulometrías experimentos.*

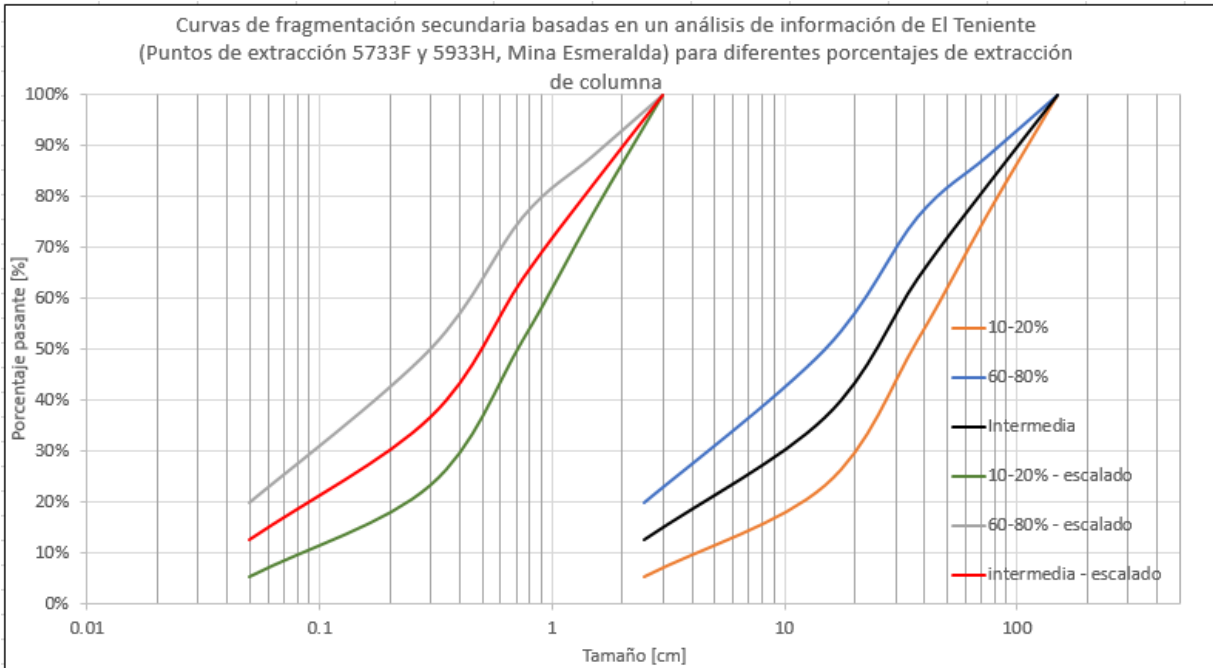
Tamaño característico [cm]	Granulometría		
	Fina	Intermedia	Gruesa
$d_{10}$	1.5	2.1	4.5
$d_{30}$	5	10	20
$d_{60}$	22	33	48
Coeficiente de uniformidad $C_U$	15	16	11
Coeficiente de curvatura $C_Z$	0.8	1.4	1.9

Los resultados muestran un mayor coeficiente de uniformidad para la curva intermedia y el menor para la curva gruesa, y el coeficiente de curvatura se encuentra entre 0.8 y 1.9 para las tres curvas, por lo que las curvas tienen una buena graduación.

### 3.4 Granulometrías

El material se preparó en 3 curvas escaladas (1:50) de distribución de tamaños distintas (gruesa, intermedia y fina, ver Figura 19). Las distribuciones de tamaño fueron obtenidas de mediciones de granulometría en la Mina Esmeralda – El Teniente en dos puntos de extracción diferentes (Garcés, 2015). La Figura 19 muestra la granulometría observada en esos puntos (curvas azul, negro y naranja representan la granulometría fina, intermedia y gruesa, respectivamente) y las granulometrías escaladas (curvas gris, rojo y verde representan la granulometría fina, intermedia y gruesa, respectivamente). La granulometría observada se midió en los puntos de extracción considerando los 3 ejes ortogonales de cada fragmento y calculando el valor medio  $((a_1+a_2+a_3)/3)$ .

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL



*Figura 19: Granulometrías medidas en puntos de extracción. Mina Esmeralda - El Teniente (Garcés, 2015).*

Los tamaños característicos  $d_{20}$ ,  $d_{50}$  y  $d_{80}$  y el porcentaje de columna extraída asociado a cada distribución de tamaños se muestra en la Tabla 12.

*Tabla 12: Tamaños característicos y porcentaje de columna extraída asociado.*

Fragmentación	$d_{20}$ [cm]	$d_{50}$ [cm]	$d_{80}$ [cm]	% de columna extraída
Fina	2	12	45	60-80%
Intermedia	4	23	68	20-30%
Gruesa	13	46	81	10-20%
<b>Fragmentación – Escalada 1:50</b>	<b><math>d_{20}</math> [cm]</b>	<b><math>d_{50}</math> [cm]</b>	<b><math>d_{80}</math> [cm]</b>	<b>% de columna extraída</b>
Fina	0,04	0,24	0,90	60-80%
Intermedia	0,08	0,46	1,36	20-30%
Gruesa	0,26	0,92	1,62	10-20%



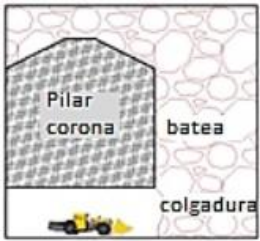
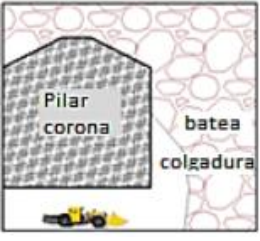

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El rango de las distribuciones de tamaño escaladas fue desde 425 [ $\mu\text{m}$ ] (tamiz #40) a 3.49 [cm] (tamiz 1" 3/8'). El tamaño máximo de partícula fue determinado a partir de las dimensiones de la batea y del punto de extracción, con la condición de que la roca de mayor dimensión fuera capaz de pasar a través del sistema sin obstruir la batea o el punto de extracción, esto debido fundamentalmente a que si sucedía no existía la capacidad para descolgar y el experimento debía terminar. El tamaño mínimo de partícula (0.3 mm) fue determinado a partir de un estudio de análisis de similitud mencionado en la revisión bibliográfica (Pineda, 2012).

### 3.5 Colgadas

Las colgadas que ocurrieron en los experimentos fueron clasificadas en tres tipos distintos, las cuales se muestran en la Tabla 13.

*Tabla 13: Diferentes tipos de colgadas (Olivares, 2014).*

Tipo colgadura	Esquema	Descripción
<p><b>1. En el punto de extracción (colgadas bajas)</b></p>		<p>Colgadas formadas en el punto de extracción. Estas colgadas se forman por un arco estable de mineral que se apoya en el piso y los muros del punto de extracción, lo que provoca una interrupción en el flujo y el equipo LHD no es capaz de extraer mineral.</p>
<p><b>2. En la batea (colgadas altas)</b></p>		<p>Colgadas formadas dentro de la batea. Este tipo de colgadas son soportadas por los muros de la batea y puede cubrir tanto uno como los dos puntos de extracción asociados a ella.</p>
<p><b>3. Sobre la batea (colgadas altas)</b></p>		<p>Colgadas formadas por un gran arco estable soportado en el <i>crown pillar</i>. Este tipo de colgadas podría cubrir varias bateas.</p>

Las colgadas tipo 2 son colgadas altas y su altura es un parámetro importante que fue medido. La forma de medir las colgadas altas fue desde la visera del punto de extracción hasta la altura del arco, tal como se muestra en la Figura 20. En el caso de las colgadas formadas en el punto de extracción, no existió altura que medir por lo que se consideró como cero.

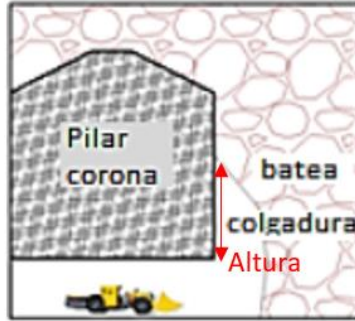


Figura 20: Medición altura de una colgadura.

### 3.6 Zonas de extracción (IEZ)

Para medir el IEZ, se construyeron marcadores los cuales fueron posicionados dentro del modelo físico. La información obtenida desde los marcadores fue la masa a la cual el marcador fue extraído y su identificación, ésta información permite posteriormente construir el IEZ como función de la masa extraída o el porcentaje extraído de columna (%). Las capas de marcadores se posicionaron a 10 cm en altura entre ellas y dentro de la misma capa fueron ubicados a 6 cm en las dos direcciones. Los marcadores fueron seleccionados por su tamaño, el cual fue igual al  $d_{50}$  de cada granulometría. La Figura 21 muestra el posicionamiento de los marcadores dentro del modelo.

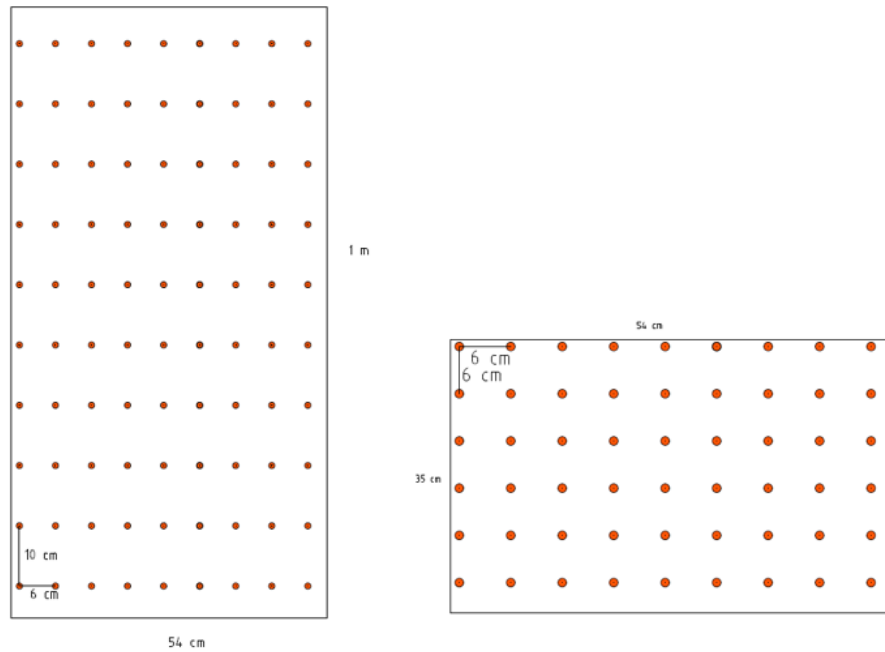


Figura 21: Posicionamiento marcadores, vista lateral y vista en planta

### 3.7 Plan experimental

El plan experimental consideró los 3 tipos de bateas mencionados anteriormente. Para la primera batea (caso base) se utilizaron 3 granulometrías distintas (fina, intermedia y gruesa) y para las otras dos bateas se utilizaron sólo 2 granulometrías (fina y gruesa). La razón de por qué sólo dos granulometrías fueron utilizadas en los experimentos llevados a cabo en las bateas 2 y 3 fue que los resultados para el experimento realizado con la batea caso base y la granulometría intermedia no presentaron una clara diferencia con los resultados de las otras dos granulometrías. Mientras tanto, hubo una clara diferencia entre los experimentos realizados con granulometría fina y gruesa. El número total de experimentos fue siete y son mostrados y explicados en la Tabla 14.

Tabla 14: Plan experimental

Experimento	Granulometría	Objetivo	Batea
1 (caso base)	Fina d50=0,1-0,2m	El objetivo de estos experimentos fue cuantificar el flujo de mineral, a través de la medición de la frecuencia de colgaduras y sobretamaños, el IEZ e IMZ para diferentes granulometrías, usando una batea del tipo hundimiento convencional.	
2 (caso base)	Intermedia d50=0,2-0,3m		
3 (caso base)	Gruesa d50=0,3-0,4m		
4	Fina d50=0,1-0,2m	El objetivo de estos experimentos fue cuantificar el efecto del largo de la batea en la frecuencia de colgaduras y el tipo de flujo para diferentes granulometrías. Esta batea fue diseñada 2.6 m más corta que la batea caso base. Las demás dimensiones no cambiaron.	
5	Gruesa d50=0,3-0,4m		
6	Fina d50=0,1-0,2m	El objetivo de estos experimentos fue cuantificar el efecto de la altura y el ángulo de la batea en la frecuencia de colgaduras y el tipo de flujo para diferentes granulometrías. Esta batea fue diseñada 8 m más alta que la batea del caso base y el ángulo zanja cambió a 77°. Las demás dimensiones no cambiaron.	
7	Gruesa d50=0,3-0,4m		

### 3.8 Procedimiento experimental

El procedimiento que se siguió en la realización de cada uno de los experimentos fue el siguiente:

1. El modelo, con la batea correspondiente al experimento y sistema de extracción fue posicionado.
2. El modelo fue cargado con el material y los marcadores correspondientes al experimento.
3. La extracción comenzó para ambos puntos de extracción.
4. La secuencia de extracción fue una extracción por punto de extracción hasta que una colgadura o un sobre tamaño aparecía.
5. Si se observaba la formación de un arco en un punto de extracción, el número de baldadas extraídas antes que se produjera la colgadura era registrado.
6. Si una colgadura ocurría, el tipo (baja o alta) y la altura de la colgadura eran registrados. Luego, la colgadura era colapsada manualmente.
7. Si una partícula de grandes dimensiones aparecía, el eje máximo de la partícula era medido, y si éste eje medía más de 5 cm la partícula era registrada como sobre tamaño.
8. Si un marcador aparecía durante un ciclo, la información acerca de él era registrada.
9. El modelo fue recargado cada 50 extracciones por punto de extracción con material extraído previamente.
10. Después de 500 extracciones por punto de extracción el experimento finalizó y la información fue recopilada.

El procedimiento experimental se resume en la Figura 22.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL



Figura 22: Procedimiento experimental.

### 3.9 Conclusiones del capítulo

En el capítulo de metodología experimental se pudo concluir lo siguiente:

- En primer lugar, se realizó un benchmarking del cual se desprende que, en relación a las bateas utilizadas por CODELCO, éstas tienen un diseño que está ligado al tipo de hundimiento utilizado, convencional o avanzado, por lo que el presente estudio debería abordar las dos variantes. En relación a los LHD, hoy en día existen numerosas marcas y distintas alternativas de equipos, para éste estudio lo importante fue conocer los tamaños más utilizados en la industria y cuál podría ser utilizado en una galería de 4.4 x 4 m<sup>2</sup>.
- Respecto al equipo de laboratorio a utilizar, se consideró como caso base una batea que posiblemente sea utilizada en el proyecto Chuquicamata Subterráneo y a partir de ésta se construyeron dos bateas en las cuales se modificó el largo y el alto respectivamente.
- El sistema de extracción creado, fue el sistema más moderno que se ha creado en el laboratorio, el cuál replica de mejor manera la extracción realizada por un LHD, principalmente, debido al funcionamiento electrónico del sistema.
- Se eligió una escala 1:50 debido a la facilidad para construir las partes pequeñas del modelo y debido a que no es necesario construir un modelo a gran escala para que los fenómenos de flujo gravitacional que ocurren en una mina, sucedan en el modelo a escala. El modelo representó una columna de mineral de 50 metros.
- La granulometría utilizada se basó en la granulometría medida en puntos de extracción de la Mina Esmeralda de El Teniente, de ésta medición se obtuvieron tres curvas distintas que reflejan distintos porcentajes de extracción de columna y distintos tamaños de fragmentos.
- Las colgaduras se midieron considerando la masa extraída entre cada una de ellas y también se clasificarán por tipo y por altura, respecto a las zonas de extracción, se seleccionaron ciertas partículas a las cuales se les adjudicó un ID y un color específico, se anotará el momento en que sean extraídas y con ello, finalmente, se podrá reconstruir el IEZ.
- El plan experimental, considerando los tres tipos de bateas y las tres granulometrías resultó en 7 experimentos distintos cuyos resultados se muestran en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO 4

---

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 4.1 Introducción

En el presente capítulo se muestran los resultados y el respectivo análisis para el plan experimental explicado en el capítulo anterior, el cual consistía en 7 experimentos distintos, con los cuales se pretendió estudiar el efecto del diseño de bateas en la frecuencia de colgaduras, frecuencia de sobre tamaños y tipo de flujo.

Los resultados y análisis mostrados son respecto a la masa entre colgaduras, la productividad por balde del LHD, la altura de las colgaduras, el número de baldadas antes de que se produzca una colgadura, la masa entre sobre tamaños, la masa entre el total de interferencias y las zonas de extracción.

#### 4.2 Masa entre colgaduras

La frecuencia de colgaduras fue cuantificada de acuerdo a cuantos kilogramos de mineral podrían ser extraídos entre colgaduras. En la Tabla 15 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para la masa entre colgaduras [kg] y el tonelaje entre colgaduras [ton] a escala mina. El tonelaje fue escalado de acuerdo a la Ecuación 7.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

*Tabla 15: Resultados frecuencia de colgaduras*

Información experimental			Resultados			
Experimento	Batea	Distribución granulométrica del material Razón $d_w/d_{80}$	Masa entre colgaduras media [kg]	Masa entre colgaduras mediana [kg]	Desviación estándar	Tonelaje entre colgaduras [ton]
1	Caso base	Fina ( $d_w/d_{80} = 9.8$ )	2.02	1.27	1.71	253
2	Caso base	Intermedia ( $d_w/d_{80} = 6.5$ )	1.60	1.17	1.44	200
3	Caso base	Gruesa ( $d_w/d_{80} = 5.4$ )	1.40	1.12	0.87	175
4	Batea corta	Fina ( $d_w/d_{80} = 9.8$ )	2.48	1.44	1.94	310
5	Batea corta	Gruesa ( $d_w/d_{80} = 5.4$ )	1.46	1.10	1.02	183
6	Batea alta	Fina ( $d_w/d_{80} = 9.8$ )	2.46	1.65	1.81	308
7	Batea alta	Gruesa ( $d_w/d_{80} = 5.4$ )	1.58	1.15	0.92	198

$$\text{toneladas} = \text{kg} * \frac{\text{Escala} (50)^3}{1000}$$

*Ecuación 7: Escalamiento kg a ton.*

Se observó que a medida que la granulometría utilizada fue más fina, la masa entre colgaduras aumentó. Tanto la batea corta como la batea alta obtuvieron como resultado una masa entre colgaduras mayor que la batea del caso base.

La Figura 23 muestra la masa entre colgaduras vs  $d_{80}$ . Se muestra también la desviación estándar para cada uno de los resultados obtenidos. Un ajuste lineal fue realizado y se observó que si el  $d_{80}$  aumenta un 50%, entonces la masa entre colgaduras disminuye alrededor de un 15%.



## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

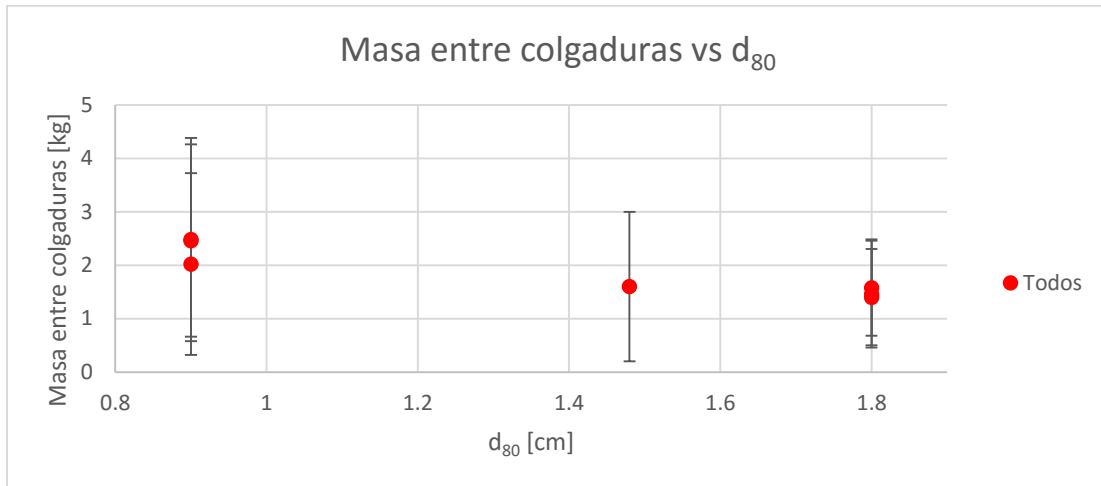


Figura 23: Masa entre colgaduras vs  $d_{80}$ .

La Figura 24 muestra la masa entre colgaduras vs el ángulo de la batea. Se muestra también la desviación estándar para la masa entre colgaduras. Se observó que si el ángulo de la batea aumenta en un 10%, la masa entre colgaduras aumenta alrededor de un 12 a 21%.

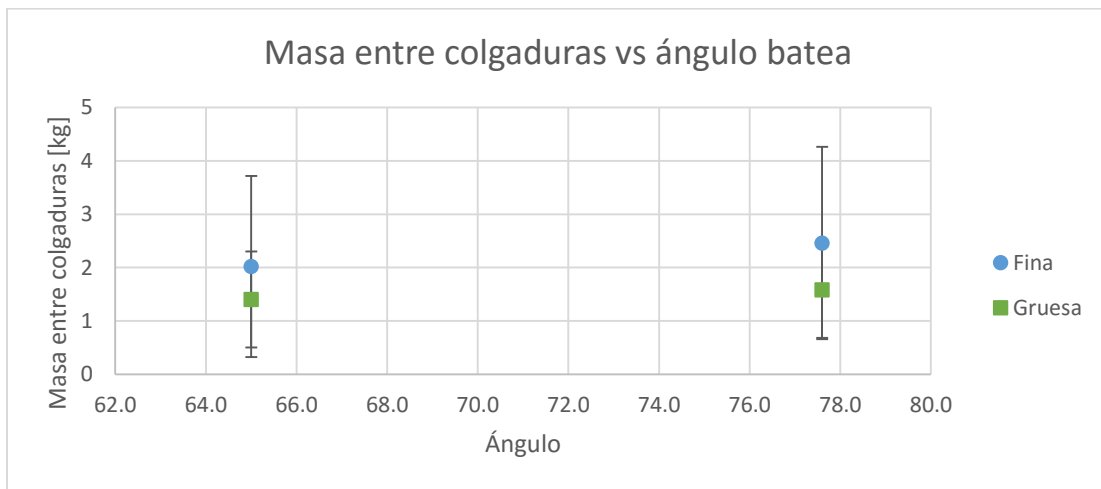


Figura 24: Masa entre colgaduras vs ángulo de batea.

La Figura 25 muestra la masa entre colgaduras vs el largo de la batea. Al igual que las figuras anteriores, se muestra la desviación estándar de los resultados. Se observó que cuando el largo de la batea aumentó en un 10%, la masa entre colgaduras disminuyó en un 1 a 11% aproximadamente, dependiendo de la granulometría.

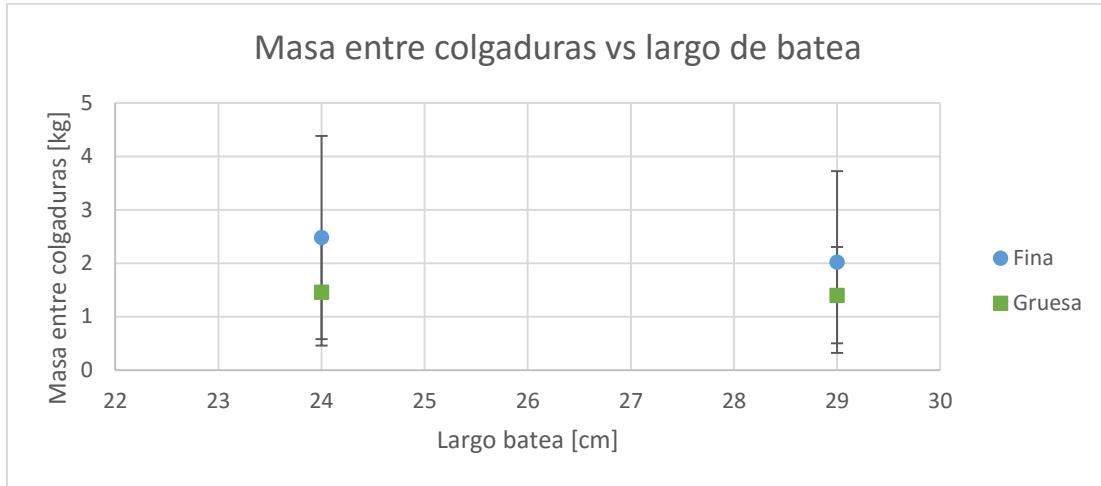


Figura 25: Masa entre colgaduras vs largo de batea.

La Figura 26 muestra un histograma en el cual se observa la frecuencia relativa de la masa entre colgaduras para los experimentos agrupados por granulometría. Por ejemplo, para la fragmentación fina se consideraron los experimentos 1, 4 y 6 y se promedió la frecuencia relativa de la masa entre colgaduras de cada uno de ellos para la clase correspondiente. Se puede observar que la clase de masa entre colgaduras más frecuente fue entre 0 y 2 kg. Además, los datos de masa entre colgaduras para cada una de las granulometrías presentaron las siguientes distribuciones:

- Fina: Lognormal ( $\sigma = 0.96$ ,  $\mu = 0.20$ ,  $\gamma = 0.33$ )
- Intermedia: Lognormal ( $\sigma = 0.87$ ,  $\mu = -0.07$ ,  $\gamma = 0.21$ )
- Gruesa: Weibull ( $\alpha = 1.25$ ,  $\beta = 1.14$ ,  $\gamma = 0.40$ ).

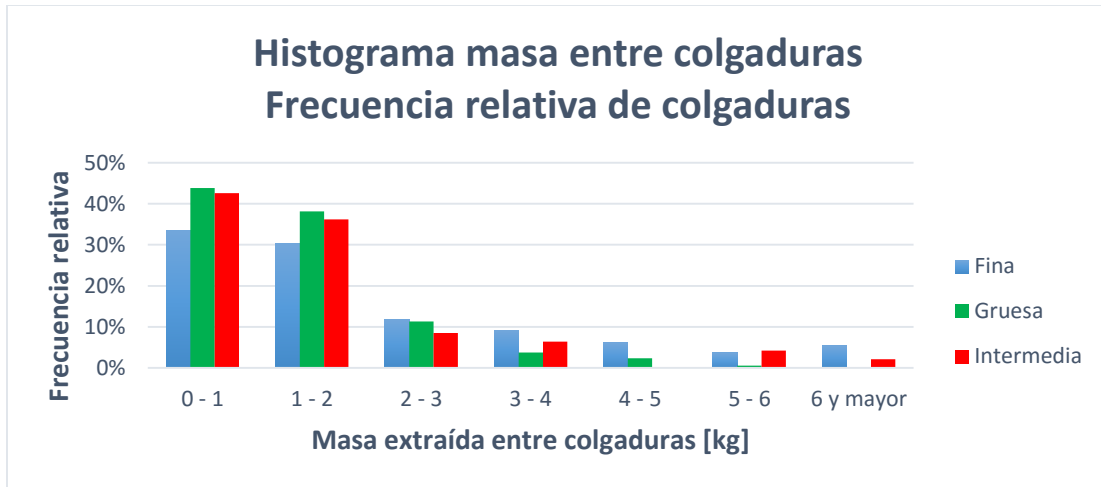


Figura 26: Histograma masa entre colgaduras para cada experimento agrupados por fragmentación.

Los histogramas de cada uno de los experimentos se encuentran en el ANEXO B. Además, de acuerdo a la distribución mostrada por los datos de frecuencia de colgaduras, se entiende que la media de los datos no es un muy buen indicador debido a que la media se ve afectada por los valores altos, por el contrario, la mediana de los datos debería representar mejor el *peak* de cada una de las distribuciones.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Figura 27 muestra un modelo multivariable creado como ejercicio con el fin de ajustar la masa entre colgaduras de acuerdo a las variables estudiadas en cada uno de los experimentos, esto es, dimensiones de la batea y granulometrías. Cabe destacar que el modelo no intenta explicar el fenómeno completamente ya que es necesaria la realización de más experimentos debido fundamentalmente a que con solo dos puntos se está perdiendo la información que hay entre ellos. El modelo fue creado usando la herramienta de Excel solver.

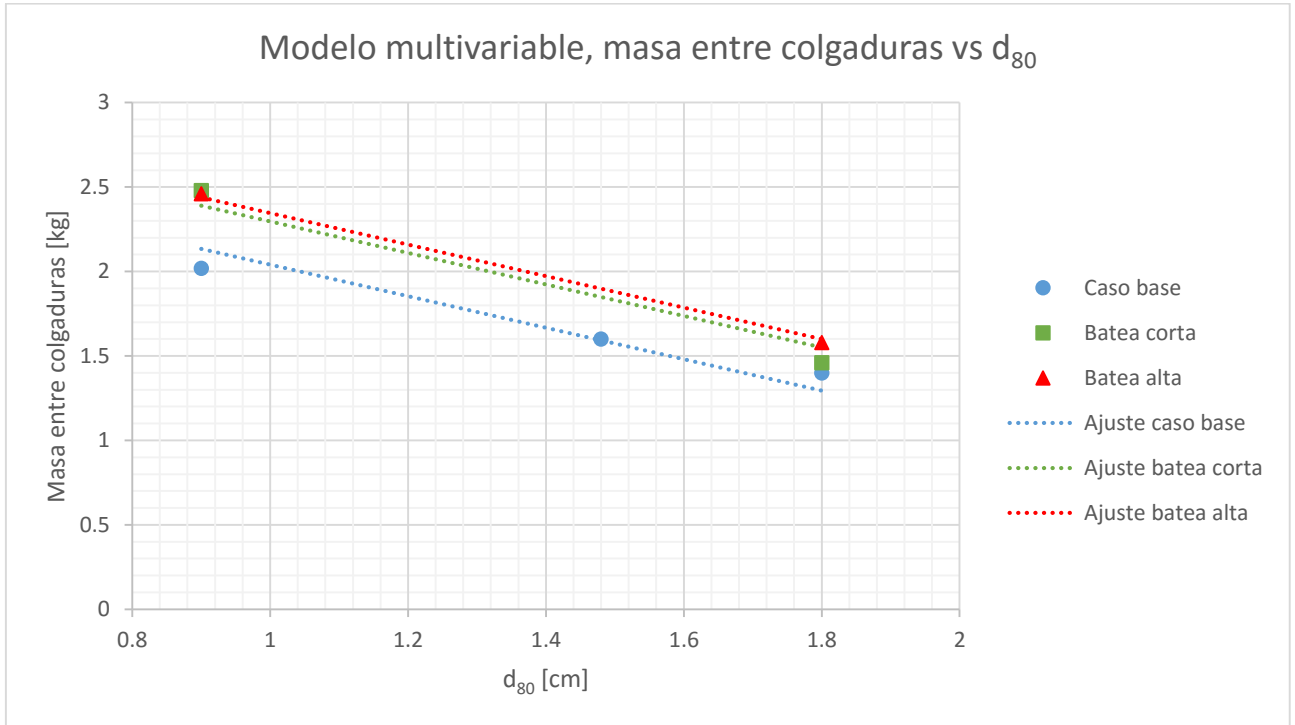


Figura 27: Modelo multivariable, masa entre colgaduras vs  $d_{80}$ .

El modelo multivariable se construyó de acuerdo a la siguiente ecuación lineal:

$$\text{Masa entre colgaduras [kg]} = \alpha_0 - \alpha_1 * d_{80} - \alpha_2 * L_{db} + \alpha_3 * A_{db}$$

Donde:  $d_{80}$  = tamaño característico [cm],  $L_{db}$  = largo batea [cm],  $A_{db}$  = ángulo batea [°], y  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  = parámetros de ajuste. Los parámetros de ajuste fueron determinados con el objetivo de obtener un buen ajuste de los resultados experimentales. La Tabla 16 detalla los parámetros de ajuste usados en el modelo multivariable.

Tabla 16: Parámetros de ajuste para la masa entre colgaduras.

Parámetros	Unidad	Valor	Comentarios
$\alpha_0$	(kg)	2.879	Constante independiente que determina la masa entre colgaduras
$\alpha_1$	(kg/cm)	0.932	Disminuye la masa entre colgaduras cuando el tamaño característico ( $d_{80}$ ) aumenta.
$\alpha_2$	(kg/cm)	0.051	Disminuye la masa entre colgaduras cuando el largo de la batea aumenta.
$\alpha_3$	(kg/°)	0.024	Aumenta la masa entre colgaduras cuando el ángulo de la batea aumenta.

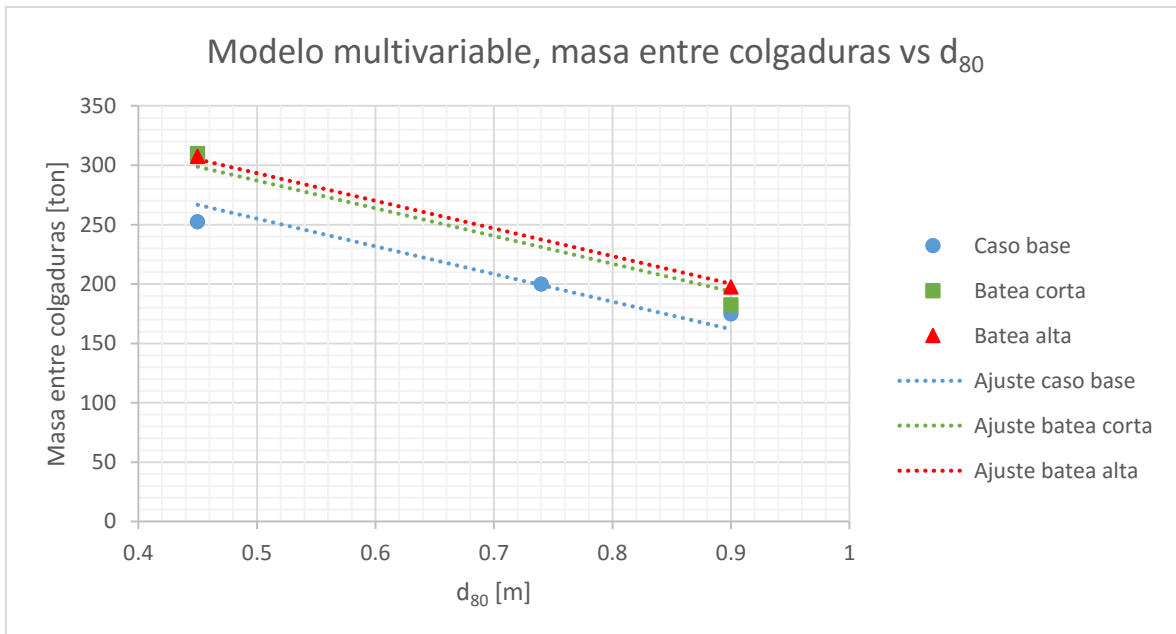
## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

El impacto de cada variable en la masa entre colgaduras fue cuantificado calculando la variación de la masa entre colgaduras en cada caso comparado con el caso base. Se observó que cuando el  $d_{80}$  aumentó 10%, la masa entre colgaduras disminuyó 8%. Mientras tanto, en el caso del largo de la batea, cuando éste varió 10% aumentando, la masa entre colgaduras varió 7.91%. Finalmente, cuando el ángulo de la batea varió 10%, la masa entre colgaduras varió 9.45%.

Como ejercicio, el modelo multivariable fue probado a escala mina (Figura 28). El modelo usó los parámetros mostrados en la Tabla 17, los cuales son los mismos usados en el modelo a escala de laboratorio pero escalados considerando el factor de escala (1 kg= 125 ton, 1 cm = 0.5 m).

*Tabla 17: Parámetros de ajuste modelo multivariable escala mina.*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
$\alpha_0$	(ton)	359.8
$\alpha_1$	(ton/m)	233.1
$\alpha_2$	(ton/m)	12.8
$\alpha_3$	(ton/°)	3.04



*Figura 28: Modelo multivariable, masa entre colgaduras [ton] vs  $d_{80}$  [m].*

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el caso de datos mina, la masa entre colgaduras varía entre 238 ton/colg a 1428 ton/colg aproximadamente. En el caso de los experimentos se obtuvo un valor más bajo por lo que el modelo presentado anteriormente estaría sub estimando la masa entre colgaduras. Esto podría explicarse debido a ciertas condiciones que no se replicaron en los experimentos, como lo es el hecho de que el LHD ingresa más allá del límite fijado por seguridad dentro de la galería zanja, la visera, desestabilizando algunas colgaduras. Otro punto, es que es sabido que dentro de la mina un plan de producción afecta ayudando a desestabilizar colgaduras con la extracción y movimiento de zonas de flujo desde puntos cercanos. En los experimentos se extrajo mineral alternando uno a uno los puntos de extracción, con lo cual no se evidenció el efecto del plan de producción.

### 4.3 Análisis de producción

El material que se extrajo en cada ciclo fue medido (gramos por extracción) con el fin de cuantificar la productividad real por baldada durante cada experimento. La información obtenida de cada experimento fue ajustada a distribuciones de probabilidad conocidas. En la Tabla 18 se muestra un resumen de las productividades por baldada (LHD de 9 yd<sup>3</sup> escalado) para cada experimento. También se muestra la productividad escalada.

*Tabla 18: Resumen de productividades por baldada.*

<b>Experimento (batea, granulometría)</b>	<b>Productividad por baldada [g/extracción]</b>	<b>Productividad escalada [ton/extracción]</b>
1 (1 caso base, fina)	87.0 ± 19	10.9 ± 2.4
2 (1 caso base, intermedia)	72.8 ± 15	9.1 ± 1.9
3 (1 caso base, gruesa)	86.9 ± 18	10.9 ± 2.3
4 (2 corta, fina)	84.3 ± 19	10.5 ± 2.4
5 (2 corta, gruesa)	81.1 ± 21	10.1 ± 2.6
6 (3 alta, fina)	86.1 ± 16	10.8 ± 2.0
7 (3 alta, gruesa)	78.9 ± 19	9.9 ± 2.4
Material fino	85.8 ± 1.3	10.7 ± 0.17
Material grueso	82.3 ± 4.13	10.3 ± 0.52

A partir de la información mostrada en la tabla anterior, la productividad por baldada no mostró una dependencia en el diseño de la batea (largo, alto). Por otro lado, para una granulometría más gruesa la productividad por baldada disminuyó al compararla con la granulometría más fina.

La Figura 29 muestra un histograma de los datos del experimento 1, además se muestra el ajuste realizado con el fin de determinar la distribución de probabilidad asociada a la productividad por baldada de éste experimento. La distribución resultante fue una Gaussiana con un valor esperado ( $\mu$ ) de 87 gr y una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 18.8 gr.

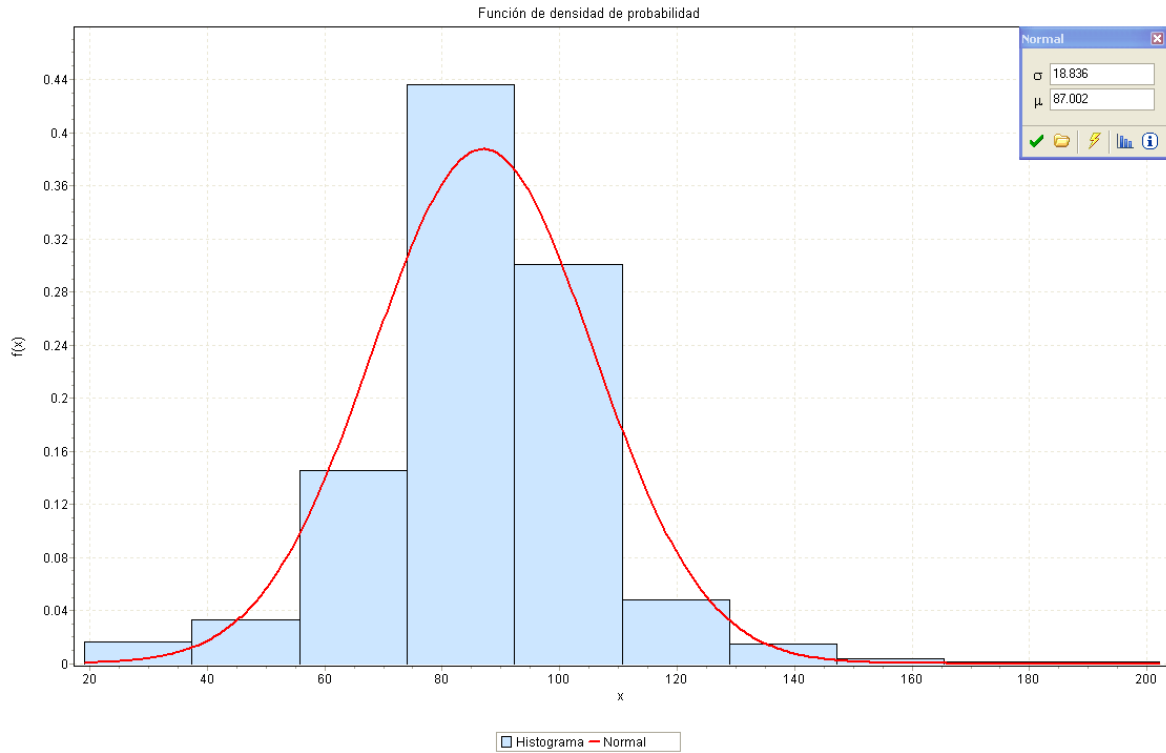


Figura 29: Productividad por baldada, experimento 1.

Los histogramas para los demás experimentos con sus respectivos ajustes de datos se encuentran en el ANEXO C.

#### 4.4 Altura de colgaduras

La altura de las colgaduras fue medida desde la visera de la zanja como puede observarse en la Figura 30. Esta medida fue solo realizada para las colgaduras que fueron catalogadas como colgaduras altas. En el caso de las colgaduras que se formaron en el punto de extracción (colgaduras bajas), la altura considerada fue cero.

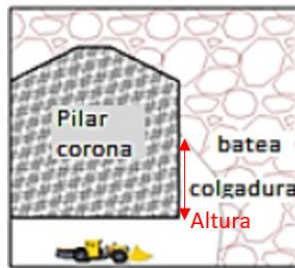


Figura 30: Medida de la altura de una colgadura.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 19 se muestra el resumen de las colgaduras bajas y las colgaduras altas, con su respectiva altura, que ocurrieron en cada uno de los experimentos.

*Tabla 19: Resumen tipos de colgaduras*

Experimento (batea, granulometría)	Número de colgaduras	Total de colgaduras		Colgaduras altas	
		Colgaduras bajas	Colgaduras altas	> 4 cm (2 m escalado)	< 4 cm (2m escalado)
1 (1 caso base, fina)	43	40%	60%	50%	50%
2 (1 caso base, intermedia)	47	51%	49%	65%	35%
3 (1 caso base, gruesa)	62	66%	34%	90%	10%
4 (2 corta, fina)	34	76%	24%	75%	25%
5 (2 corta, gruesa)	56	-	-	-	-
6 (3 alta, fina)	35	46%	54%	79%	21%
7 (3 alta, gruesa)	50	48%	52%	77%	23%

Se observó que la mayoría de las colgaduras fueron colgaduras bajas. También, la mayor parte de las colgaduras altas tuvo una altura mayor a 4 cm (2 m desde la visera, escalado). La batea corta presentó una disminución del número de colgaduras altas debido principalmente a la interacción de las zonas de flujo entre los puntos de extracción. Cabe destacar que no fue posible observar la altura de las colgaduras en el experimento 5 debido a que fue realizado con fricción (material fino pegado en las paredes de la batea).

La Figura 31 muestra el porcentaje de colgaduras altas mayores a 4 cm vs el ángulo de la batea. Un aumento en el ángulo de la batea incrementa el porcentaje de colgaduras altas mayores a 4 cm en aproximadamente 10%.

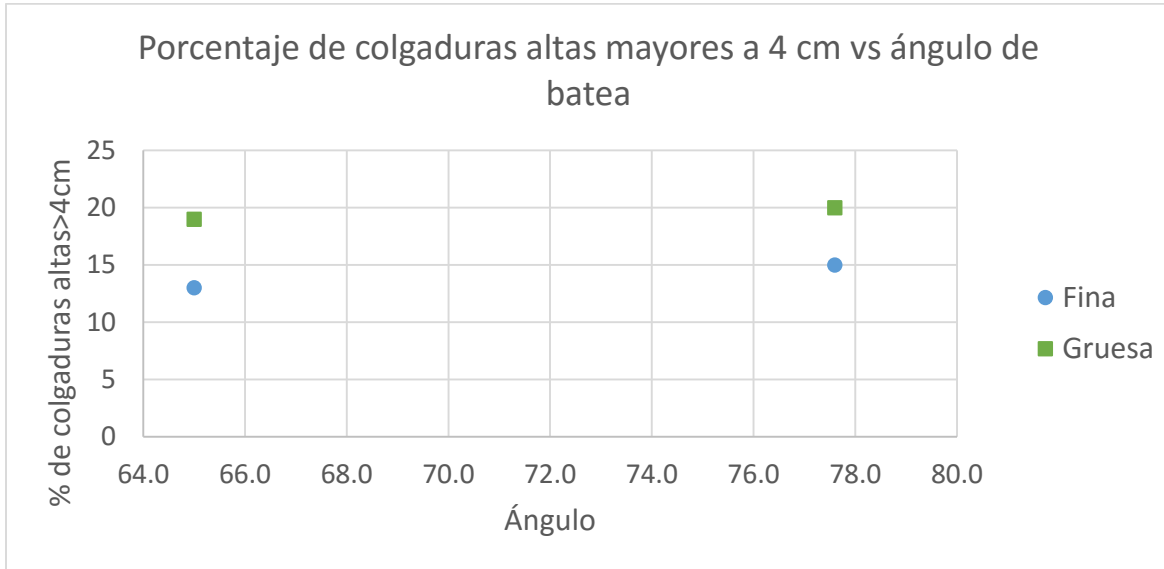


Figura 31: % de colgaduras altas >4cm vs ángulo de batea.

#### 4.5 Número de baldadas antes de una colgadura

Antes de que un punto de extracción presentara una colgadura que impidiera el flujo de material, fue observado que el material fino fue extraído de igual manera y el material grueso permaneció en la visera, actuando como un tamiz. El número de baldadas de material fino extraídas antes de una colgadura disminuyó cuando la granulometría usada en el experimento se hizo más gruesa. La Tabla 20 muestra el resumen del número de baldadas antes de una colgadura para la totalidad de los experimentos.

Tabla 20: Resumen número de baldadas antes de una colgadura.

Experimento (batea, granulometría)	Número de baldadas antes de una colgadura [media]	Número de colgaduras
1 (1 caso base, fina)	11 ± 9	43
2 (1 caso base, intermedia)	11 ± 9	47
3 (1 caso base, gruesa)	9 ± 8	62
4 (2 corta, fina)	13 ± 11	34
5 (2 corta, gruesa)	8 ± 6	56
6 (3 alta, fina)	18 ± 17	35
7 (3 alta, gruesa)	9 ± 7	50



### 4.6 Masa entre sobre tamaños

En una mina de block caving una roca es considerada como sobre tamaño cuando el sistema de extracción (LHD) no puede cargar la partícula debido a sus dimensiones, en el caso de ésta investigación, se consideró como sobre tamaño a aquellos fragmentos que tuvieron un largo mayor a 5 cm (2.5 m escalado) a lo largo de su eje mayor. En la mina, la solución a éste tipo de interferencia es el uso de explosivos mediante reducción secundaria. En la Tabla 21 se muestra un resumen de la frecuencia de sobre tamaños para cada experimento.

*Tabla 21: Resumen frecuencia de sobre tamaños.*

Experimento Batea Granulometría	Masa entre sobre tamaños [kg/sobre tamaño]					Masa entre sobre tamaños [ton/sobre tamaño]		
	Min.	Max.	Media	Desv estándar	Mediana	Min.	Max.	Media
1 1 caso base Fina, $d_{80} = 0.45$	0.2	5.5	1.9	1.53	1.29	21.8	682.5	232
2 1 caso base Intermedia, $d_{80} = 0.70$	0.1	10.0	2.0	2.23	1.12	16.6	1244.3	246
3 1 caso base Gruesa, $d_{80} = 0.80$	0.2	7.9	1.4	1.35	0.95	21.9	982.8	173
4 2 corta Fina, $d_{80} = 0.45$	0.2	12.3	2.2	2.54	1.43	21.7	1536.2	279
5 2 corta Gruesa, $d_{80} = 0.80$	0.1	5.2	1.4	1.12	0.99	15.4	649.7	170
6 3 alta Fina, $d_{80} = 0.45$	0.1	12.0	1.7	2.10	1.05	11.4	1505.1	213
7 3 alta Gruesa, $d_{80} = 0.80$	0.1	7.9	1.2	1.22	0.96	15.6	982.0	147.8

La Figura 32 muestra un ejemplo de la aparición de un sobre tamaño en uno de los puntos de extracción del modelo.



Figura 32: Ejemplo de sobretamaño

Como se puede observar en la Figura 33, la masa entre sobre tamaños disminuye al utilizar una granulometría más gruesa. Como se esperaba, la masa entre sobre tamaños no mostró una correlación con el diseño de la batea.

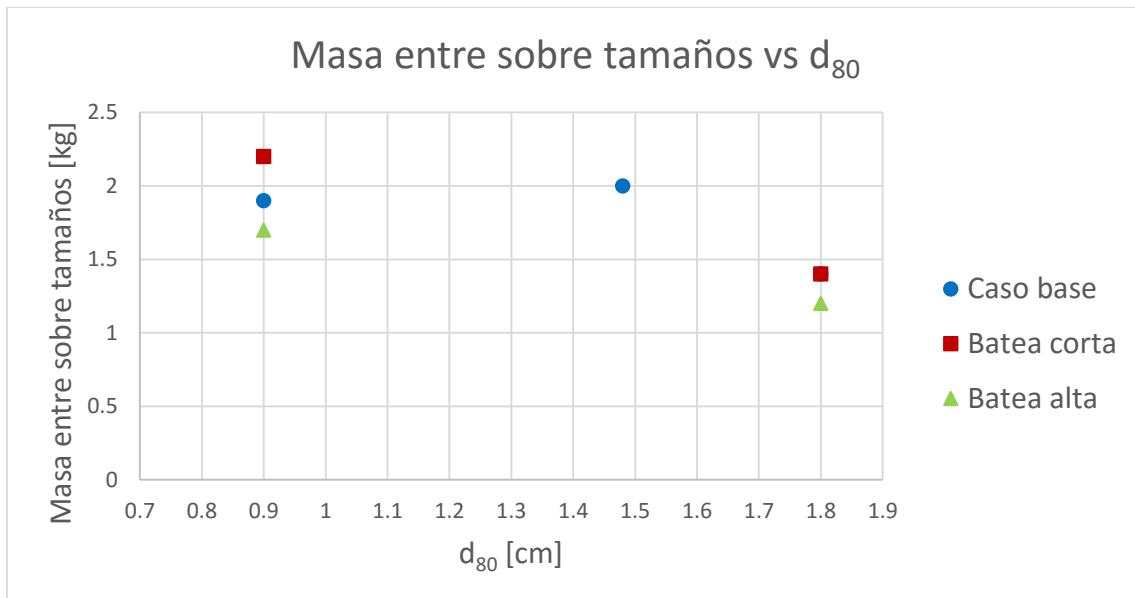


Figura 33: Masa entre sobre tamaños vs  $d_{80}$ .

La Figura 34 muestra un histograma que contiene la frecuencia relativa de la masa entre sobre tamaños para todos los experimentos agrupados por granulometría. La mayor frecuencia se encontró entre los rangos 0-1 [kg] y 1-2 [kg] lo cual quedó demostrado con los tipos de distribuciones encontradas para cada granulometría.

- Fina: Exponencial ( $\lambda = 0.53, \gamma = 0$ )
- Intermedia: Lognormal ( $\sigma = 1.27, \mu = -0.04, \gamma = 0.06$ )
- Gruesa: Exponencial ( $\lambda = 0.83, \gamma = 0.1$ )

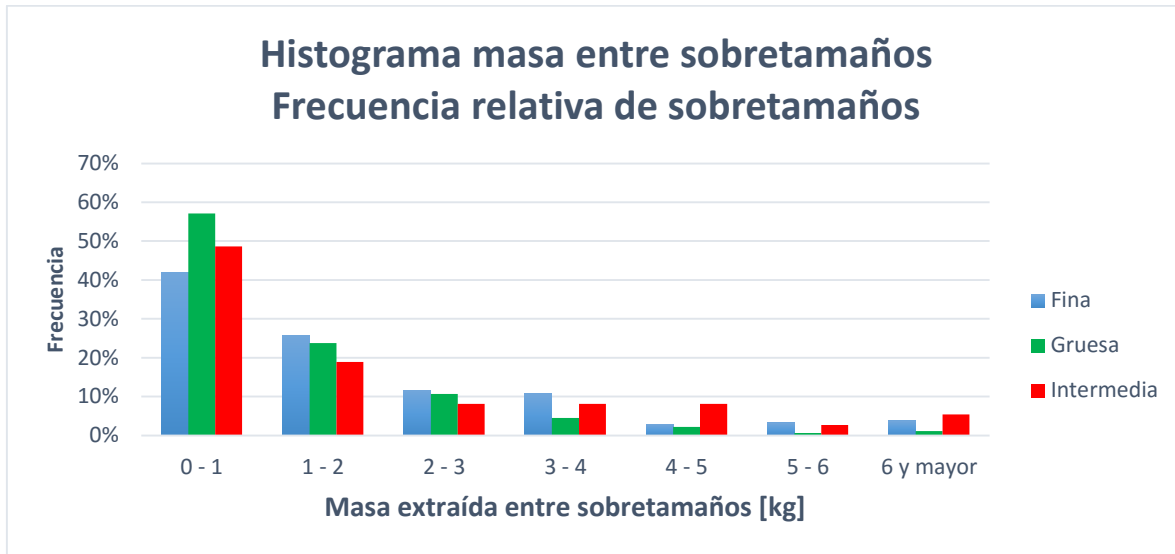


Figura 34: Histograma Masa entre sobre tamaños para todos los experimentos.

Los histogramas para cada uno de los experimentos se pueden encontrar en el ANEXO D.

En la realización de los experimentos, las rocas consideradas como sobre tamaños fueron medidas al momento de aparecer en el punto de extracción, sin cuestionar si participaron en la formación de una colgadura o no. En minas de block caving, cuando ocurre una colgadura, ésta se desestabiliza utilizando explosivos en la reducción secundaria, la cual provoca una disminución de tamaños. Esa disminución va a depender de que explosivo se utilice y el éxito de la tronadura. Por lo anterior, en el punto de extracción se encontrarán menos sobre tamaños de lo esperado. La consideración anterior no se tomó en cuenta en la realización de los experimentos, debido a que las colgaduras fueron desestabilizadas manualmente y fue difícil determinar si un sobre tamaño había participado o no en una colgadura, por lo tanto existe una sobre estimación de sobre tamaños.

Ahora bien, de qué manera se pueden filtrar los resultados tal de obtener una frecuencia de sobretamaños más realista. Una respuesta a ello sería conocer el resultado de una reducción secundaria en términos de tamaños, pero es difícil de cuantificar, otra sería saber el número promedio bajo el cual el sistema de extracción retira todo el material proveniente de la tronadura de la reducción secundaria. De lo último no se tiene información, sin embargo la Tabla 22 muestra la cantidad de sobre tamaños que aparecieron en el punto de extracción agrupándolas y filtrándolas por el número de baldadas desde el descuelgue.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

*Tabla 22: Número de ocurrencias de sobre tamaños a distinto número de baldadas desde el descuelgue.*

Cantidad de baldadas desde descuelgue a la aparición del sobretamaño	Número de sobretamaños							Promedio	desviación estándar
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7		
1 o más	41	32	51	26	48	37	41	39	9
2 o más	29	28	40	21	42	33	29	32	7
3 o más	26	22	31	17	37	31	26	27	7
4 o más	24	20	23	15	33	26	24	24	6
5 o más	22	17	20	14	32	25	22	22	6
7 o más	21	14	18	13	26	21	21	19	5
10 o más	18	6	13	13	20	20	18	15	5

Según la tabla anterior, gran parte de los sobre tamaños apareció justo después de descolgar el punto de extracción (una baldada), por lo tanto, aquellos sobre tamaños posiblemente participaron en una colgadura y en la realidad habrían disminuido su tamaño debido a la reducción secundaria con lo que no habrían sido considerados como tales. A medida que el rango de baldadas aumentó el número de sobre tamaños tendió a estabilizarse.

¿Qué número de baldadas es necesario para retirar aquellos sobre tamaños que participaron en la colgadura? Es difícil de determinar, pero para probar cómo cambia la frecuencia de sobre tamaños al filtrar los datos, se realizó un análisis de sensibilidad en el cual se eliminaron todos aquellos sobre tamaños que aparecieron antes de cinco baldadas desde el descuelgue.

La Tabla 23 muestra un resumen de las principales estadísticas de la masa de sobre tamaños considerando la restricción explicada en el párrafo anterior, en paréntesis, se muestran los principales valores de las estadísticas presentadas en la Tabla 21.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

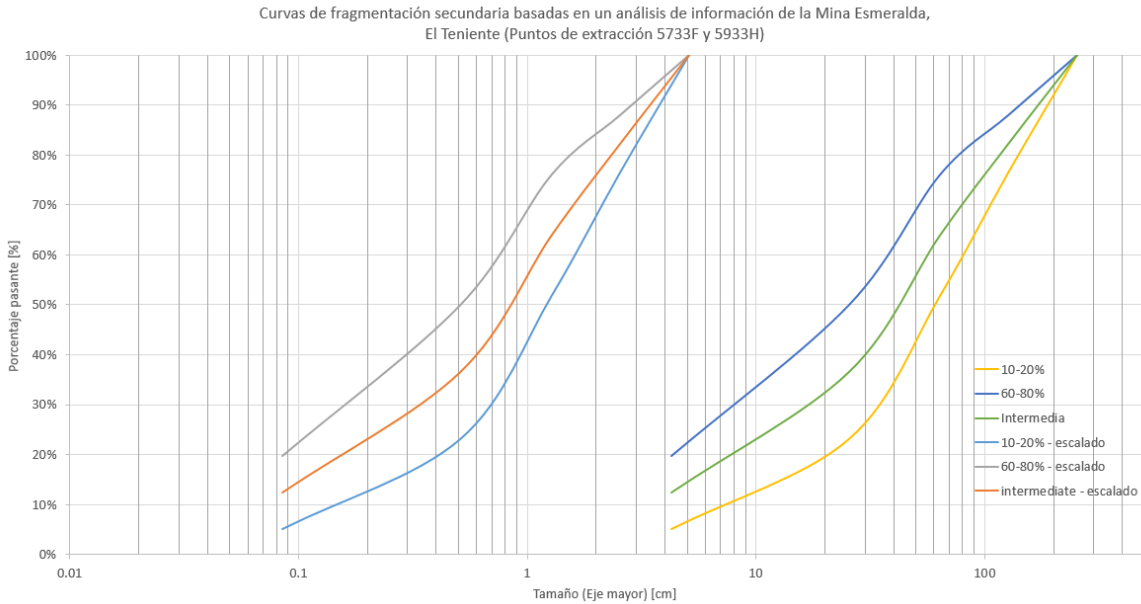
*Tabla 23: Resumen frecuencia de sobre tamaños considerando nueva restricción.*

Experimento Batea Granulometría	Masa entre sobre tamaños [kg/sobre tamaño]					Masa entre sobre tamaños [ton/sobre tamaño]		
	Min.	Max.	Media	Desv. Estándar	Mediana	Min.	Max.	Media
1 1 caso base Fina, d80 = 0.45	0.3	8.0	3.0 (1.9)	2.3 (1.53)	2.5	36.2	1005.6	369.3 (232)
2 1 caso base Intermedia, d80 = 0.70	0.1	9.9	4.1 (2.0)	3.3 (2.23)	4.8	9.4	1232.6	514.2 (246)
3 1 caso base Gruesa, d80 = 0.80	0.1	10.2	3.1 (1.4)	3.3 (1.35)	1.9	6.9	1269.4	385.2 (173)
4 2 corta Fina, d80 = 0.45	0.1	26.0	3.7 (2.2)	5.9 (2.54)	1.4	13.5	3246.5	457.5 (279)
5 2 corta Gruesa, d80 = 0.80	0.1	7.6	2.1 (1.4)	1.8 (1.12)	1.7	14.5	953.4	266.3 (170)
6 3 alta Fina, d80 = 0.45	0.1	12.0	2.6 (1.7)	2.9 (2.10)	1.7	15.5	1505.1	327.2 (213)
7 3 alta Gruesa, d80 = 0.80	0.1	15.0	2.1 (1.2)	2.8 (1.22)	1.2	13.9	1874.7	257.0 (148)

La Tabla 23 muestra que la masa entre sobre tamaños aumentó en promedio un 200% al no considerar los sobre tamaños que aparecieron a menos de cinco baldadas desde el descuelgue, sin embargo, los datos se siguieron comportando de la misma forma, es decir, a medida que la granulometría fue más gruesa la masa entre sobre tamaños fue menor y la geometría de la batea no tuvo un efecto significativo.

Un análisis para comprender el fenómeno de aparición de sobre tamaños fue realizado. A partir de la Figura 35, que contiene las curvas de distribución de tamaños utilizadas en los experimentos en función del eje mayor de las partículas, se determinó el porcentaje correspondiente a sobre tamaños (eje mayor sobre 50 mm).

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS



*Figura 35: Curvas de distribución de tamaños en función del eje mayor de las partículas.*

La Tabla 24 muestra los porcentajes correspondientes a sobre tamaños en función de la granulometría, cabe destacar que ese porcentaje es en volumen y pese a que es aparentemente bajo, en número de sobre tamaños se corresponde con la cantidad posteriormente medida.

*Tabla 24: Porcentajes de sobretamaños en diferentes granulometrías.*

Granulometría	% < 5 cm	% > 5 cm
Fina	99.65%	0.35%
Intermedia	99.50%	0.50%
Gruesa	99.35%	0.65%

Se realizó un análisis con muestras experimentales para determinar el factor de forma y la relación promedio entre los tres ejes principales de las partículas. El factor de forma obtenido fue 1.7 (eje mayor / eje medio) y la Tabla 25 muestra la relación mencionada anteriormente, considerando el eje mayor unitario y con un valor de 5 cm (sobre tamaños).

*Tabla 25: Relación promedio entre los ejes principales de las partículas.*

Eje mayor	Eje medio	Eje menor
1	0.59	0.33
5	2.95	1.65

Con la relación anterior fue posible calcular la masa unitaria promedio de cada sobre tamaño, con ello más la masa cargada en cada experimento y los porcentajes calculados en la Tabla 24, se determinó el número de sobretamaños inicial dentro del modelo y la frecuencia inicial de sobre tamaños mostrada en la Tabla 26

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

*Tabla 26: Frecuencia inicial de sobre tamaños.*

d <sub>80</sub> [m]	Granulometría	Frecuencia inicial de sobretamaños [kg/sobretamaño]
0.45	Fina	2.6
0.70	Intermedia	1.8
0.80	Gruesa	1.4

Se realizó una comparación entre la frecuencia inicial de sobre tamaños, la medida experimentalmente y la que consideró la restricción de eliminar los sobre tamaños que aparecieron antes de cinco baldadas. La Tabla 27 muestra un resumen de las tres frecuencias consideradas.

*Tabla 27: Comparación entre frecuencias de sobre tamaños.*

d <sub>80</sub> [m]	Granulometría	Masa entre sobre tamaños (inicial) [kg/sobretamaño]	Masa entre sobre tamaños (experimental) [kg/sobretamaño]	Masa entre sobre tamaños (corregida) [kg/sobretamaño]
0.45	Fina	2.6	1.9 ± 2.1	3.1 ± 3.7
0.70	Intermedia	1.8	2.0 ± 2.2	4.1 ± 3.3
0.80	Gruesa	1.4	1.3 ± 1.2	2.4 ± 2.6

La tabla anterior muestra que la media de la masa de sobre tamaños experimental se acerca bastante a la frecuencia inicial, sin embargo, la variación de esa media es amplia, lo que ratifica que el fenómeno de los sobre tamaños es variable. Tanto la media como la variación del fenómeno aumentan en la frecuencia corregida, lo primero debido a la no consideración de los sobre tamaños que participan en una colgadura y lo segundo debido a la dependencia del explosivo utilizado en la reducción secundaria y el resultado de la tronadura.

### 4.7 Masa entre interferencias

Para efectos de este estudio se consideró como interferencias tanto a las colgaduras como a los sobre tamaños. La Tabla 28 muestra un resumen de la frecuencia de interferencias medidas en los experimentos, entre paréntesis se muestra la frecuencia de sobre tamaños considerando la restricción analizada anteriormente y su efecto en la frecuencia de interferencias.

*Tabla 28: Resumen de interferencias.*

Experimento (batea, granulometría)	Masa entre colgaduras bajas (kg/colgadura)	Masa entre colgaduras altas (kg/colgaduras)	Masa entre colgaduras total (kg/ colgadura)	Masa entre sobre tamaños (kg/sobre tamaño)	Masa entre interferencias (kg/interferencia)	Masa entre interferencias (ton/ interferencia)
1 (1 caso base, fina)	5.12	3.35	2.02	1.93 (3.35)	0.99 (1.26)	123.6 (157.6)
2 (1 caso base, intermedia)	3.14	3.28	1.60	2.04 (4.28)	0.90 (1.14)	112.2 (142.1)
3 (1 caso base, gruesa)	2.12	4.14	1.40	1.42 (3.22)	0.71 (0.98)	88.3 (122.1)
4 (2 corta, fina)	3.24	10.54	2.48	2.28 (4.22)	1.19 (1.56)	148.4 (195.2)
5 (2 corta, gruesa)	-	-	1.46	1.46 (2.41)	0.73 (0.91)	91.3 (113.6)
6 (3 alta, fina)	5.38	4.53	2.46	1.72 (2.69)	1.01 (1.29)	126.6 (160.7)
7 (3 alta, gruesa)	3.29	3.03	1.58	1.29 (2.25)	0.71 (0.93)	88.9 (116.1)

Se observó que la masa entre interferencias (kg/interferencia) disminuyó cuando la granulometría se hizo más gruesa. Los experimentos realizados en la batea corta tuvieron la mayor cantidad de masa entre interferencias en comparación con las otras dos bateas, esto debido principalmente a la interacción entre las zonas de flujo de los puntos de extracción vecinos. Además se puede observar en los paréntesis que el cambio en la frecuencia de sobre tamaños aumentó la masa entre interferencias, lo cual es una aproximación más realista del fenómeno. En la Figura 36 se puede observar un gráfico que muestra el comportamiento entre la masa entre interferencias vs el  $d_{80}$ .



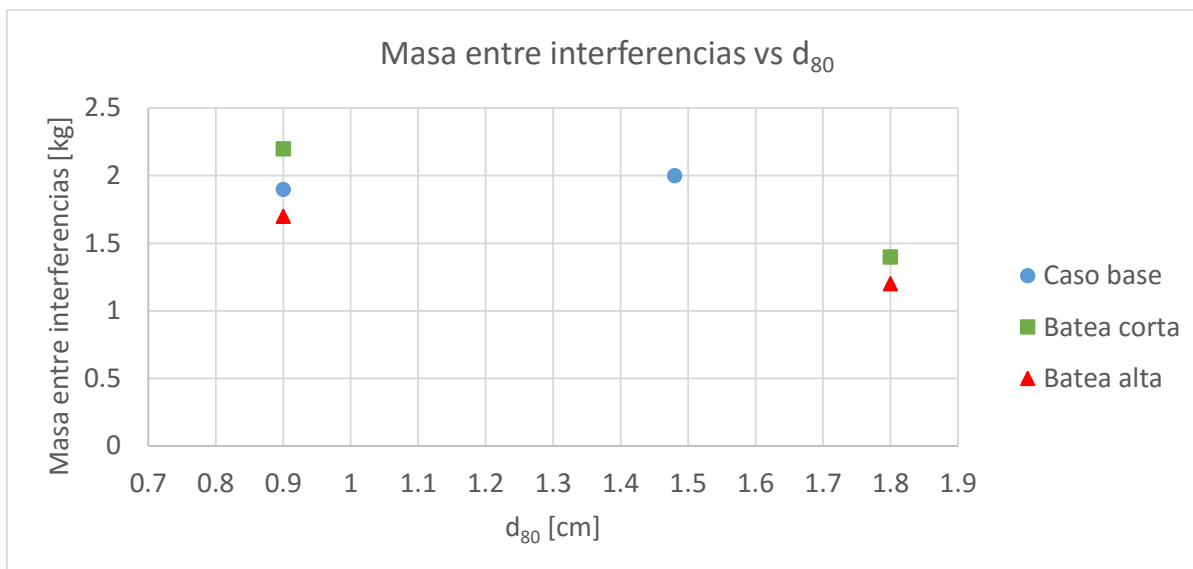


Figura 36: Masa entre interferencias (colgaduras + sobre tamaños) vs  $d_{80}$ .

#### 4.8 Análisis de las zonas de extracción (IEZ)

La Tabla 29 muestra la altura de interacción dentro de la batea para cada experimento.

Tabla 29: Altura de interacción en la batea.

Experimento (batea, granulometría)	Altura de interacción [cm]	Altura de interacción escalada [m]
1 (1 caso base, fina)	6.7	3.35
2 (1 caso base, intermedia)	6.1	3.05
3 (1 caso base, gruesa)	6.2	3.10
4 (2 corta, fina)	5.7	2.85
5 (2 corta, gruesa)	5.0	2.50
6 (3 alta, fina)	22.7	11.35
7 (3 alta, gruesa)	16.9	8.45

La Figura 37 muestra un esquema de cómo fue medida la altura de interacción para el caso del experimento 1. El mismo procedimiento fue utilizado en los demás experimentos.

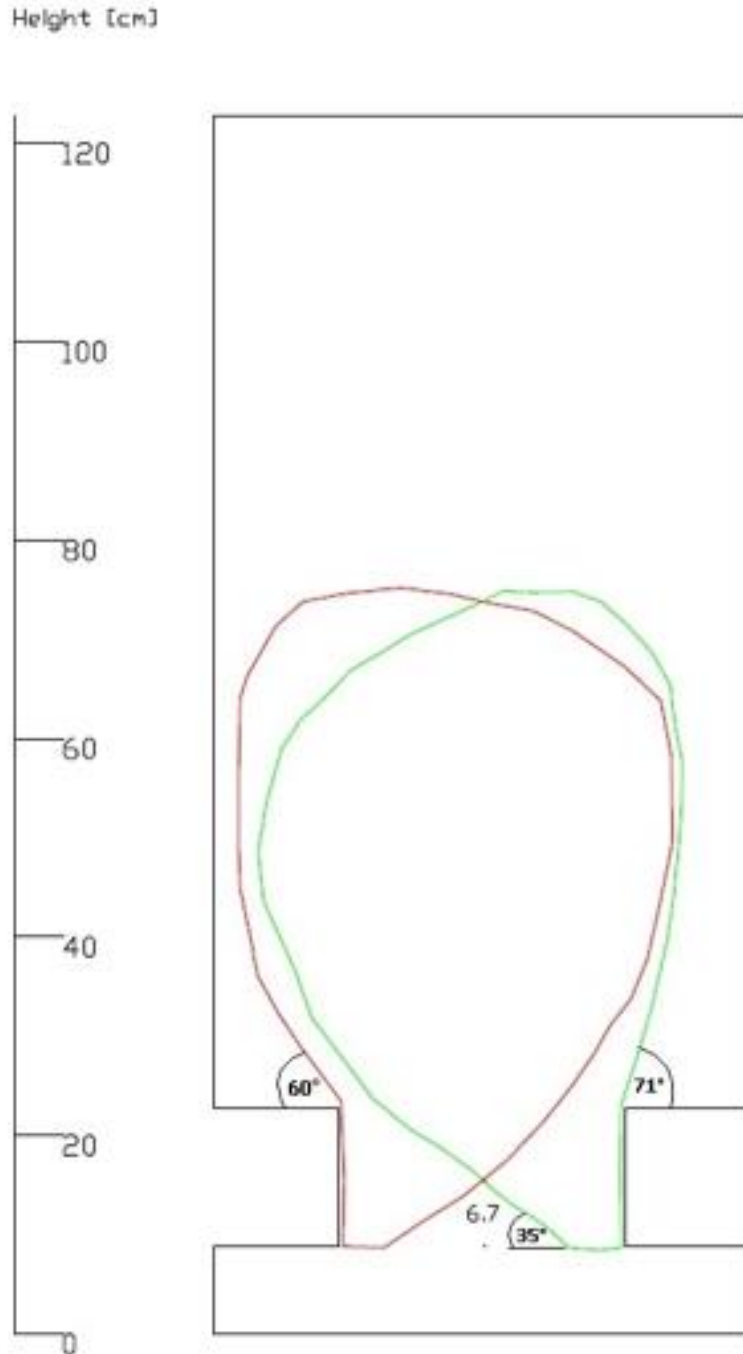


Figura 37: Altura de interacción y ángulos de flujo dentro de la batea.

La Figura 38 muestra la altura de interacción dentro de la batea vs el  $d_{80}$ . Fue observado que la altura de interacción se mantiene relativamente constante tanto para la batea del caso base y la batea corta cuando se varió la granulometría. En el caso de la batea alta, la altura de interacción aumentó aproximadamente un 200% respecto de las otras dos bateas. La batea alta mostró una disminución en la altura de interacción cuando el  $d_{80}$  aumentó.

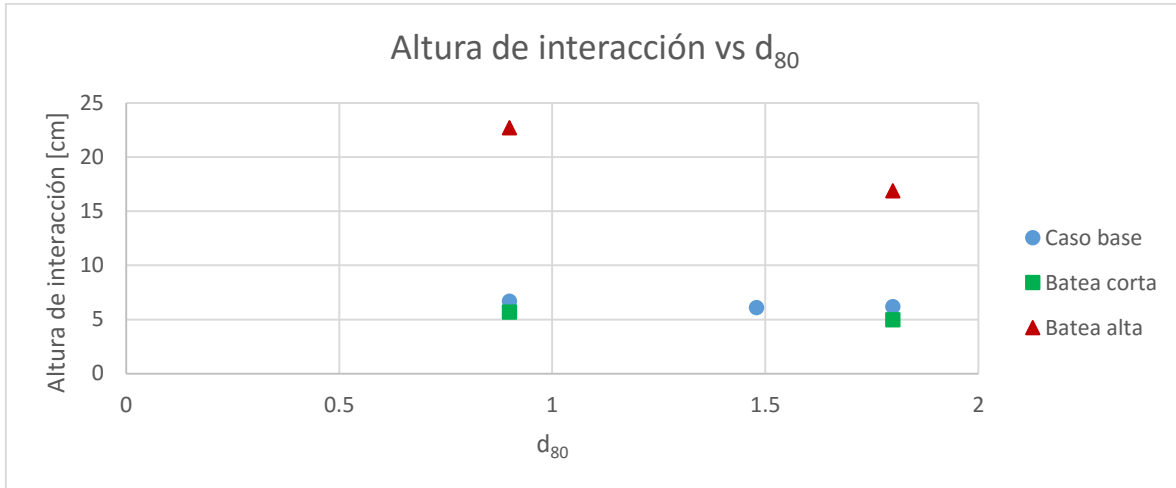


Figura 38: Altura de interacción vs  $d_{80}$ .

La Figura 39 muestra la altura de interacción vs el ángulo de la batea. Fue observado que la altura de interacción aumentó en aproximadamente 100 a 200% cuando el ángulo de la batea aumentó un 10%.

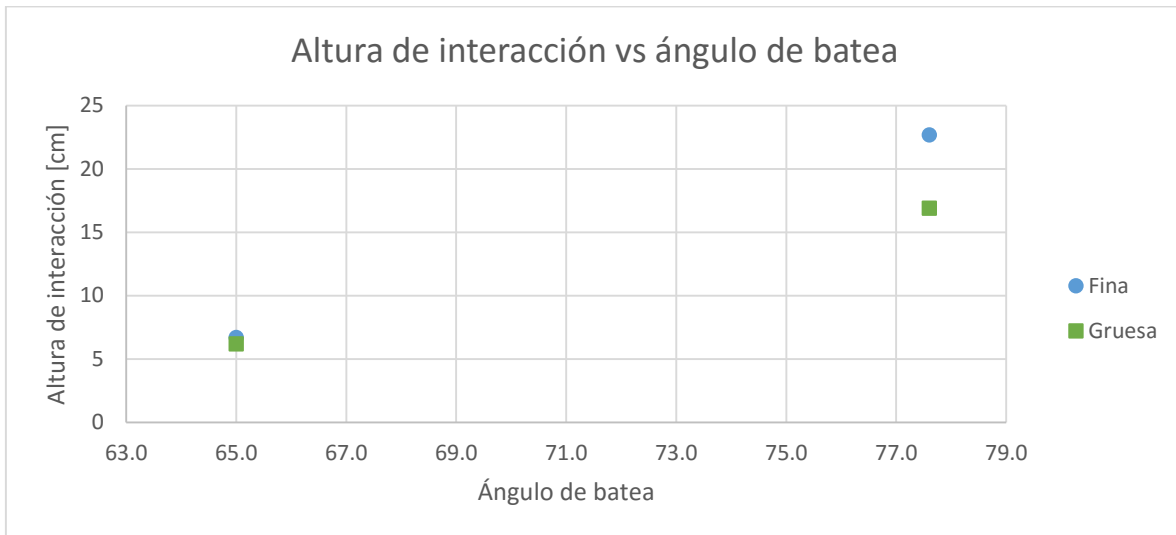


Figura 39: Altura de interacción vs ángulo de batea.

La Figura 40 muestra la altura de interacción vs el largo de la batea. Se observó que la altura de interacción aumentó en un 20 a 24% cuando el largo de la batea aumentó 20%.

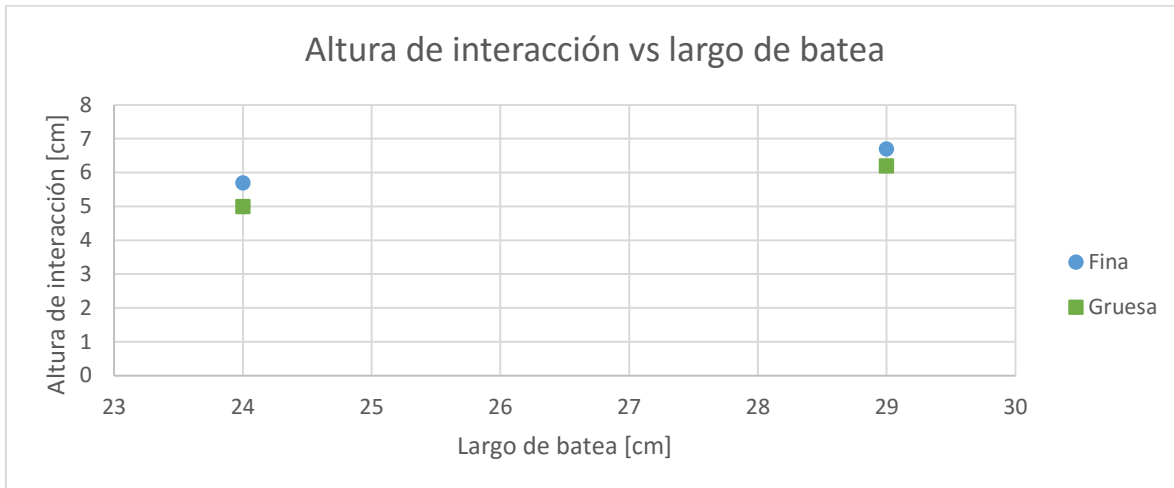


Figura 40: Altura de interacción vs largo de batea.

#### 4.9 Conclusiones del capítulo

Debido a la gran cantidad de variables medidas se tuvo una gran cantidad de conclusiones, las cuales se enumeran a continuación:

- Masa entre colgaduras: Como se esperaba, a medida que la granulometría utilizada en los experimentos fue más fina, el tonelaje entre colgaduras aumentó. Un aumento en el ángulo de la batea incrementó la masa entre colgaduras, sin embargo, se tiene claro que el efecto de la fricción de las paredes podría tener un efecto significativo en éste caso. Una disminución en el largo de la batea aumentó la masa entre colgaduras.
- Modelo multivariable: Un modelo multivariable capaz de predecir la masa entre colgaduras, bajo ciertas condiciones, fue generado desde estos experimentos. Los supuestos de éste modelo son que consideraron sólo los datos de éstos experimentos, una mayor cantidad de datos es necesaria tal de definir completamente el comportamiento de los datos en un rango más amplio.
- Productividad por baldada: La productividad por baldada no tuvo dependencia en las variables de diseño de la batea. Para la granulometría gruesa la productividad por baldada disminuyó en comparación con la granulometría fina.
- Altura de colgaduras: La mayor cantidad de colgaduras se produjo en los puntos de extracción, colgaduras catalogadas como colgaduras bajas. La batea corta tuvo una menor altura de colgaduras debido al aumento de interacción entre las zonas de flujo de los distintos puntos de extracción. La mayor cantidad de colgaduras altas tuvo una altura mayor a 4cm desde la visera (2m escalado).
- Baldadas antes de una colgadura: La cantidad de baldadas extraídas desde un punto de extracción antes de que la colgadura impida totalmente el flujo disminuyó con el aumento del tamaño de los fragmentos de material.
- Masa entre sobre tamaños: Como se esperaba, la masa entre sobre tamaños disminuyó al utilizar una granulometría más gruesa, además se comprobó que la media de la frecuencia de sobre tamaños medida experimentalmente se acercó bastante a la frecuencia inicial de sobre tamaños cargada dentro del modelo, sin embargo, la frecuencia de sobretamaños experimental mostró una alta desviación.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

- Masa entre interferencias: La masa entre interferencias disminuyó al utilizar una granulometría más gruesa. La batea corta tuvo la mayor masa entre interferencias de las 3 bateas estudiadas.
- Zonas de extracción: La disminución en el largo de la batea disminuyó la altura de interacción debido a la interacción entre las zonas de flujo de los puntos de extracción. El aumento del ángulo y de la altura de la batea aumentaron considerablemente la altura de interacción. El aumento de la altura de interacción fue debido principalmente al ángulo de la batea, el cual fue mayor que el ángulo de flujo. Debido a lo anterior, el material se mueve a lo largo de la batea en vez de fluir naturalmente en su zona de flujo. Al utilizar una granulometría más gruesa la altura de interacción disminuyó, lo cual era esperable, debido a que las zonas de extracción son más anchas en material grueso.

## CAPÍTULO 5

---

### ANÁLISIS DE IMÁGENES

#### 5.1 Introducción

En una mina de block caving, la información que se puede obtener acerca de una colgadura es limitada. Se puede saber el tonelaje entre colgaduras, si la colgadura fue alta o baja por la supervisión de un trabajador y de cierta manera la granulometría que influyó en la formación del arco, sin embargo, la altura exacta de la colgadura no puede ser cuantificada ni tampoco el detalle de las partículas que formaron el arco de la colgadura.

Lo anterior, es una limitante para la comprensión y el estudio de las colgaduras, lo cual fue considerado en la realización de ésta investigación. Si bien los alcances de la memoria establecían investigar acerca del efecto de la granulometría y el diseño de la batea en las colgaduras, surgió una excelente oportunidad para visualizar y comprender la formación de colgaduras al detalle. Esto debido principalmente a que los experimentos fueron realizados en un modelo físico construido con acrílico transparente, lo cual permitió tomar imágenes de los puntos de extracción en todo momento, es decir, cuando se formaba una colgadura y/o cuando el punto se encontraba con flujo normal, por lo que se obtuvo una valiosa información.

##### 5.1.1 Objetivos

El principal objetivo de éste trabajo es determinar mediante el análisis de imágenes la distribución de tamaños y el número de partículas que existe en un arco de colgadura.

Con el fin de cumplir lo mencionado anteriormente se plantearon los siguientes objetivos secundarios:

- Analizar y medir mediante un software de imágenes las colgaduras en detalle, es decir, el número de partículas y sus tamaños.
- Obtener reglas de formación de arcos que posteriormente puedan ser utilizadas en la predicción de colgaduras.

La hipótesis de éste trabajo es que al momento de formarse un encadenamiento de partículas en la batea, existe una distribución de tamaños y un número de partículas específico, lo que podría repetirse en cada uno de los eventos. Además, lo anterior podría depender de la abertura del punto de extracción además de la granulometría del material, con lo cual, al conocer estas dos variables podría ser posible predecir las colgaduras.

##### 5.1.2 Alcances

Los alcances de éste trabajo fueron los siguientes:

- Se analizaron un total de 64 imágenes, de las cuáles, 32 correspondieron a imágenes de colgaduras y 32 correspondieron a imágenes de flujo respectivamente. Las imágenes se obtuvieron del punto de extracción 2, en la realización del experimento 6 de éste trabajo de memoria.
- En el experimento 6 se utilizó la batea alta y la granulometría fina.

- Para efectos de éste trabajo se cumplen también los alcances mencionados en el capítulo 1 de ésta investigación.

## 5.2 Revisión bibliográfica

La información existente acerca de la predicción de colgaduras a partir de reglas obtenidas empíricamente o extrapoladas desde otros fenómenos se centra en un artículo publicado por el programa BCF, un programa de predicción de fragmentación primaria, fragmentación secundaria y colgaduras. El programa básicamente considera una curva granulométrica de fragmentación secundaria y una abertura de batea conocida y a partir de reglas predice las colgaduras (BCF, 2005).

Las reglas consideradas por el programa para predecir las colgaduras son dos: El método de Robin Kear y el método BCF que se basa en las reglas de flujo para piques de traspaso.

El método de Robin Kear asume que si menos de 25 bloques (5x5) son requeridos para cubrir un 40% de área de una sección horizontal de la batea, una colgadura es posible. Por otro lado, el método BCF basado en reglas de piques de traspaso utiliza los resultados mostrados por Hustrulid (2004), el cual estableció relaciones entre el diámetro de las rocas (d) y el diámetro del pique (D) para obtener distintas probabilidades de flujo mostradas en la Tabla 30.

Tabla 30: Frecuencia de colgaduras en piques de traspaso (como se cita en Hustrulid and Sun, 2004).

Razón entre el diámetro del pique D con el diámetro del fragmento d	Frecuencia relativa de colgaduras
$D/d > 5$	Muy baja, flujo casi seguro
$5 > D/d > 3$	Mediana, flujo incierto
$D/d < 3$	Muy alta, no flujo casi seguro

En el caso del método BCF, el ancho de la batea es utilizado como “diámetro del pique de traspaso”. El programa lee los tamaños de los bloques que provienen de un archivo de una curva de fragmentación secundaria, calcula su ancho y largo a partir del volumen y la relación de aspecto. Luego, orienta cada bloque aleatoriamente en la batea. Los bloques se acumulan hasta que la suma de sus anchos sea más grande que el ancho de la batea. El último bloque es removido de la lista y el ancho es recalculado. Si el ancho de los bloques remanentes es mayor al 80% del ancho de la batea, las colgaduras son registradas de acuerdo a lo siguiente:

- Menos de tres bloques: Colgadura ocurre.
- Tres bloques: Colgadura tiene un 95% de probabilidad de ocurrencia.
- Cuatro bloques: Colgadura tiene un 50% de probabilidad de ocurrencia.
- Cinco bloques: Colgadura tiene un 5% de probabilidad de ocurrencia.
- Más de cinco bloques: Colgadura no ocurre.

La Figura 41 muestra resultados para un set de datos con un promedio de tamaño de roca de  $1 \text{ m}^3$ . El set de datos tenía un 32% de bloques con un tamaño menor a  $2 \text{ m}^3$  y el tamaño máximo de bloque fue  $28 \text{ m}^3$ . Los resultados muestran la utilización del método BCF y del método de Robin Kear (BCF, 2005).

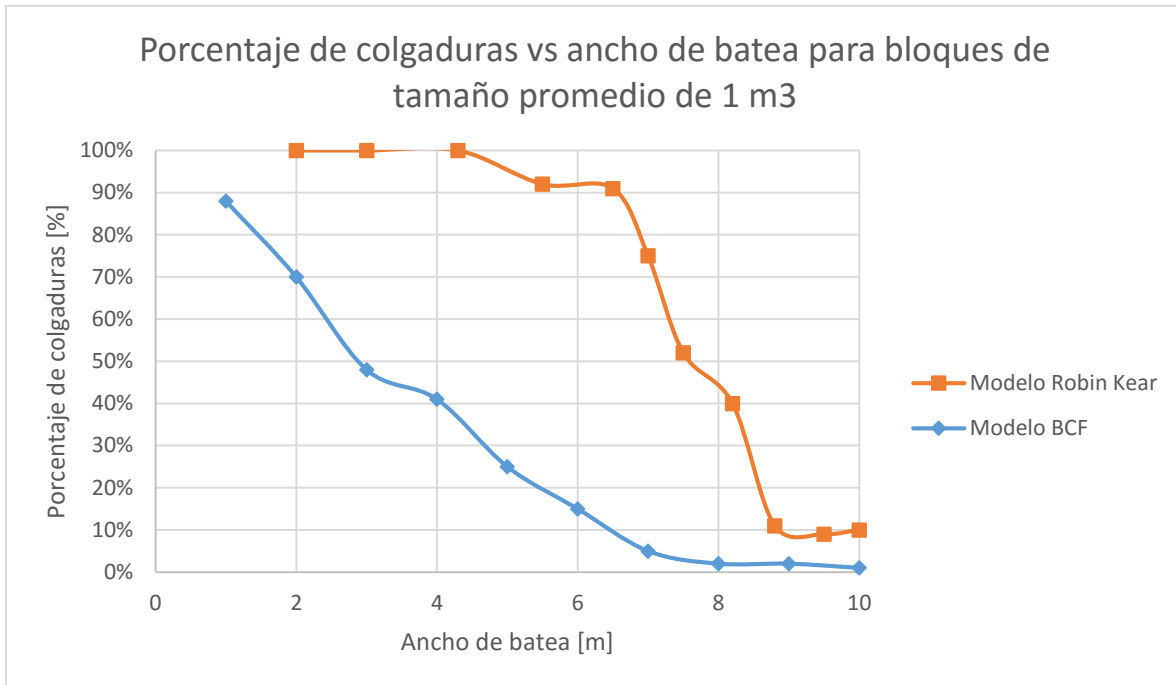


Figura 41: Resultados uso de BCF, método de Robin Kear y nuevo método (BCF, 2005).

En la Figura 41 se muestra principalmente que con el método BCF se registra una menor probabilidad de ocurrencia de colgaduras, especialmente cuando el ancho de la batea es entre 2 a 8 veces el promedio de bloque.

Cabe destacar que el método BCF fue desarrollado principalmente debido a que los resultados del método de Robin Kear sobre estimaban la probabilidad de ocurrencia de colgaduras.

El programa BCF, como se mencionó anteriormente, usa reglas empíricas que no han sido debidamente validadas y que en el caso del método BCF, han sido extrapoladas desde reglas aplicadas a piques de traspaso, los cuales tienen una geometría distinta a la geometría de una batea. Por lo cual, es de importancia obtener información verídica acerca de la formación de colgaduras que pueda validar estos métodos, o establecer un nuevo método a partir de resultados experimentales.

### 5.3 Metodología experimental

La metodología experimental para el análisis de imágenes consideró una base de datos de fotografías tomadas al punto de extracción número 2 del experimento 6. Las fotografías fueron tomadas cada 10 extracciones por punto de extracción y además se fotografiaron cada una de las colgaduras producidas. La Figura 42 muestra un ejemplo de las imágenes tomadas.





Figura 42: Imagen punto de extracción 2 experimento 6.

En la Figura 42 se puede apreciar claramente las partículas que son parte del flujo del punto de extracción. La Tabla 31 muestra un resumen de parámetros iniciales a considerar respecto de la batea y la granulometría utilizada en el experimento 6.

Tabla 31: Información punto de extracción.

Experimento	Número 6
Granulometría utilizada	Fina ( $d_{80} = 0.45$ )
Batea	Batea Alta
Ancho inferior batea	8.8 cm
Angulo zanja	77°
Ancho superior batea	22 cm

El análisis de imágenes se efectuó a 32 imágenes de colgaduras producidas en el experimento y a 32 imágenes tomadas cuando el punto de extracción se encontraba en un estado de flujo normal. El análisis fue realizado con el programa de edición de imágenes GIMP, con el cual fue posible medir los fragmentos de material. Los resultados de las mediciones fueron obtenidos en pixeles, por lo que fue necesario utilizar una medida conocida dentro de la fotografía para así poder transformar con el mínimo error los pixeles a centímetros. La medida conocida utilizada fue el ancho del acrílico, el cual medía 1.1 cm.

## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE IMÁGENES

Como las colgaduras se pueden producir a distinta altura, la sección a analizar fue distinta para cada una de las imágenes. La sección a analizar dependió de una única variable: la altura de la colgadura. En la Figura 43 se muestra la metodología utilizada la cual consistió en determinar la altura de la colgadura, con la cual quedó definido el ancho A1, posteriormente para determinar el alto A2 se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de determinar cuáles son las partículas que influyen en la formación del arco, al haber determinado A2, el ancho A3 queda definido automáticamente.

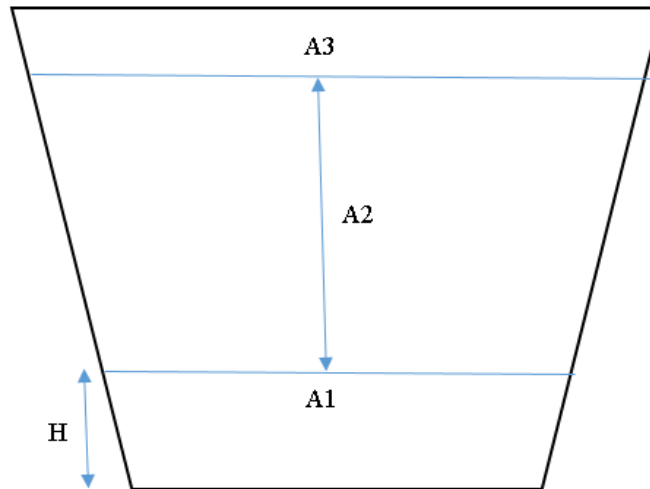


Figura 43: Esquema sección a analizar.

El análisis de sensibilidad para determinar A2 se realizó a 10 imágenes del experimento 6 (5 imágenes de colgaduras y 5 imágenes de flujo) y a 10 imágenes de colgaduras de experimentos realizados para el proyecto Chuquicamata Subterráneo, los cuales son parecidos a los experimentos realizados en éste estudio, la diferencia es que tienen una granulometría, una batea y una litología diferente. Pese a las diferencias, son útiles para comparar y determinar el alto A2. Se midieron las partículas presentes en cada una de las imágenes, con lo que se obtuvo una distribución de tamaños para dos secciones diferentes, una que considero  $A2 = A1$  y otra que consideró  $A2 = A1/2$ . La metodología utilizada para medir cada partícula fue la misma que se detalla más adelante.

La Figura 44 y la Figura 45 muestran los resultados del análisis realizado, en la primera se muestra la distribución de tamaños acumulada y en la segunda se observa la distribución de tamaños retenida.

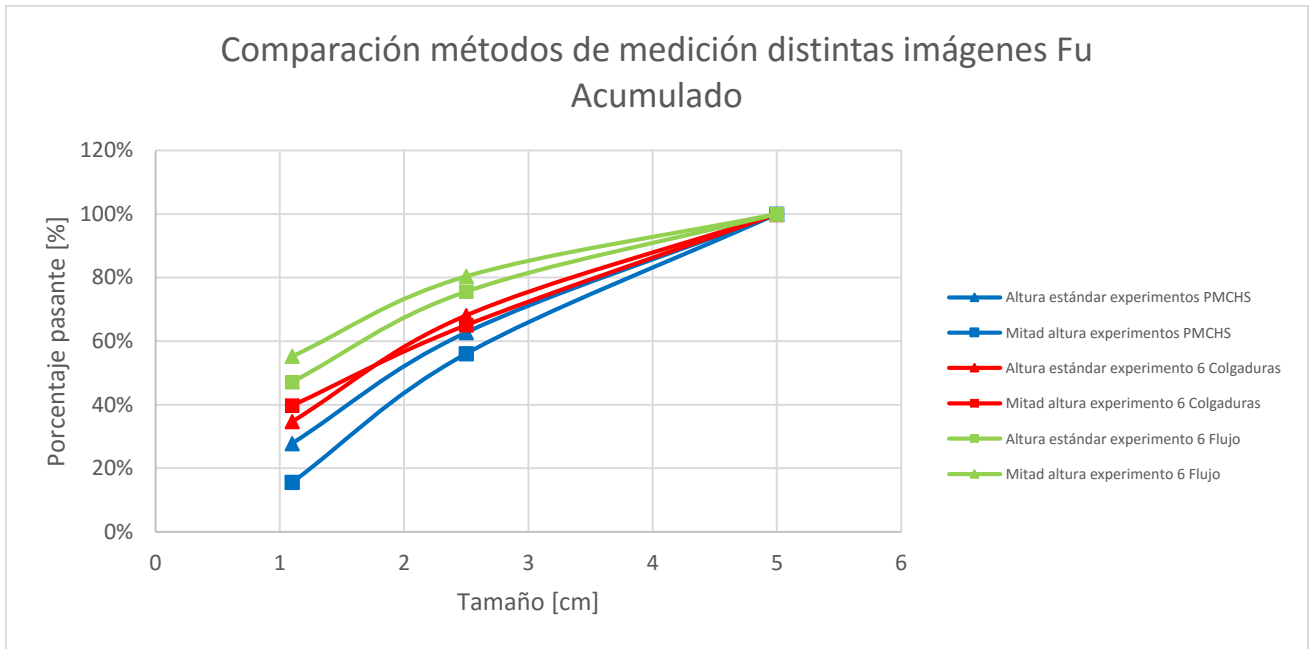


Figura 44: Comparación métodos de medición imágenes, Fu acumulado.

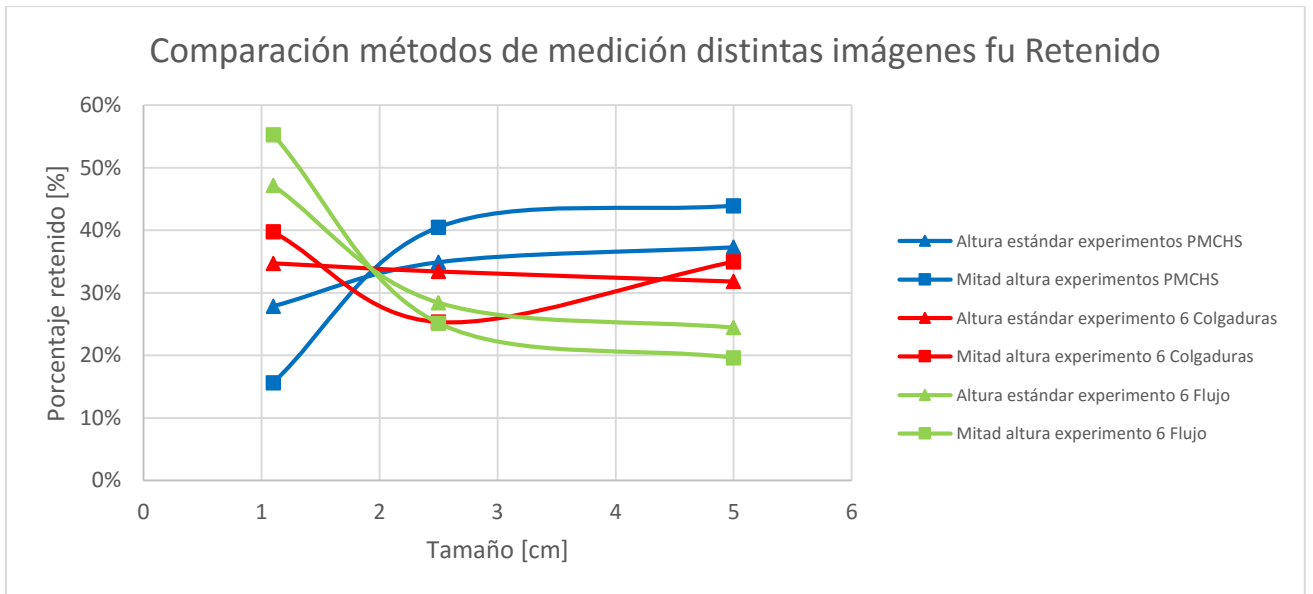


Figura 45: Comparación métodos de medición imágenes, fu retenido.

En la Figura 44 se pueden observar las distintas curvas de distribución de tamaños considerando una altura estándar ( $A1$ ) y la mitad de ésta altura ( $A1/2$ ), en las imágenes de colgaduras se observa que al disminuir la altura a la mitad hay un desplazamiento de las curvas hacia abajo, lo que implica una mayor cantidad de partículas gruesas. Además, en la Figura 45, en el caso de las imágenes de colgaduras, se observa que la cantidad de partículas gruesas (entre 2.5 y 5 cm) aumenta al disminuir la altura a la mitad.

## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE IMÁGENES

En la realización de los experimentos se observó que las partículas gruesas en gran medida fueron las responsables de la formación de arcos. Por lo anterior y del análisis de sensibilidad anterior, se consideró para el análisis de imágenes la altura ( $A1/2$ ) para definir la sección a analizar. Debido principalmente por la influencia que podrían tener las partículas gruesas que se encuentren en la cercanía del arco de colgadura.

Para las imágenes de flujo se consideró el ancho  $A1$  como el ancho del punto de extracción (8.8 cm) y la altura  $A2 = A1/2$  con el fin de comparar éstas imágenes con las de colgaduras.

Al tener determinada la sección a analizar, se procedió a medir cada uno de los fragmentos que se encontraban en la sección. Se midió el eje mayor y el eje medio, con el fin de obtener un área utilizada por la partícula, cabe destacar que estos ejes de partícula son ejes observables, por lo que es una aproximación respecto al eje real de cada partícula.

Luego, las partículas fueron agrupadas por tamaño definiendo 3 categorías distintas, las cuales se detallan en la Tabla 32. Esta agrupación se definió de acuerdo a un rango fijado anteriormente el cual era equidimensional, luego se agruparon nuevamente para obtener así los rangos mostrados.

Tabla 32: Clasificación de partículas.

Tipo	Rango de tamaños [cm]	Rango de tamaños escalado [m]
Fino	$x < 1.1$	$x < 0.55$
Intermedio	$1.1 < x < 2.5$	$0.55 < x < 1.25$
Grueso	$x > 2.5$	$x > 1.25$

Finalmente, se obtuvo un porcentaje de la sección ocupada por las partículas consideradas como grueso e intermedio, la resta de la sección total menos los tamaños grueso e intermedio entregó la cantidad de finos presente en cada una de las imágenes, es sabido que no es posible medir partículas finas debido a la resolución de las imágenes y el tamaño de éstas.

Además del análisis por tamaño, también se llevó a cabo un análisis de cantidad de partículas que formaban el arco estable de la colgadura. Esto se realizó simplemente contando las partículas que se podían visualizar en las imágenes.

La Figura 46 muestra un ejemplo de las imágenes analizadas considerando una altura  $A2$  igual a  $A1/2$ , en ella, como ejemplo, se marcaron flechas amarillas en algunas partículas que grafican los ejes medidos de ellas.

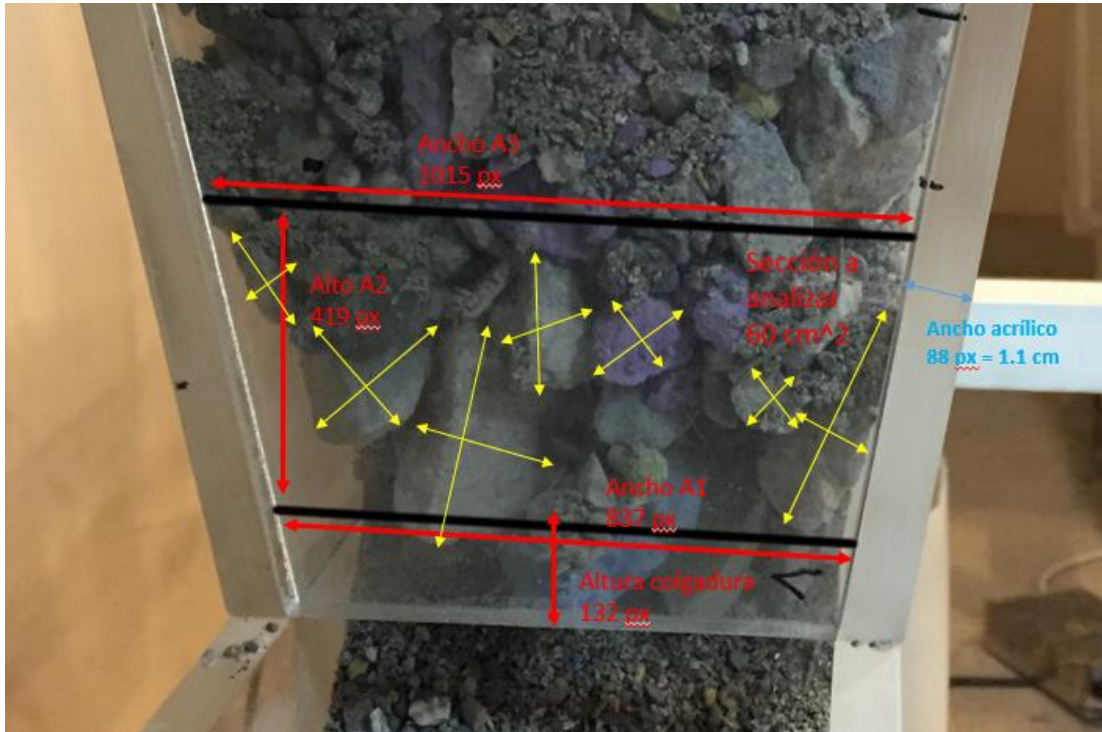


Figura 46: Imagen analizada con GIMP (Imagen 434).

## 5.4 Resultados y análisis

Los resultados obtenidos se dividieron en los distintos análisis realizados, es decir, el que determinó la distribución de tamaños de partículas presentes en el encadenamiento y el que determinó el número de partículas presentes en el arco.

### 5.4.1 Distribución de tamaños

Del análisis de imágenes realizado a 32 colgaduras y 32 situaciones diferentes de flujo en el punto de extracción, se obtuvieron los siguientes resultados.

La distribución de tamaños con porcentajes promedio retenidos  $f_u$  y porcentajes promedio acumulados  $F_u$  presente en el encadenamiento de partículas y en la base de la batea, en el caso de las imágenes de flujo, se muestra en la Tabla 33 y la Tabla 34 respectivamente. El detalle del análisis de cada una de las imágenes se encuentra en el ANEXO E.

Tabla 33: Distribución de tamaños porcentaje retenido  $f_u$ , colgaduras y flujo.

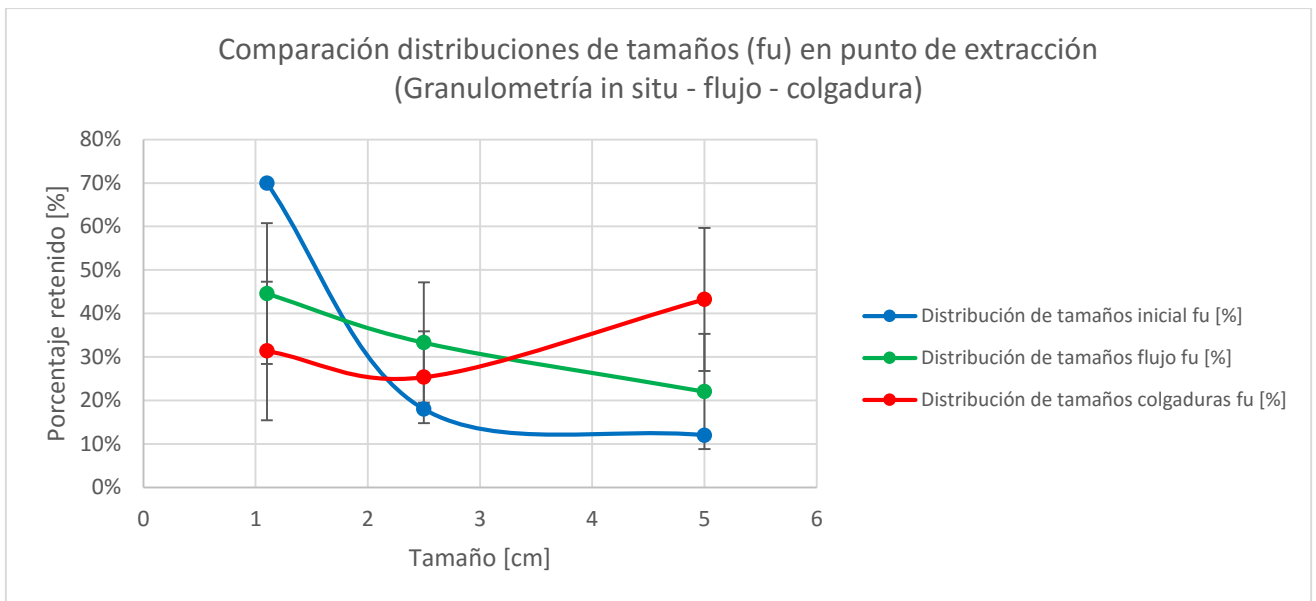
Tamaño	Tamaño [cm]	Tamaño partícula / ancho punto extracción	Distribución de tamaños in situ $f_u$ [%]	Distribución de tamaños flujo $f_u$ [%] (área)	Distribución de tamaños colgaduras $f_u$ [%] (área)
Fino	$x < 1.1$	$x < 0.13$	70%	$45\% \pm 16\%$	$31\% \pm 16\%$
Intermedio	$1.1 < x < 2.5$	$0.13 < x < 0.28$	18%	$33\% \pm 14\%$	$25\% \pm 11\%$
Grueso	$x > 2.5$	$x > 0.28$	12%	$22\% \pm 13\%$	$43\% \pm 16\%$

## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE IMÁGENES

*Tabla 34: Distribución de tamaños porcentaje acumulado Fu, colgaduras y flujo.*

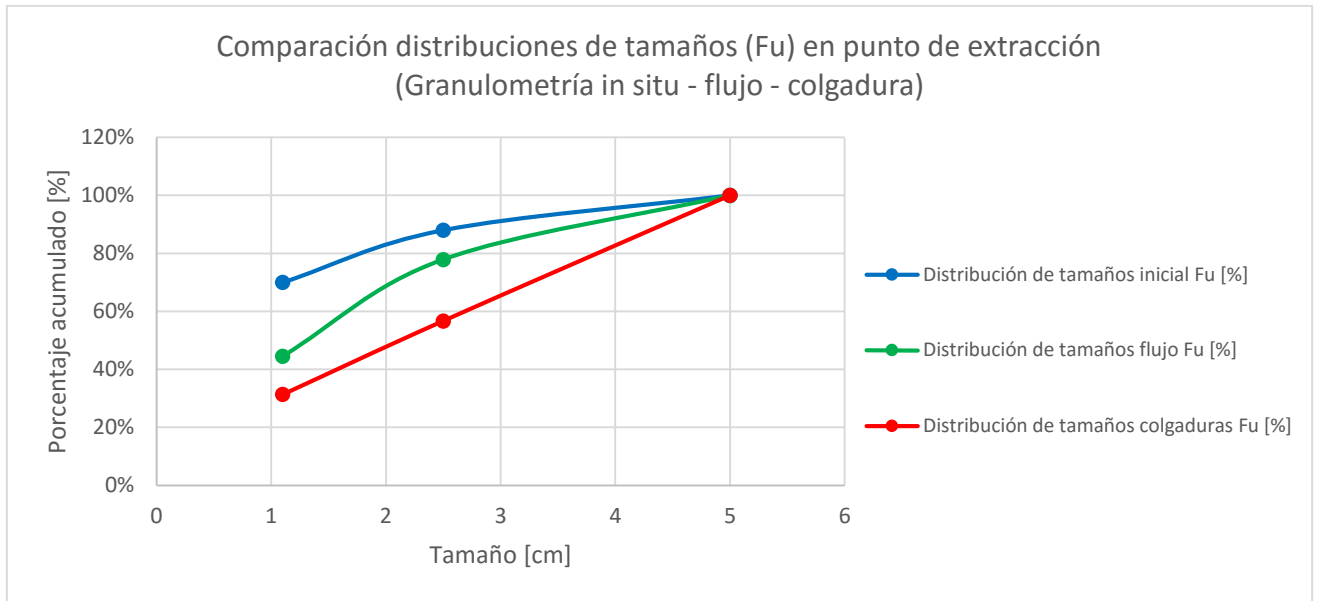
Tamaño	Tamaño [cm]	Tamaño partícula / ancho punto extracción	Distribución de tamaños in-situ Fu [%]	Distribución de tamaños flujo Fu [%] (área)	Distribución de tamaños colgaduras Fu [%] (área)
Fino	$x < 1.1$	$x < 0.13$	70%	45%	31%
Intermedio	$1.1 < x < 2.5$	$0.13 < x < 0.28$	88%	78%	57%
Grueso	$x > 2.5$	$x > 0.28$	100%	100%	100%

Además de las tablas mostradas anteriormente, se crearon a partir de ellas dos gráficos con el fin de representar y comparar las distribuciones. La Figura 47 muestra las curvas de distribución de tamaños en porcentaje retenido y la Figura 48 muestra las curvas de distribución de tamaños en porcentaje acumulado respectivamente.



*Figura 47: Comparación distribuciones de tamaños fu (retenido) en punto de extracción.*

## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE IMÁGENES



*Figura 48: Comparación distribuciones de tamaño Fu (acumulado) en punto de extracción.*

Tanto de las tablas como de las figuras mostradas anteriormente se desprende lo siguiente: primero, en el caso de las distribuciones de tamaños en porcentaje acumulado se observa que el material se hace más grueso al acercarse al punto de extracción y más aún cuando se genera una colgadura, lo anterior se aprecia tanto en la Tabla 34 como en la Figura 48. Segundo, en el caso de las distribuciones de tamaños en porcentaje retenido, existe información más detallada respecto a los tamaños y sus porcentajes y su influencia en la formación de colgaduras. A partir de la Tabla 33 y la Figura 47, el material fino ( $x < 13\%$  del ancho del punto extracción) disminuye un 25% desde la granulometría in situ a la condición de flujo y un 39% desde la granulometría in situ a la formación de la colgadura, por el contrario, el material grueso ( $x > 28\%$  del ancho del punto de extracción) aumenta un 10% desde la granulometría in situ a la condición de flujo y un 31% desde la granulometría in situ a la formación de la colgadura.

Por otro lado, cada una de las imágenes de colgaduras o de flujo, presentó un porcentaje de gruesos, por lo que fue posible agruparlas para determinar mediante un análisis estadístico la probabilidad de colgadura a diferentes porcentajes de partículas gruesas. La Tabla 35 muestra un resumen con la agrupación de imágenes de acuerdo a diferentes rangos de porcentajes de gruesos y la probabilidad de colgadura o flujo, respectivamente.

*Tabla 35: Probabilidad de colgadura a partir de diferentes porcentajes de grueso en el punto de extracción.*

<b>% de gruesos ( <math>x &gt; 2.5 \text{ cm } (0.28 \cdot d_w)</math> )</b>	Imágenes colgaduras	Imágenes Flujo	Total	Probabilidad colgadura [%]	Probabilidad Flujo [%]
<b><math>x &lt; 25\%</math></b>	2	23	25	8%	92%
<b><math>25\% &lt; x &lt; 30\%</math></b>	3	2	5	60%	40%
<b><math>30\% &lt; x &lt; 50\%</math></b>	19	7	26	73%	27%
<b><math>x &gt; 50\%</math></b>	8	0	8	100%	0%

Además de la tabla mostrada anteriormente, se construyó un gráfico de frecuencia, el cual se muestra en la Figura 49.

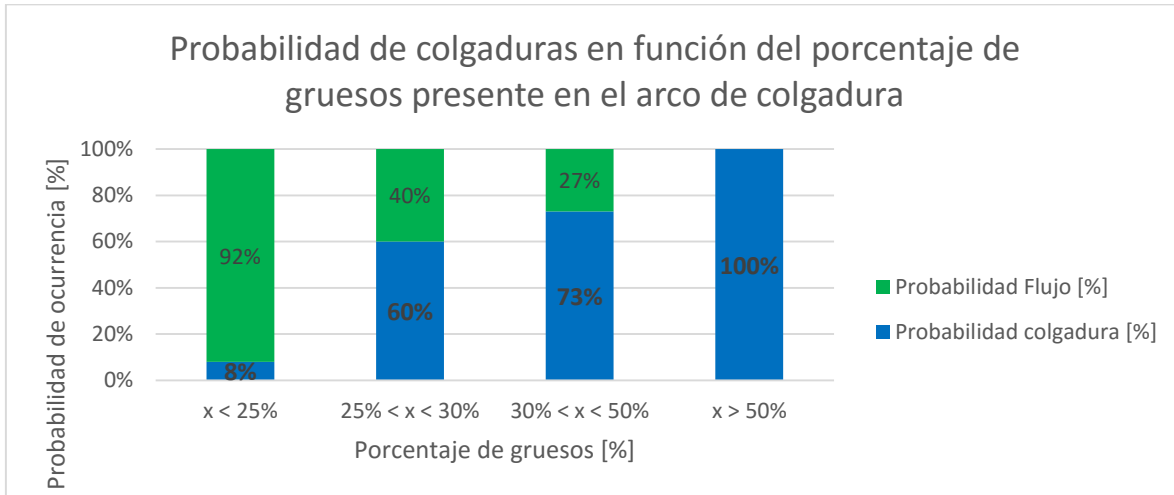


Figura 49: Probabilidad de colgadura en función del porcentaje de gruesos en el punto de extracción.

Respecto a la Tabla 35 y la Figura 49, se observa que con menos de un 25% de gruesos en el punto de extracción existe una baja probabilidad de colgadura de un 8% y un flujo casi seguro de 92%, por el contrario, al aumentar el porcentaje de gruesos entre 30% y 50% se tiene un 73% de probabilidad de colgadura y sobre un 50% el flujo es nulo, con un 100% de probabilidad de que exista una colgadura.

De lo anterior, se definió la siguiente regla:

**Regla número 1: La regla número 1 consideró la distribución de tamaños (en área) y el porcentaje de gruesos ( $x > 28\%$  del ancho del punto de extracción) presentes en el punto de extracción y la probabilidad de ocurrencia de una colgadura. El método es el siguiente:**

- Porcentaje de gruesos menor a 25%: Colgadura tiene un 8% de probabilidad de ocurrencia.
- Porcentaje de gruesos entre 25% y 30%: Colgadura tiene un 60% de probabilidad de ocurrencia.
- Porcentaje de gruesos entre 30% y 50%: Colgadura tiene un 73% de probabilidad de ocurrencia.
- Porcentaje de gruesos mayor a 50%: Colgadura ocurre (100% de probabilidad).

#### 5.4.2 Número de partículas

De las 64 imágenes analizadas (32 imágenes de colgaduras y 32 imágenes de flujo) se obtuvieron los siguientes resultados.

En promedio las colgaduras se formaron por 6 partículas con una desviación estándar de 1, por otro lado, en el caso de las imágenes de flujo, el número de partículas presentes en la base de la batea fue en promedio 7 con una desviación estándar de 2. El detalle del número de partículas presente en cada una de las imágenes puede encontrarse en el ANEXO E.



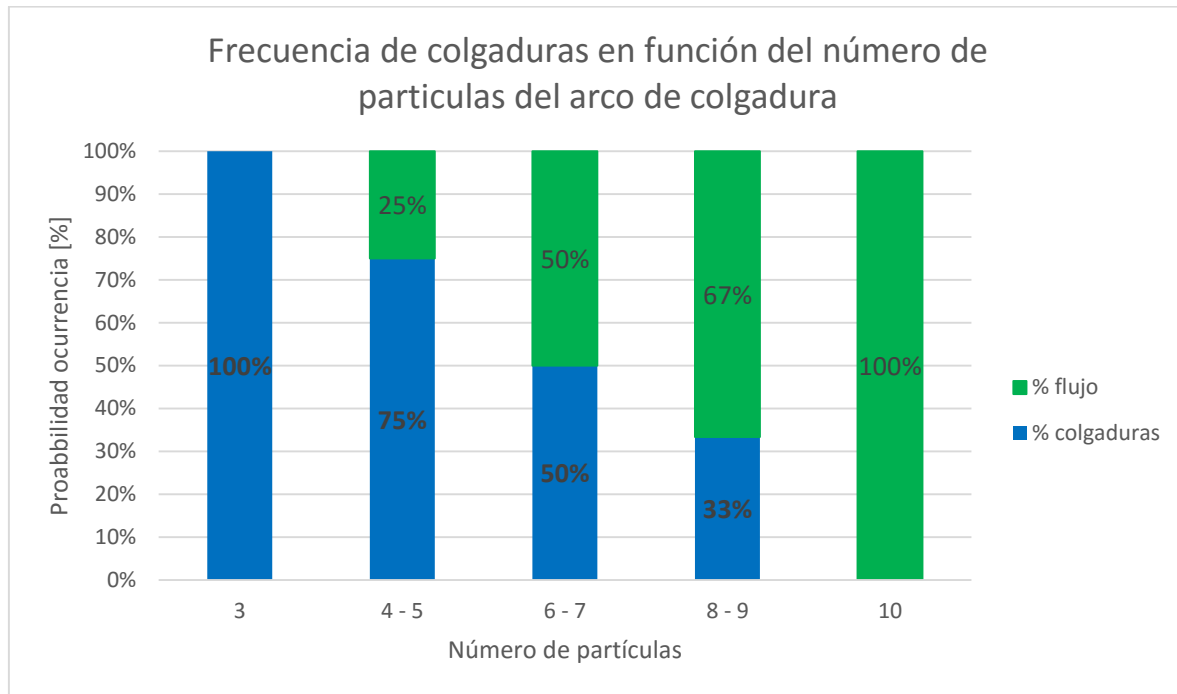
## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE IMÁGENES

Además del promedio obtenido se analizó en detalle las imágenes, agrupándolas por número de partículas que formaron el arco, tanto para las imágenes de colgaduras como para las de flujo. La Tabla 36 muestra las imágenes agrupadas de acuerdo a lo mencionado anteriormente.

*Tabla 36: Análisis número de partículas que forman una colgadura.*

N° de partículas	N° imágenes colgaduras	N° imágenes flujo	total	% colgaduras	% flujo
3	2	0	2	100%	0%
4 - 5	9	3	12	75%	25%
6 - 7	15	15	30	50%	50%
8 - 9	6	12	18	33%	67%
10	0	2	2	0%	100%

Además se construyó un gráfico de frecuencia que se muestra en la Figura 50.



*Figura 50: Frecuencia de colgaduras en función del número de partículas en el arco.*

De la tabla y figura mostradas anteriormente se desprende que: con 3 o menos partículas para un ancho del punto de extracción de 8.8 una colgadura tiene un 100% de probabilidad de ocurrencia (0% flujo) y con 10 o más partículas existe un 100% de probabilidad de flujo (0% colgaduras). Además el número de partículas que queda entre esos límites entrega distintas probabilidades para la ocurrencia de colgaduras o probabilidad de flujo.

De lo anterior se definió la siguiente regla:

**Regla número 2: La regla número 2 considera el número de partículas que forman un arco estable de una colgadura y la probabilidad de ocurrencia de la misma. En detalle se tiene el siguiente método (en paréntesis el número adimensional):**

- 3 o menos partículas (2.9): Colgadura ocurre (100% probabilidad).
- Entre 4 y 5 partículas (2.2 – 1.8): Colgadura con un 75% de probabilidad de ocurrencia.
- Entre 6 y 7 partículas (1.5 – 1.3): Colgadura con un 50% de probabilidad de ocurrencia.
- Entre 8 y 9 partículas (1.1 – 1.0): Colgadura con un 33% de probabilidad de ocurrencia.
- 10 o más partículas (0.9): Colgadura no ocurre (0% probabilidad).

### 5.4.3 Análisis final

Con el fin de que el estudio realizado, en específico, el análisis de imágenes, sea útil para la posible realización de un software que prediga las colgaduras se realizó una metodología de simulación a implementar, que incluyó los resultados obtenidos, así como, análisis extras que intentan explicar los fenómenos físicos que ocurren dentro de una batea al momento de extraer material.

En primer lugar, uno de los resultados más interesantes del análisis de imágenes fue que a partir de la granulometría inicial con la que se llenó el modelo en cada experimento, hay una segregación de partículas hacia la zona de la batea, lo que provoca un cambio en la distribución de tamaño de partículas y con ello nuevas condiciones a la hora de predecir las colgaduras.

Esa segregación fue cuantificada por el análisis de imágenes, tal como lo muestra la Figura 51, en ella se pueden observar las distintas curvas granulométricas considerando el porcentaje retenido (fu) por cada uno de los tamaños, fino ( $x < 1.1$  cm), intermedio ( $1.1 < x < 2.5$  cm) y grueso ( $x > 2.5$  cm). Desde la curva inicial (azul) la segregación se manifestó a través de un aumento en los gruesos y una disminución en los finos, tanto para la condición de flujo (verde) y la condición de no flujo (rojo). Las bandas de error a partir de distintas medias indican que el fenómeno es altamente variable, sin embargo, a partir de un análisis que consideró la totalidad de las imágenes (flujo y no flujo) fue posible obtener una distribución de porcentajes retenidos para cada uno de los tamaños.

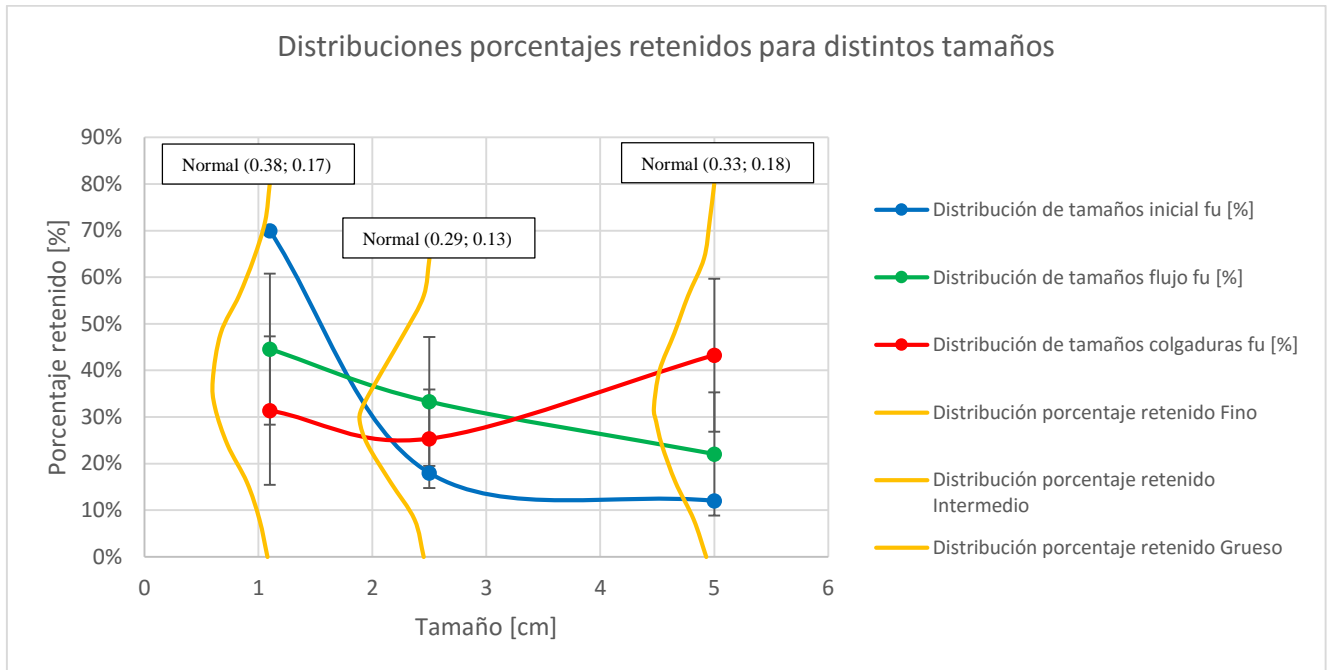


Figura 51: Distribuciones de porcentajes retenidos para cada granulometría

Para el caso del tamaño fino ( $x < 1.1$  cm), los datos se ajustaron a una distribución normal con los siguientes parámetros ( $\mu = 0.38$   $\sigma = 0.17$ ), en el caso del tamaño intermedio ( $1.1 \text{ cm} < x < 2.5$  cm) los datos se ajustaron a una distribución normal con los siguientes parámetros ( $\mu = 0.29$   $\sigma = 0.13$ ) y en el caso del tamaño grueso ( $x > 2.5$  cm) los datos se ajustaron a una distribución normal con los siguientes parámetros ( $\mu = 0.33$   $\sigma = 0.18$ ). Es decir, para cada uno de los tamaños analizados hay un rango de porcentaje de participación en la distribución de tamaños dentro de la batea, dependiendo del porcentaje de participación de cada uno de ellos se puede tener la condición de flujo o no flujo.

Resumiendo, a partir de una curva de distribución de tamaños inicial es posible simular la segregación para obtener cierto porcentaje de un tamaño característico (por ejemplo, los gruesos (28% ancho punto de extracción)), es decir se inicia con un porcentaje inicial de gruesos definido por la curva de fragmentación secundaria, luego de la segregación y la acumulación de gruesos en la batea se obtiene otro porcentaje de gruesos, con ese porcentaje se puede acudir a la regla número 1 de éste capítulo y estimar la probabilidad de flujo o no flujo. A ésta metodología se le pueden incluir muchas otras variables que son de importancia a la hora de definir la condición de flujo, como las variables de diseño de la batea, los esfuerzos, la altura de columna o la humedad, etc.

La Figura 52 muestra un *framework* con los posibles pasos a seguir para construir o mejorar un software predictivo de colgaduras.

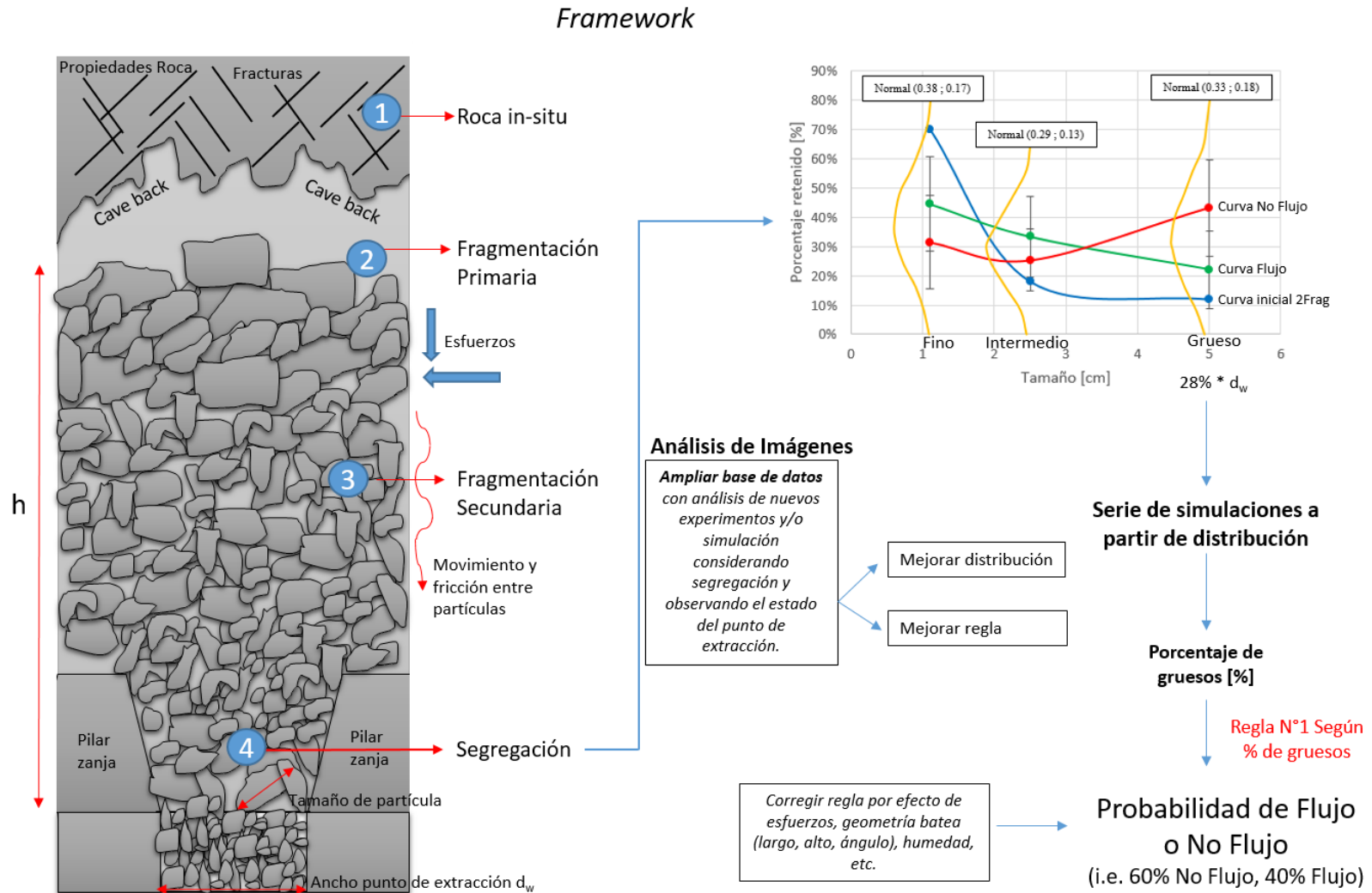


Figura 52: Framework simulación predicción de colgaduras

## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE IMÁGENES

Como se puede observar en la Figura 52, los pasos a seguir comienzan considerando un esquema general de una vista transversal de una batea y su columna de mineral respectiva, en él se explican la mayoría de los fenómenos que ocurren desde que el mineral se quiebra por acción de la gravedad hasta que llega al punto de extracción donde posteriormente un LHD u otro mecanismo lo extrae. Lo primero que se considera es la roca in situ, con sus propiedades inherentes, esto es; litología, humedad, discontinuidades, etc. En segundo lugar, luego de que el quiebre alcanza la roca, se produce la fragmentación primaria, la cual tiene directamente relación con los esfuerzos presentes y las características del macizo rocoso. En tercer lugar, debido fundamentalmente al movimiento, roce entre las partículas y acción de los esfuerzos se produce la fragmentación secundaria, disminuyendo el tamaño de las partículas. Y en cuarto lugar, ocurre la segregación, que no es más que la migración de finos y la acumulación de gruesos dentro de la batea. Los análisis realizados actualmente se hacen específicamente dentro de cada uno de los puntos mencionados anteriormente y el *output* de alguno puede servir de *input* del siguiente.

En el caso de los experimentos de ésta investigación, se tomó como punto inicial la granulometría resultante de la fragmentación secundaria, y mediante imágenes se estudió la segregación. Lo que se plantea para la simulación general es ampliar en primer lugar la base de datos, con el análisis de otros experimentos o la realización de simulaciones de la segregación considerando diferentes curvas de fragmentación secundaria. Con ello se podrá estimar de mejor manera la distribución de porcentajes de gruesos (tamaño igual a 28% del ancho del punto de extracción) resultante de la segregación. Con la distribución, será posible realizar otra serie de simulaciones que estimarán el porcentaje de gruesos, el que a su vez, considerando la regla N° 1 definida en éste capítulo, entregará la probabilidad de flujo. Ésta considerado mejorar la regla con nueva información proveniente de otros experimentos o simulaciones y añadirle en lo posible otras variables de no menor importancia como lo son: los esfuerzos, la geometría de la batea (largo, alto y ángulo), humedad, etc.

### 5.5 Conclusiones del capítulo

Respecto al análisis de imágenes realizado se tienen las siguientes conclusiones:

- El programa de predicción de fragmentación y colgaduras BCF, es una buena opción para poder considerar las colgaduras en, por ejemplo, un plan de producción. Sin embargo, para tener resultados confiables es necesario que las reglas que dominan esas predicciones sean basadas en datos mina o experimentos a escala, por el momento, las predicciones se basan en reglas aplicadas a piques de traspaso.
- La granulometría del material cambia su composición en tamaño al acercarse al punto de extracción y más aún cuando se genera una colgadura. En detalle existe un aumento del 31% de material considerado grueso (tamaño medio igual al 28% del ancho del punto de extracción) desde la granulometría de la columna a la granulometría del encadenamiento, lo anterior fue denominado como segregación.
- Si en la sección transversal de una batea cercana al punto de extracción existe un porcentaje de gruesos (tamaño medio de partícula igual al 28% del ancho del punto de extracción) entre 30% y 50% existe un 73% de probabilidad de ocurrencia de una colgadura y en el caso de que el porcentaje de gruesos sea mayor a 50% existió un 100% de probabilidad de ocurrencia de una colgadura.
- Si en la base de una batea existe un número de partículas menor a 5 (tamaño medio igual a un 20% del ancho del punto de extracción) existe un 75% de probabilidad de ocurrencia de una colgadura y en el caso de que existan 3 partículas o menos existe un 100% de probabilidad de ocurrencia de una colgadura.
- Finalmente, se recomienda aumentar la base de datos con experimentos posteriores a éste con el fin de comparar resultados y verificar la influencia de distintos tipos de roca u otras aberturas de batea. Además de realizar o proponer un software capaz de predecir las colgaduras considerando el fenómeno de segregación.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES

#### 6.1 Conclusiones generales

La Tabla 37 muestra un resumen de la influencia de las variables en los resultados.

*Tabla 37: Resumen del efecto de las variables.*

Resultados	Variables			
	Granulometría del material	Largo de batea	Altura de batea	Ángulo de batea
Masa entre colgaduras	Si	Si	Si	Si
Productividad por baldada	Si	No	No	No
Altura de colgaduras	Si	Si	Si	Si
Baldadas antes de una colgadura	Si	No	No	No
Masa entre sobretamaños	Si	No	No	No
Zonas de extracción (altura de interacción)	Si	Si	Si	Si

Se puede observar que la variable que tiene el mayor impacto es la granulometría, debido fundamentalmente que tiene efecto en la totalidad de los resultados. Mientras tanto, las variables de diseño de la batea afectaron a la masa entre colgaduras, la altura de las colgaduras y las zonas de extracción. El efecto de las variables en cada uno de los resultados se explica a continuación.

- Masa entre colgaduras: A medida que la granulometría utilizada en los experimentos fue más fina, el tonelaje entre colgaduras aumentó. Un aumento en el ángulo de la batea incrementó la masa entre colgaduras. Una disminución en el largo de la batea aumentó la masa entre colgaduras.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

- Modelo multivariable: Un modelo multivariable capaz de predecir la masa entre colgaduras, bajo ciertas condiciones, fue generado desde estos experimentos.
- Productividad por baldada: La productividad por baldada no tuvo dependencia en las variables de diseño de la batea. Para la granulometría gruesa la productividad por baldada disminuyó en comparación con la granulometría fina.
- Altura de colgaduras: La mayor cantidad de colgaduras se produjo en los puntos de extracción, colgaduras catalogadas como colgaduras bajas. La batea corta tuvo una menor altura de colgaduras debido al aumento de interacción entre las zonas de flujo de los distintos puntos de extracción. La mayor cantidad de colgaduras altas tuvo una altura mayor a 4cm desde la visera (2m escalado).
- Baldadas antes de una colgadura: La cantidad de baldadas extraídas desde un punto de extracción antes de que la colgadura impida totalmente el flujo disminuyó con el aumento del tamaño de los fragmentos de material.
- Masa entre sobre tamaños: La masa entre sobre tamaños disminuyó con la granulometría gruesa.
- Masa entre interferencias: La masa entre interferencias disminuyó al utilizar una granulometría más gruesa. La batea corta tuvo la mayor masa entre interferencias de las 3 bateas estudiadas.
- Zonas de extracción: La disminución en el largo de la batea disminuyó la altura de interacción debido a la interacción entre las zonas de flujo de los puntos de extracción. El aumento del ángulo y de la altura de la batea aumentaron considerablemente la altura de interacción. El aumento de la altura de interacción fue debido principalmente al ángulo de la batea, el cual fue mayor que el ángulo de flujo. Debido a lo anterior, el material se mueve a lo largo de la batea en vez de fluir naturalmente en su zona de flujo. Al utilizar una granulometría más gruesa la altura de interacción disminuyó, lo cual era esperable.

Además respecto al análisis de imágenes realizado se tienen las siguientes conclusiones:

- Los métodos que se utilizan actualmente para predecir las colgaduras no han sido validados correctamente, por lo que fue necesario estudiar al detalle la formación de colgaduras.
- La granulometría del material cambia su composición en tamaño al acercarse al punto de extracción y más aún cuando se genera una colgadura. En detalle existe un aumento del 31% de material considerado grueso (tamaño medio igual al 28% del ancho del punto de extracción) desde la granulometría de la columna a la granulometría del encadenamiento.
- Si en la sección transversal de una batea cercana al punto de extracción existe un porcentaje de gruesos (tamaño medio de partícula igual al 28% del ancho del punto de extracción) entre 30% y 50% existe un 73% de probabilidad de ocurrencia de una colgadura y en el caso de que el porcentaje de gruesos sea mayor a 50% existió un 100% de probabilidad de ocurrencia de una colgadura.
- Si en la base de una batea existe un número de partículas menor a 5 (tamaño medio igual a un 20% del ancho del punto de extracción) existe un 75% de probabilidad de ocurrencia de una colgadura y en el caso de que existan 3 partículas o menos existe un 100% de probabilidad de ocurrencia de una colgadura.



### 6.2 Recomendaciones y trabajo futuro

Es recomendable realizar más experimentos, con el fin de estudiar otras variables, además de corroborar la información obtenida en éste estudio. Las variables que podrían estudiarse son las siguientes:

- Estrategia de extracción: Tiene como objetivo estudiar el efecto de planes de producción y su impacto en la desestabilización natural de colgaduras.
- Litología: Estudiar el efecto de la litología en las colgaduras.
- Tamaño y diseño de balde: Estudiar el efecto del tamaño y el diseño del balde en la productividad y en las colgaduras.
- Diseño de bateas: Un estudio más amplio del efecto del diseño de bateas en las colgaduras.

Además de las variables anteriormente mencionadas, sería de gran utilidad comparar los resultados obtenidos con información de colgaduras proveniente de alguna mina de *block caving*.

Respecto al análisis de imágenes, es necesario obtener una mayor cantidad de información acerca de la formación de colgaduras, material con litologías distintas, bateas con un ancho diferente, lo cual va a permitir tener una base de datos amplia y con ello establecer reglas que puedan predecir las colgaduras. Además, se podrían probar las reglas propuestas en BCF, a fin de comparar los resultados con los métodos que actualmente utiliza el programa. También se propone establecer las bases para construir un software de predicción de colgaduras con la información obtenida de ésta investigación.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Altamirano, A., 2014. Diseño de tronadira en una fase - Aplicación a Minería continua – Codelco – División Andina. Tesis de Magíster en Minería. Universidad de Chile, Chile.
2. Andreotti, B., Granular Media; Between Fluid and Solid.
3. BCF, 2005. A program to predict block cave fragmentation. Technical reference and user's guide.
4. Brown, E. T., 2007. Block caving geomechanics, 2<sup>nd</sup> ed. Julius Kruttschnitt Minerals Research Centre, the University of Queensland: Brisbane.
5. Castro, R., 2006. Study of the mechanism of gravity flow for block caving. PhD Thesis, the University of Queensland, Brisbane, Australia.
6. Caterpillar, 2011. R1700G Underground Mining Loader.
7. Codelco, 2011. Planos de diseño de barrenaduras de zanjas. Diferentes divisiones subterráneas de Codelco.
8. Craig, R. F., 2004. Soil Mechanics, 7<sup>th</sup>, Spon Press: New York.
9. Dunstan, G., 2012. Innovative Cave Establishment Practices at Ridgeways Deeps.
10. Esterhuizen, G., Laubscher, D., Bartlett, P., Kear, R., 1996. An Expert System Approach to Predicting Fragmentation in Block Caving, Proceeding Massmin Mining Methods, SAIMM.
11. Flores, G., 2004. Geotechnical challenges of the transition from open pit to underground cave mining at Chuquicamata Mine. Proceedings MassMin 2004, Santiago, 591-602.
12. Flores, G., 2014. Future Challenges and Why Mining Must Change. Caving 2014, Chile.
13. Fuenzalida, M., 2012. Estudio de flujo gravitacional confinado y su aplicación a la minería de caving. Tesis de Magíster en minería. Universidad de Chile, Chile.
14. Garcés, D., 2015. Estudio de flujo gravitacional de material hundido por medio de trazadores inteligentes. Memoria Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
15. Gómez, R., 2014. Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
16. Gomez, R., 2015. Experimental assesment of hang up and secondary fragmentation for block caving. Master Thesis. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
17. Hurtado, J., Pereira, J., 2009. Informe de Back-Analysis de Fragmentación: Sector Reservas Norte. Ingeniería básica. Área de Geología, Gerencia protecto Nuevo Nivel Mina.
18. Hustrulid, W. and Sun, C., 2004. Some remarks on ore pass design guidelines. Proceedings of MassMin 2004, Santiago, Chile, 301-308. Chilean Engineers Institute.
19. Kvpil, R., 1965. Gravity flow of Granular materials in Hoppers and Bins. Part I and II. Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. Vol 2, 35-41.
20. Kvpil, D. R., 2008. Gravity flow in Sublevel and panel caving – A common sense approach.
21. Laubscher, D. 1994. Cave Mining – The state of the art. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 279-293.
22. Laubscher, D., 2006. Updated Cave Mining Handbook.
23. Maass, S., 2012. Alternativas tecnológicas para el descuelgue de zanjas. Tesis de Magíster en minería. Universidad de Chile, Chile.
24. Nedderman, R. M., 1992. Statics and Kinematics of Granular Materials.

## BIBLIOGRAFÍA

25. Olivares, D. 2014. Influencia de fino y humedad en flujo gravitacional confinado. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
26. Orellana, L. F., 2012. Evaluación de variables de diseño del sistema de minería continua a partir de experimentación en laboratorio. Tesis de Magíster en minería. Universidad de Chile, Chile.
27. Pineda, M., 2012. Study of the gravity flow mechanisms at goldex by means of a physical model. Master Thesis. Universidad de Chile, Chile.
28. Susaeta, A., 2004. Theory of gravity flow. Part I and II. Proceedings MassMin 2004, Santiago, 167-178.
29. Vargas, R., 2010. Metodología de diseño de malla de extracción en block y panel caving incorporando back-análisis. Tesis de Magíster en Minería. Universidad de Chile, Chile.
30. Viera, E., 2014. Analysis of hang up frequency in Bloque 1, 2, Esmeralda Sur Mine. Caving 2014, Santiago, Chile.

## ANEXO A

### Análisis dinámico sistema

El siguiente análisis tiene como objetivo determinar la fuerza de empuje que debe implementar el LHD a escala en el modelo experimental, con el fin de vencer las fuerzas de roce presentes y realizar la carga de mineral sin problemas. La Figura 53 muestra el esquema del sistema y las fuerzas presentes.

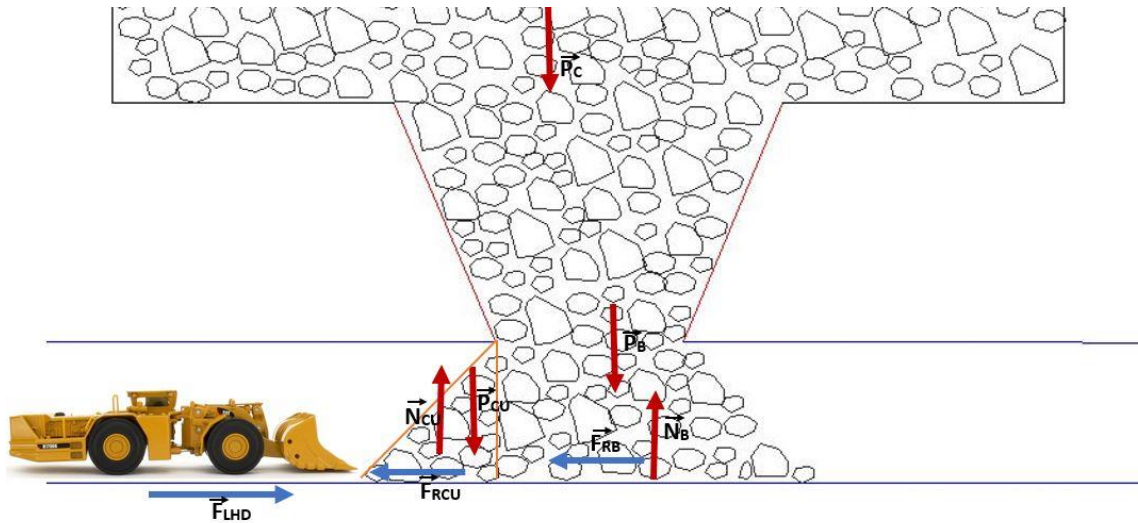


Figura 53: Esquema de fuerzas simplificado

Donde:

$P_C$ : Peso columna mineral

$P_{CU}$ : Peso cuña

$P_B$ : Peso batea

$N_{CU}$ : Fuerza Normal cuña

$N_B$ : Fuerza Normal batea

$F_{RCU}$ : Fuerza roce cuña

$F_{RB}$ : Fuerza roce batea

$F_{LHD}$ : Fuerza empuje LHD

$\Phi$ : Ángulo fricción material

$\mu$ : Coeficiente de roce

Cada una de las fuerzas tiene como unidad el Newton [N]. Dentro del esquema existen tres fuerzas peso que son las más relevantes, primero, el peso de la columna: corresponde a la fuerza que ejerce la columna de mineral sobre la base del modelo, sin considerar la batea, segundo, el peso de la batea: se refiere al mineral contenido dentro de ella, sin considerar la cuña de mineral y tercero, el peso de la cuña: como se indica en el esquema es el mineral que sale por el punto de extracción y que posteriormente es cargado por el LHD.

En primer lugar, es necesario conocer el funcionamiento de la operación de carguío, el LHD se desplaza a través de la galería zanja hasta encontrarse con el mineral, luego, aplica una fuerza suficiente para penetrar en el mineral una distancia “x”, para luego levantar la pala y cargarla totalmente.

En el proceso anteriormente descrito, a la fuerza de empuje del LHD se le oponen directamente la fuerza de roce del peso de la cuña “ $F_{RCU}$ ” e indirectamente la fuerza de roce del peso de la batea “ $F_{RB}$ ”. Esto debido a que en la primera es necesario vencer esa fuerza de roce totalmente tal de penetrar en la cuña de mineral, y la segunda, si bien no es necesario vencerla, aporta a la estabilidad de la cuña, aumentando su resistencia.

Según lo anterior y haciendo una sumatoria de fuerzas en el eje “x” se tiene que:

$$F_{LHD} - F_{RCU} - K * F_{RB} = 0$$

*Ecuación 8: Sumatoria de fuerzas en eje “x”*

Lo cual implica:

$$F_{LHD} = F_{RCU} + K * F_{RB}$$

*Ecuación 9: Fuerza de empuje LHD*

Es decir, la fuerza que debe realizar el LHD debe ser mayor que la fuerza de roce de la cuña más cierto porcentaje de la fuerza de roce de la batea. Luego, se definen las fuerzas de roce como:

$$F_{RCU} = P_{CU} * \mu_{cu}$$

*Ecuación 10: Fuerza de roce peso cuña*

$$F_{RB} = (P_B + P_C) * \mu_B$$

*Ecuación 11: Fuerza de roce peso batea*

La fuerza de roce presente en la superficie de la batea como de la cuña son producidas por el contacto mineral/acrílico, por lo tanto:

$$\mu_{cu} = \mu_B = \mu$$

*Ecuación 12: Coeficiente de roce*

Además, se definen los pesos:

$$P_{CU} = m_{cu} * g$$

*Ecuación 13: Fuerza peso cuña*

$$P_B = m_B * g$$

*Ecuación 14: Fuerza peso batea*

$$P_C = A * \sigma_{ZZ}$$

*Ecuación 15: Fuerza peso columna mineral*

Donde  $A$  es la sección transversal del modelo y  $\sigma_{ZZ}$  es el esfuerzo que produce la columna de mineral sobre la base del modelo, calculado posteriormente con la ecuación de Janssen.

Se realiza también una sumatoria de fuerzas en el eje vertical, como el sistema se encuentra en reposo, estas fuerzas suman 0.

$$N_{CU} + N_B - P_{CU} - P_B - P_C = 0$$

*Ecuación 16: Sumatoria de fuerzas eje "y"*

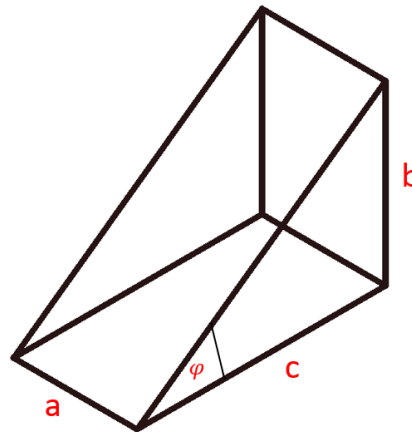
La masa de la cuña de material ( $m_{cu}$ ), se determina utilizando las dimensiones de la galería zanja del modelo, el ángulo de reposo del material ( $\phi$ ), la densidad del mineral ( $\rho$ ) y la Ecuación 17 y la Ecuación 18. La Figura 54 muestra las dimensiones de la cuña.

$$m_{cu} = \frac{a * b * c}{2} * \rho$$

*Ecuación 17: Cálculo masa cuña de material*

$$c = \frac{b}{\tan(\phi)}$$

*Ecuación 18: Constante c*



*Figura 54: Esquema cuña de material*

La masa de la batea ( $m_B$ ), como se muestra en la Ecuación 19, se calcula considerando las dimensiones de la galería zanja, además de las dimensiones de cada una de las bateas que se utilizarán para la realización de los experimentos (3 distintas), en consecuencia, para cada batea se tendrá una fuerza de empuje distinta por parte del LHD. La Figura 55 muestra las dimensiones consideradas y la Ecuación 19 como están relacionadas para obtener la masa total de la batea.

$$m_B = \left( a * b * L + a * B * L + \frac{(A - a)}{2} * B * L \right) * \rho$$

*Ecuación 19: Cálculo masa batea*

Es necesario destacar, que para simplificar los cálculos se consideró tanto la batea como la galería zanja como un todo, siendo la batea solo la porción superior de la Figura 55.

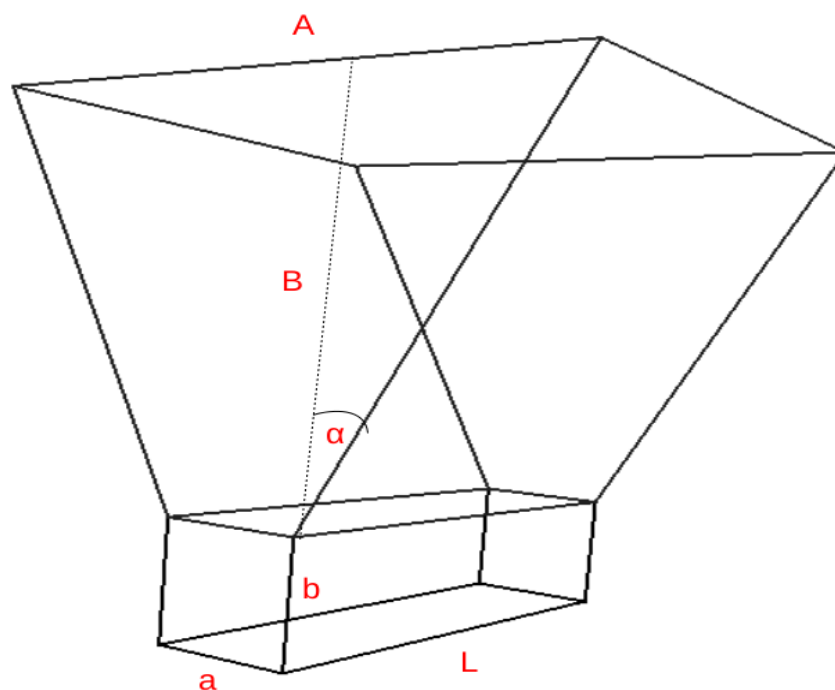


Figura 55: Esquema batea

La sección del modelo "A" se puede observar en la Figura 56, que muestra el esquema del modelo para los experimentos.

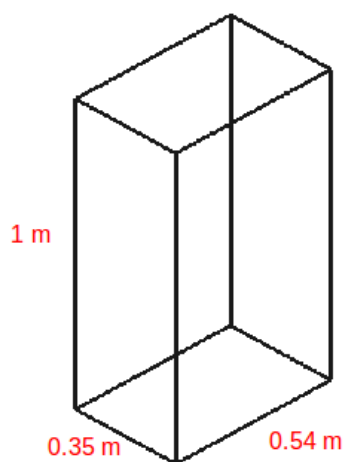


Figura 56: Esquema modelo

El esfuerzo que la columna de mineral provoca sobre la base del modelo se calcula con la ecuación de Janssen, la que se muestra a continuación en la Ecuación 20, se destaca que esta ecuación proviene de un extenso análisis.

$$\sigma_{zz} = \frac{\gamma * R_h}{4\mu_w K} * \left(1 - e^{-\frac{4u_w K}{R_h} z}\right)$$

*Ecuación 20: Ecuación de Janssen*

Donde;

$\gamma$  : Densidad del material [ton/m<sup>3</sup>]

$R_h$  : Radio hidráulico (4A/P)

$\mu_w$  : Coeficiente de fricción de la pared del modelo

$K$  : Constante de Janssen (caso activo)

$z$  : Altura modelo [m]

Finalmente, ya con todas las variables definidas, utilizando las ecuaciones anteriormente mencionadas, es posible estimar la fuerza de empuje que debe ejercer el LHD para vencer las fuerzas de roce mediante la siguiente relación mostrada en la Ecuación 21.

$$\begin{aligned} F_{LHD} &> F_{RCU} + K * F_{RB} \\ F_{LHD} &> (P_{CU} + K * (P_B + P_C)) * \mu \\ F_{LHD} &> (m_{cu} * g + K * (m_B * g + A * \sigma_{ZZ})) * \mu \\ F_{LHD} &> m_{cu} * \mu * g + K * \mu * \left[ m_B * g + \frac{A * \gamma * R_h}{4\mu_w K} * \left(1 - e^{-\frac{4u_w K}{R_h} z}\right) \right] \end{aligned}$$

*Ecuación 21: Fuerza de empuje LHD*

Con los análisis ya realizados, se utilizan los datos del modelo a ocupar en el experimento, los cuales se muestran en la Tabla 38 y la Tabla 39.

*Tabla 38: Dimensiones cuña*

Dimensiones [m]	Cuña
a	0.088
b	0.08
fi	45
c	0.08



Tabla 39: Dimensiones bateas

Dimensiones [m]	Batea 1	Batea 2	Batea 3
a	0.088	0.088	0.088
b	0.08	0.08	0.08
L	0.29	0.24	0.29
B	0.14	0.14	0.3
A	0.22	0.22	0.37

Además la Tabla 40 muestra datos y cálculos a partir de las dimensiones y ecuaciones mostradas anteriormente.

Tabla 40: Datos y cálculos

	Símbolo	Unidad	Batea 1	Batea 2	Batea 3
Masa cuña	mcu	kg	0.45	0.45	0.45
Masa batea	mB	kg	13.39	11.01	35.44
Radio hidráulico	Rh	m	0.43	0.43	0.43
Coefficiente fricción pared	uw		0.35	0.35	0.35
Constante Janssen	K		0.31	0.31	0.31
Altura modelo	z	m	1	1	1
Densidad aparente		ton/m <sup>3</sup>	1.61	1.61	1.61
Densidad específica		ton/m <sup>3</sup>	2.71	2.71	2.71
Aceleración de gravedad	g	m/s <sup>2</sup>	9.81	9.81	9.81
Peso específico		kN/m <sup>3</sup>	15.79	15.79	15.79
Carga vertical (Janssen)	sigma zz	kN/m <sup>2</sup>	9.93	9.93	9.93
Peso columna (Janssen)	Fc	N	504.41	504.41	504.41
Coefficiente de roce	$\mu$		0.61	0.61	0.61
Factor			0.265	0.265	0.265

Finalmente, a partir de la Ecuación 21 se realizaron distintos cálculos de la fuerza que debe aplicar el LHD considerando distintos porcentajes de K, (2%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%) los cuales son mostrados en la Tabla 41.

Tabla 41: Fuerza de empuje LHD a distintos "K"

Porcentaje K	Fuerza LHD [N]		
	Batea 1	Batea 2	Batea 3
0%	2.71	2.71	2.71
2%	10.47	10.18	13.11
5%	22.10	21.39	28.70
10%	41.50	40.07	54.69
20%	80.28	77.43	106.66
30%	119.06	114.78	158.64
40%	157.85	152.14	210.61
50%	196.63	189.49	262.59

Ahora surge la siguiente pregunta, ¿Qué K considerar? Eso puede establecerse a partir de la distancia "x" que el LHD debe penetrar en la cuña de mineral, para ello se realiza el esquema mostrado en la Figura 57.

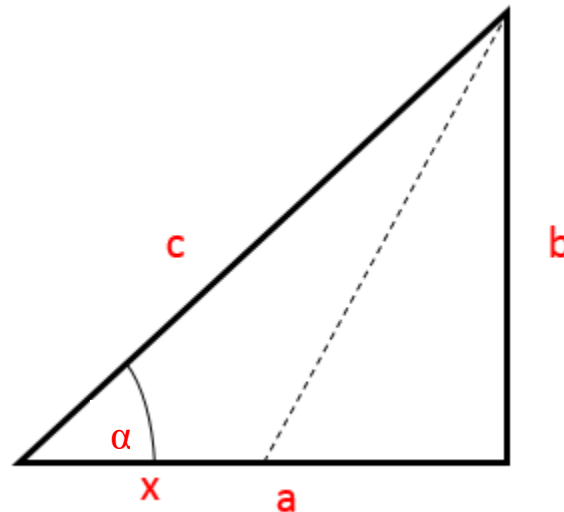


Figura 57: Esquema cuña

A partir de las dimensiones del punto de extracción se sabe que el valor de "b" es 8 cm, "α" es 45° (ángulo de reposo material) y como se trata de un triángulo rectángulo "a" es 8 cm y "c" es 11.3 cm. Se quiere calcular el valor de "x", para ello se conoce el volumen aproximado que tiene la pala del LHD a escala, cuyo valor es de 75.83 cm<sup>3</sup>. Además se conoce el ancho de la pala el cual es 5.9 cm, con los datos anteriores es posible establecer la siguiente relación:

$$\text{Vol material [cm}^3\text{]} = \text{Área} * \text{Ancho}$$

$$75.83 = \text{Área} * 5.9$$

$$\text{Área} = 12.85 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Es decir, se tiene que calcular el valor “x” tal de que el área del triángulo que se muestra en la Figura 58 sea igual a 12.85 cm<sup>2</sup>.

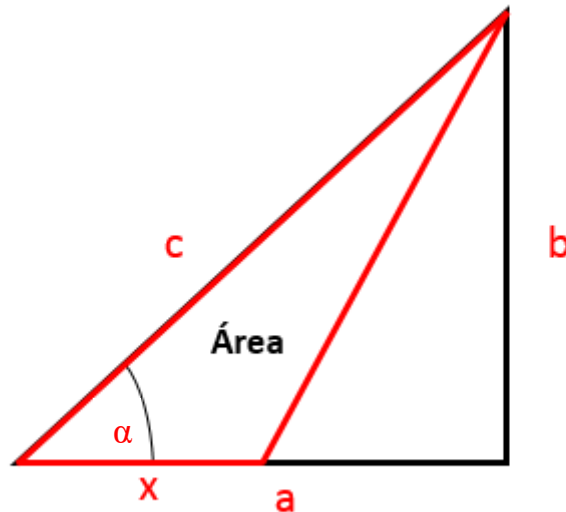


Figura 58: Área de carga

A partir del teorema del coseno, y un análisis posterior se determinó el valor de “x” igual a 2.67 cm. Es decir, el LHD debe penetrar 2.67 cm en la cuña de material para que la pala sea cargada completamente.

Ahora, se asumirá que si el LHD debe penetrar una distancia “a” las fuerzas de roce de los pesos de la columna y la batea afectaran en un 50% al valor total de la fuerza de empuje que debe ejercer el LHD. Con la consideración anterior, se tiene la siguiente regla de 3:

$$\begin{aligned} a & \text{ --- } \rightarrow 50\% \\ x & \text{ --- } \rightarrow y\% \\ y\% & = \frac{2.67 * 0.5}{8} = 16.7\% \end{aligned}$$

En consecuencia, a partir del análisis anterior, el K a considerar es 16.7%, la fuerza de empuje que debe realizar el LHD se muestra en la Tabla 42:

*Tabla 42: Fuerza empuje LHD*

	Fuerza LHD [N]		
Porcentaje K	Batea 1	Batea 2	Batea 3
16.7%	67.48	65.10	89.51

En conclusión, el motor a ocupar por el LHD debe tener una fuerza de empuje superior a 89.51 [N] para la correcta realización de todos los experimentos.

## ANEXO B

**Histogramas 7 experimentos masa entre colgaduras**

La Figura 59 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre colgaduras de cada uno de los eventos medidos durante el experimento 1 (batea 1 y granulometría fina).

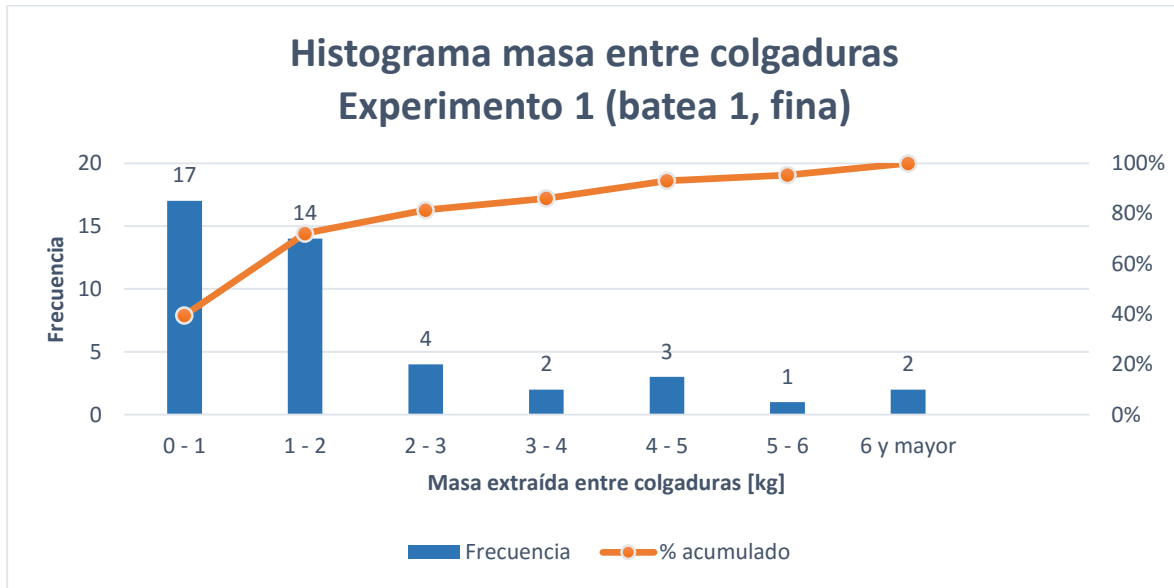


Figura 59: Histograma masa entre colgaduras, experimento 1.

La Figura 60 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre colgaduras de cada uno de los eventos medidos durante el experimento 2 (batea 1 y granulometría intermedia).

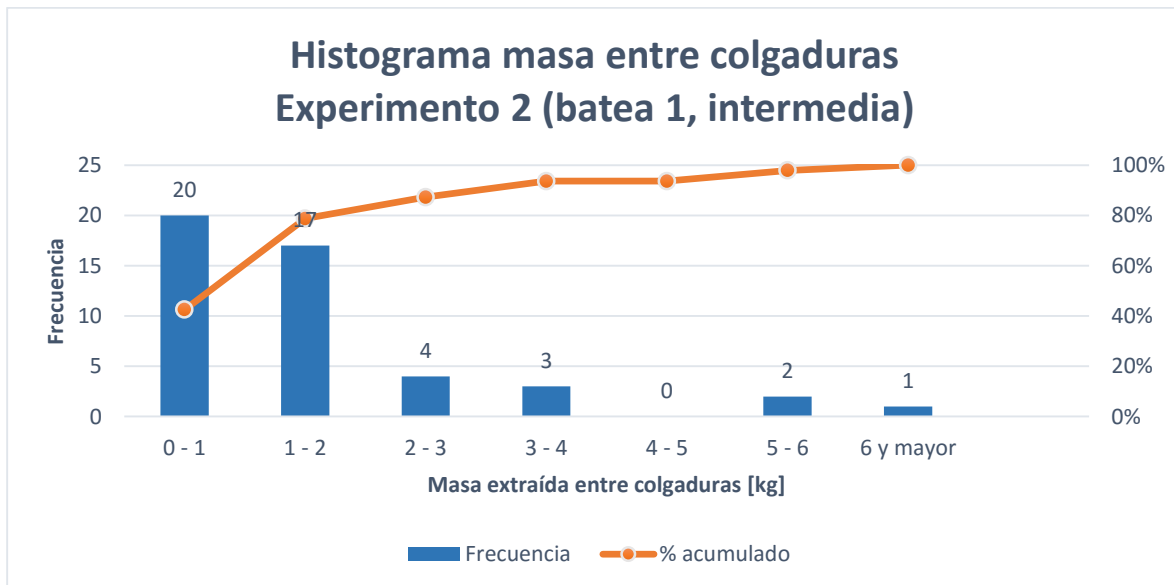


Figura 60: Histograma masa entre colgaduras, experimento 2.

La Figura 61 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre colgaduras de cada uno de los eventos medidos durante el experimento 3 (batea 1 y granulometría gruesa).

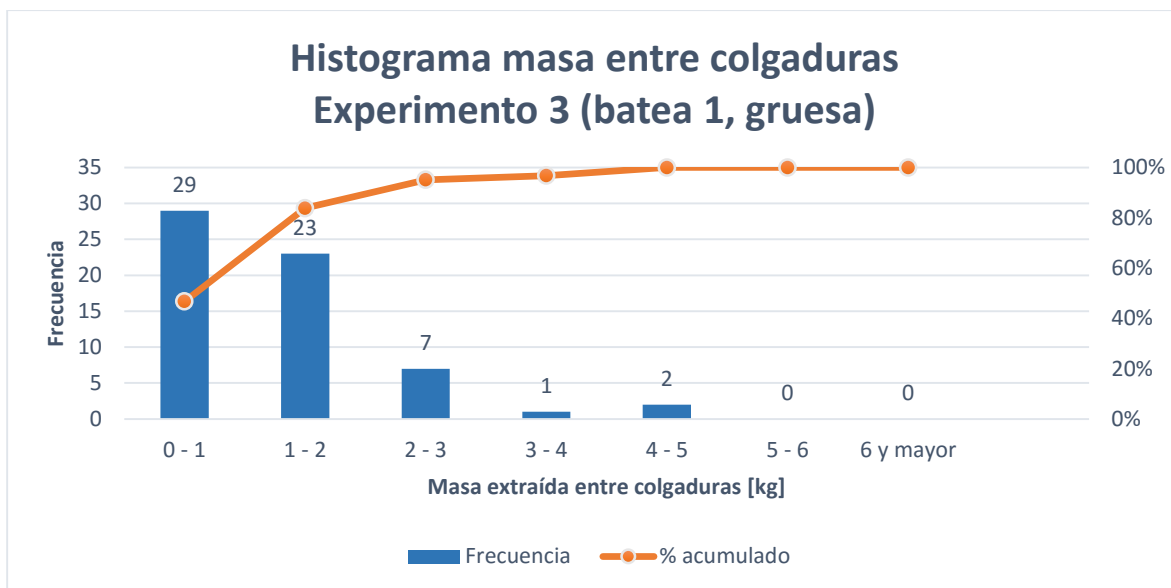


Figura 61: Histograma masa entre colgaduras, experimento 3.

La Figura 62 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre colgaduras de cada uno de los eventos medidos durante el experimento 4 (batea 2 y granulometría fina).

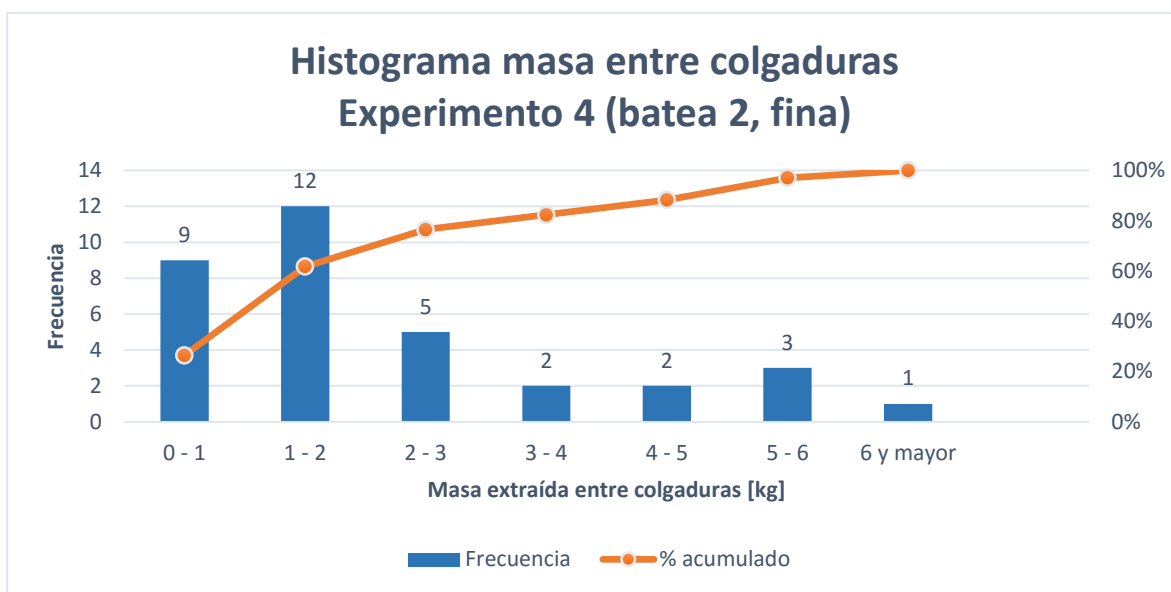


Figura 62: Histograma masa entre colgaduras, experimento 4.

La Figura 63 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre colgaduras de cada uno de los eventos medidos durante el experimento 5 (batea 2 y granulometría gruesa).

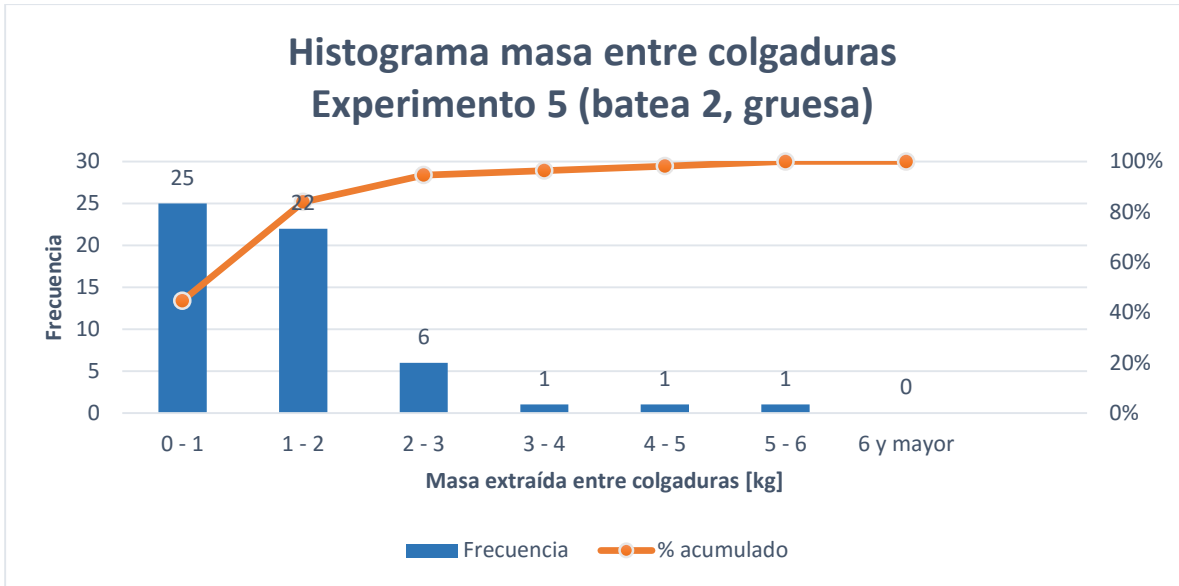


Figura 63: Histograma masa entre colgaduras, experimento 5.

La Figura 64 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre colgaduras de cada uno de los eventos medidos durante el experimento 6 (batea 3 y granulometría fina).

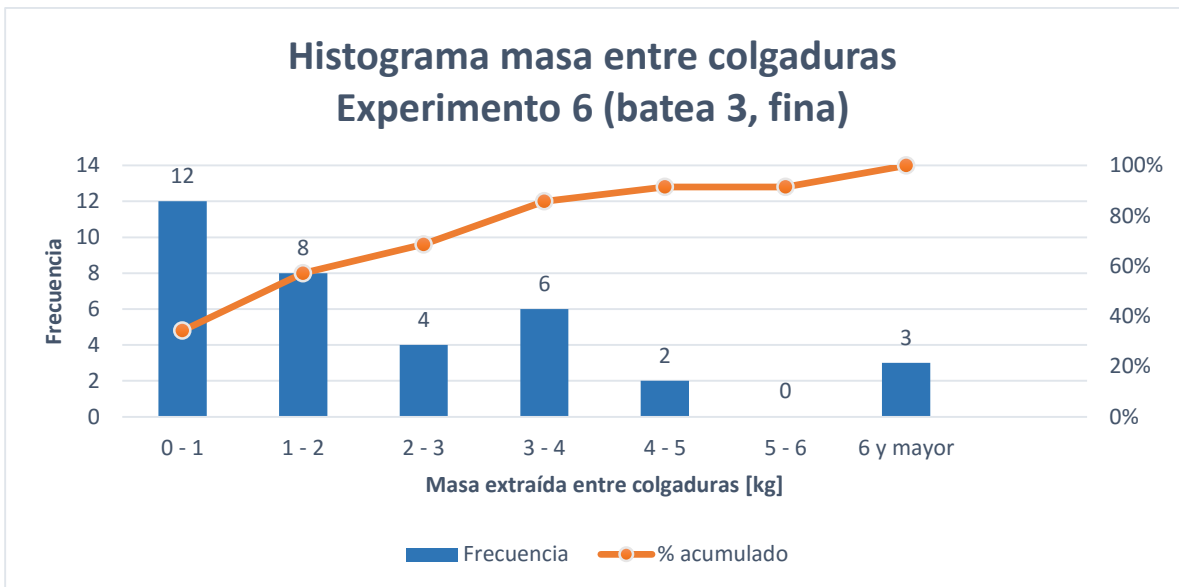


Figura 64: Histograma masa entre colgaduras, experimento 6.

La Figura 65 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre colgaduras de cada uno de los eventos medidos durante el experimento 7 (batea 3 y granulometría gruesa).

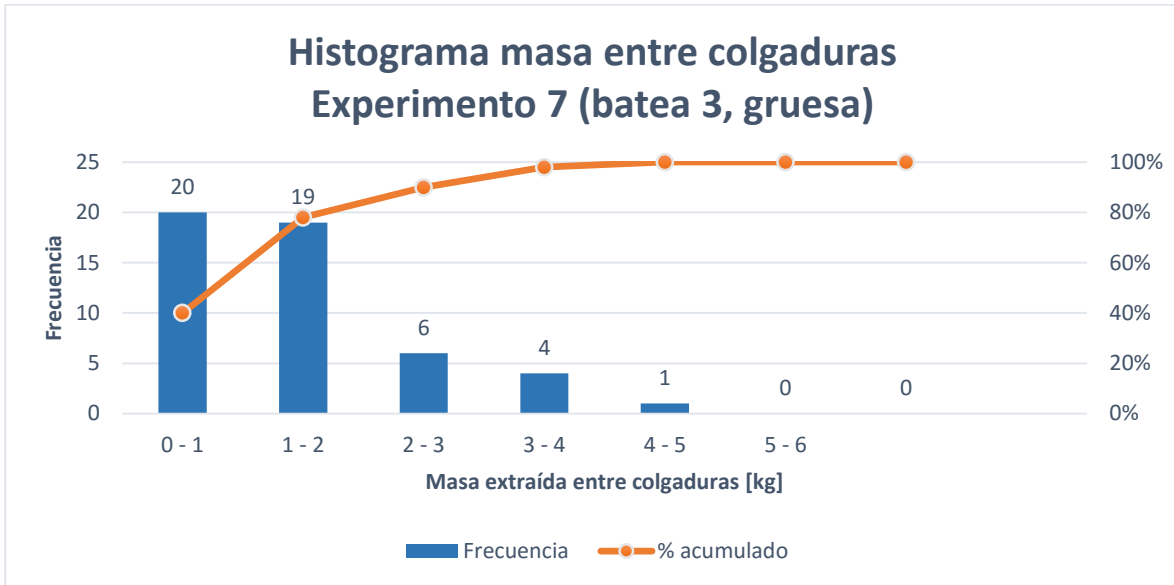


Figura 65: Histograma masa entre colgaduras, experimento 7.



## ANEXO C

**Análisis de producción por baldada (histogramas)**

La Figura 66 muestra un histograma y un ajuste de datos correspondiente realizado con el fin de determinar la distribución de probabilidad asociada a la productividad por baldada para el experimento 2. La distribución resultante fue Gaussiana con un valor esperado ( $\mu$ ) de 72.75 gr y una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 14.78 gr.

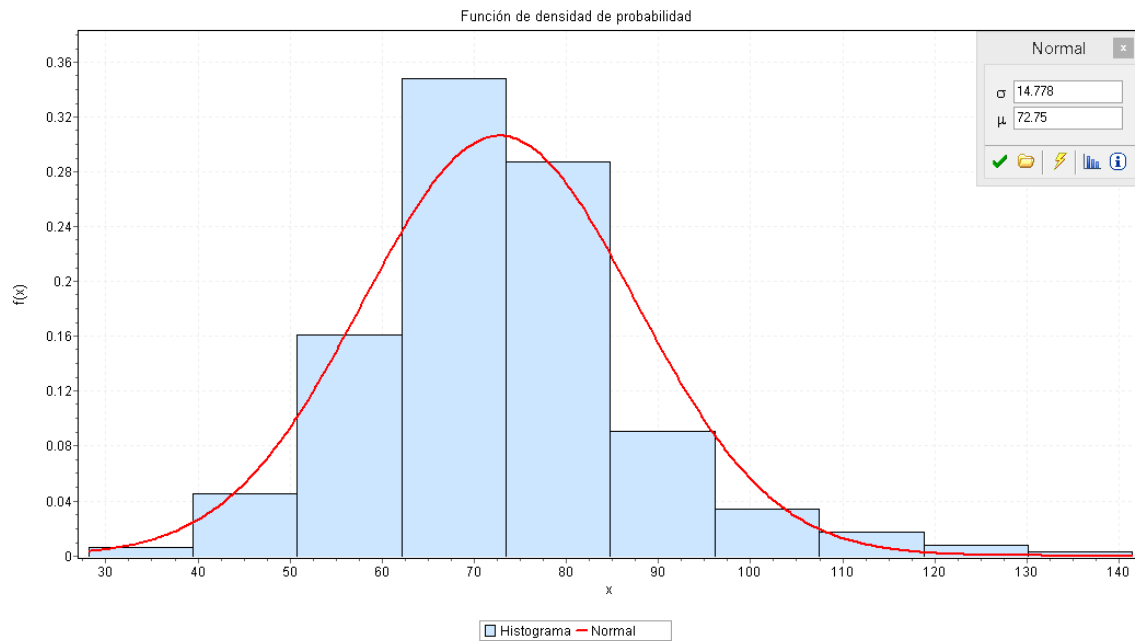


Figura 66: Productividad por baldada, experimento 2.

La Figura 67 muestra un histograma y un ajuste de datos correspondiente realizado con el fin de determinar la distribución de probabilidad asociada a la productividad por baldada para el experimento 3. La distribución resultante fue Gaussiana con un valor esperado ( $\mu$ ) de 86.88 gr y una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 18.01 gr.

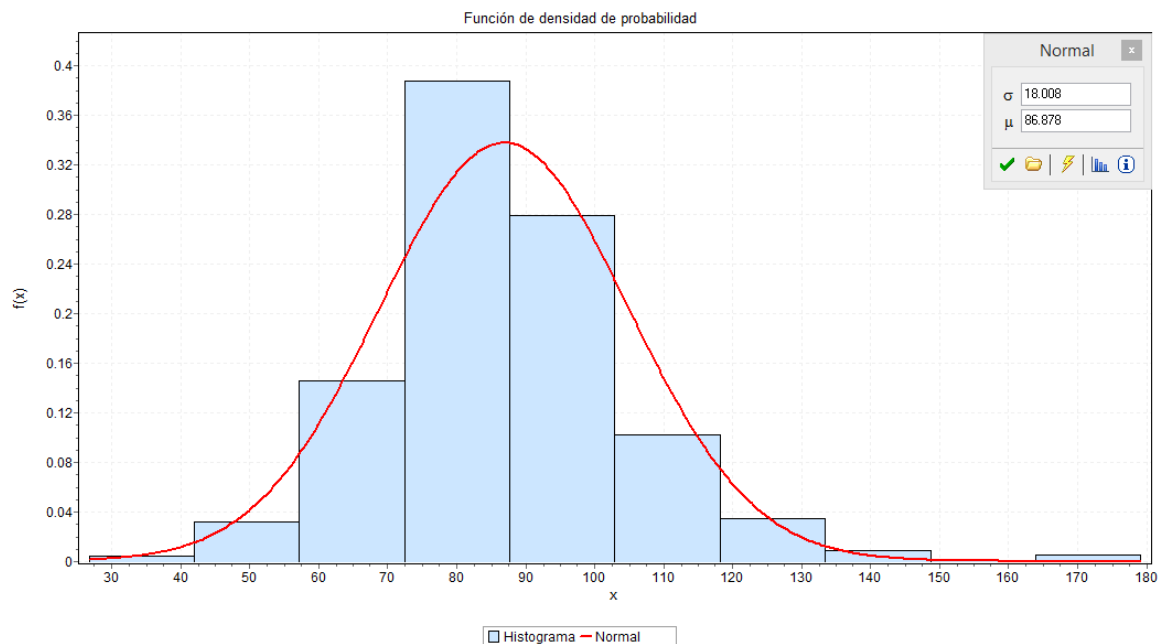


Figura 67: Productividad por baldada, experimento 3.

La Figura 68 muestra un histograma y un ajuste de datos correspondiente realizado con el fin de determinar la distribución de probabilidad asociada a la productividad por baldada para el experimento 4. La distribución resultante fue Gaussiana con un valor esperado ( $\mu$ ) de 84.31 gr y una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 20.01 gr.

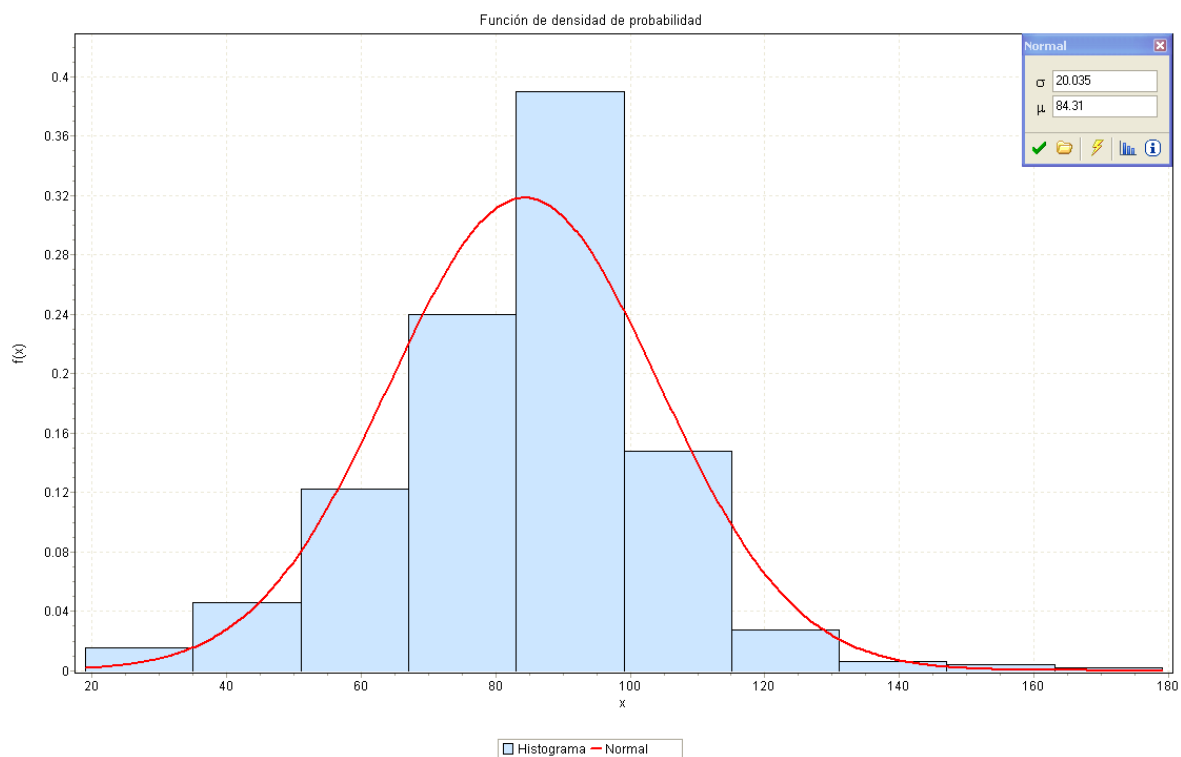


Figura 68: Productividad por baldada, experimento 4.

La Figura 69 muestra un histograma y un ajuste de datos correspondiente realizado con el fin de determinar la distribución de probabilidad asociada a la productividad por baldada para el experimento 5. La distribución resultante fue Gaussiana con un valor esperado ( $\mu$ ) de 81.81 gr y una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 20.78 gr.

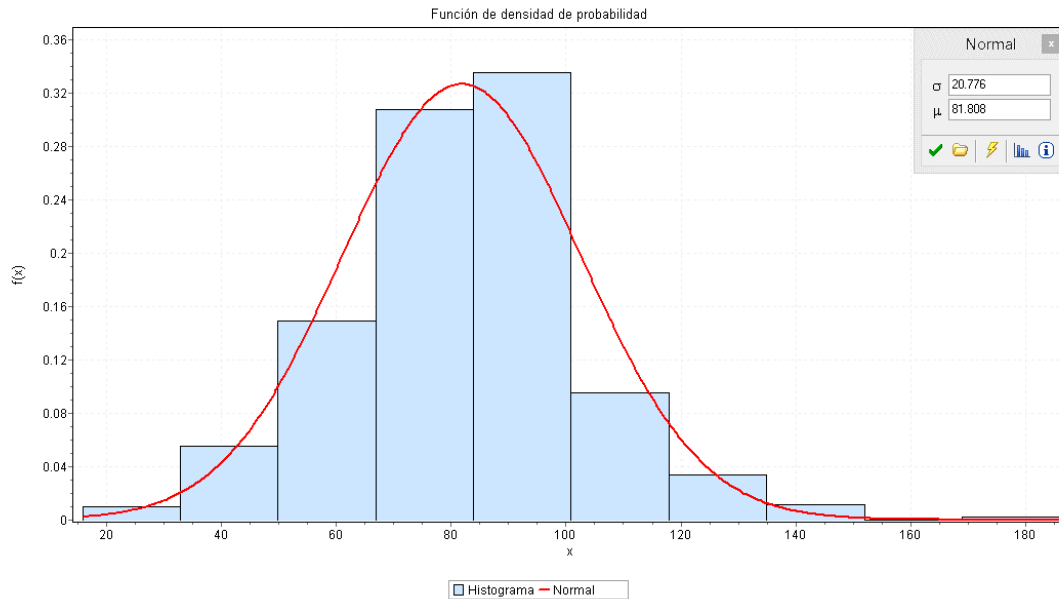


Figura 69: Productividad por baldada, experimento 5.

La Figura 70 muestra un histograma y un ajuste de datos correspondiente realizado con el fin de determinar la distribución de probabilidad asociada a la productividad por baldada para el experimento 6. La distribución resultante fue Gaussiana con un valor esperado ( $\mu$ ) de 86.12 gr y una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 15.62 gr.

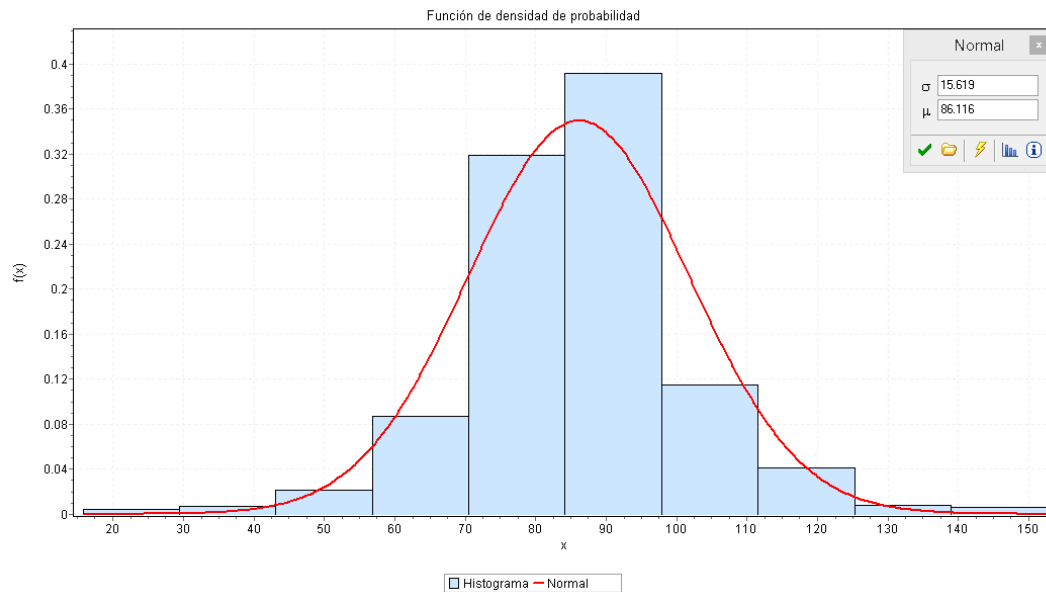


Figura 70: Productividad por baldada, experimento 6.

La Figura 71 muestra un histograma y un ajuste de datos correspondiente realizado con el fin de determinar la distribución de probabilidad asociada a la productividad por baldada para el experimento 7. La distribución resultante fue Gaussiana con un valor esperado ( $\mu$ ) de 78.92 gr y una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 19.29 gr.

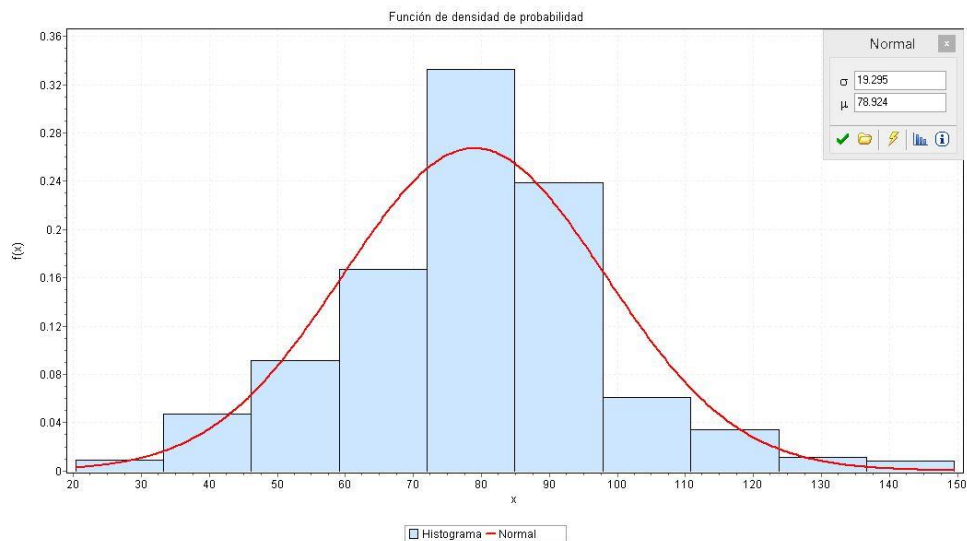


Figura 71: Productividad por baldada, experimento 7.

## ANEXO D

**Histogramas 7 experimentos masa entre sobre tamaños**

La Figura 72 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre sobre tamaños para cada uno de los eventos que ocurrieron durante el experimento 1 (batea 1 y granulometría fina).

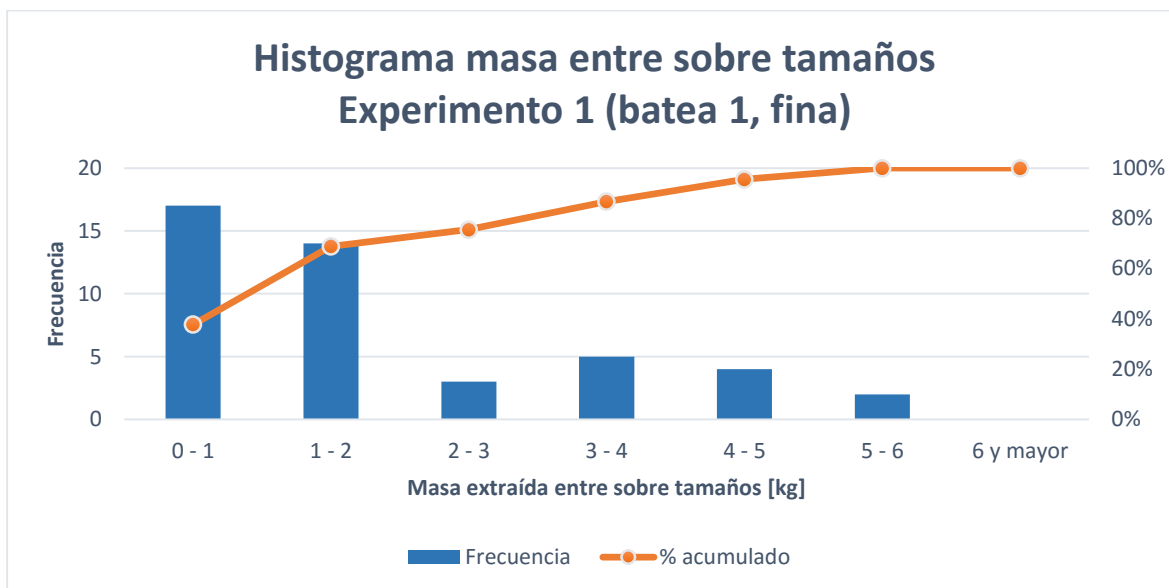


Figura 72: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 1.

La Figura 73 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre sobre tamaños para cada uno de los eventos que ocurrieron durante el experimento 2 (batea 1 y granulometría intermedia).

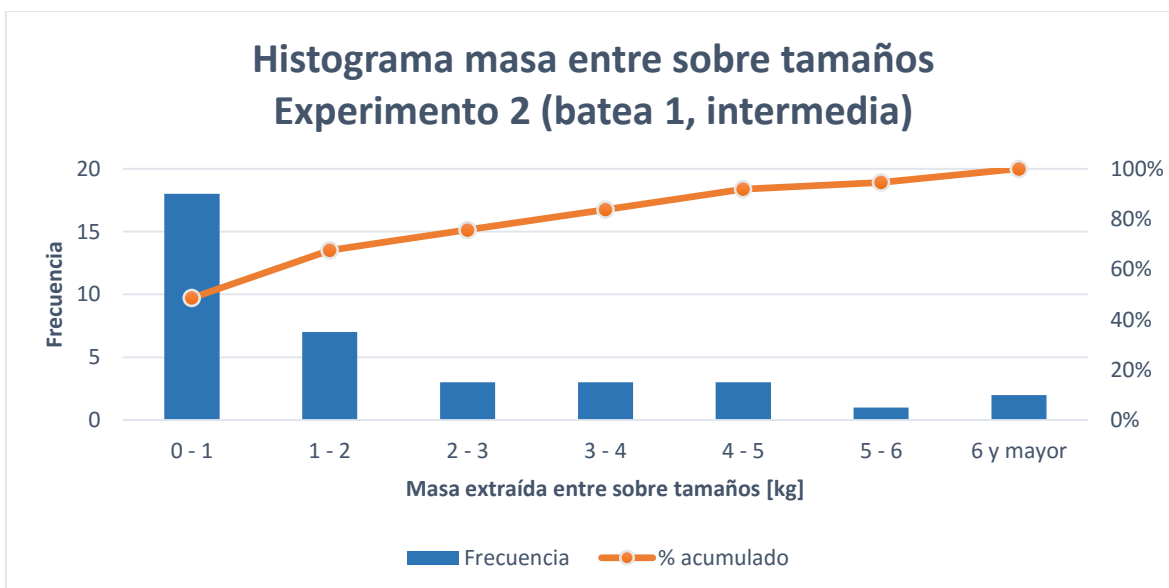


Figura 73: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 2.

La Figura 74 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre sobre tamaños para cada uno de los eventos que ocurrieron durante el experimento 3 (batea 1 y granulometría gruesa).

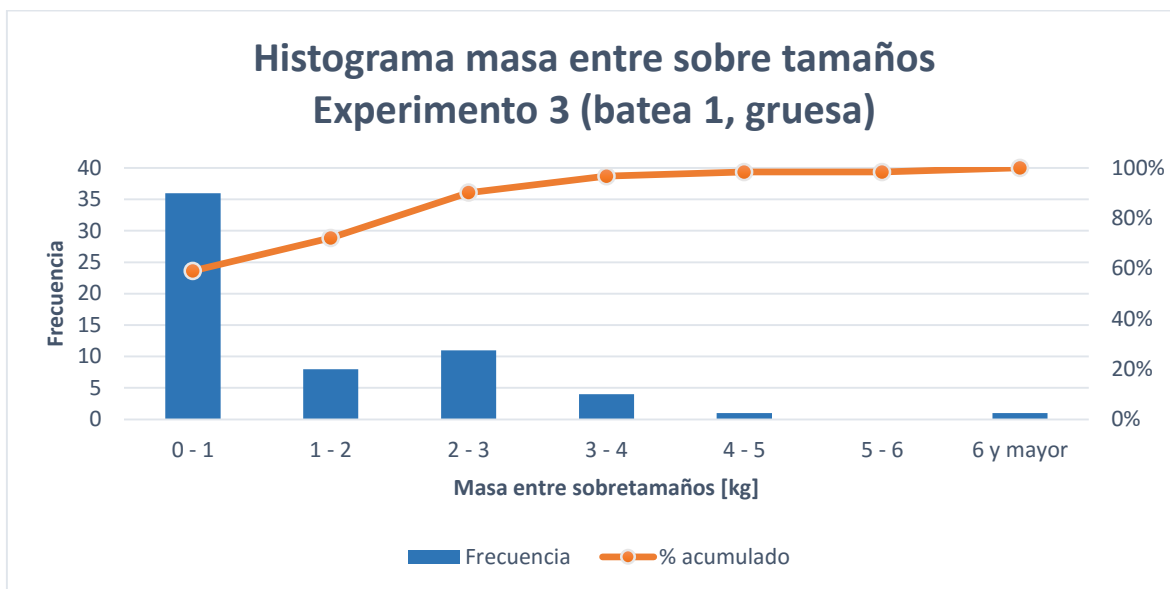


Figura 74: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 3.

La Figura 75 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre sobre tamaños para cada uno de los eventos que ocurrieron durante el experimento 4 (batea 2 y granulometría fina).

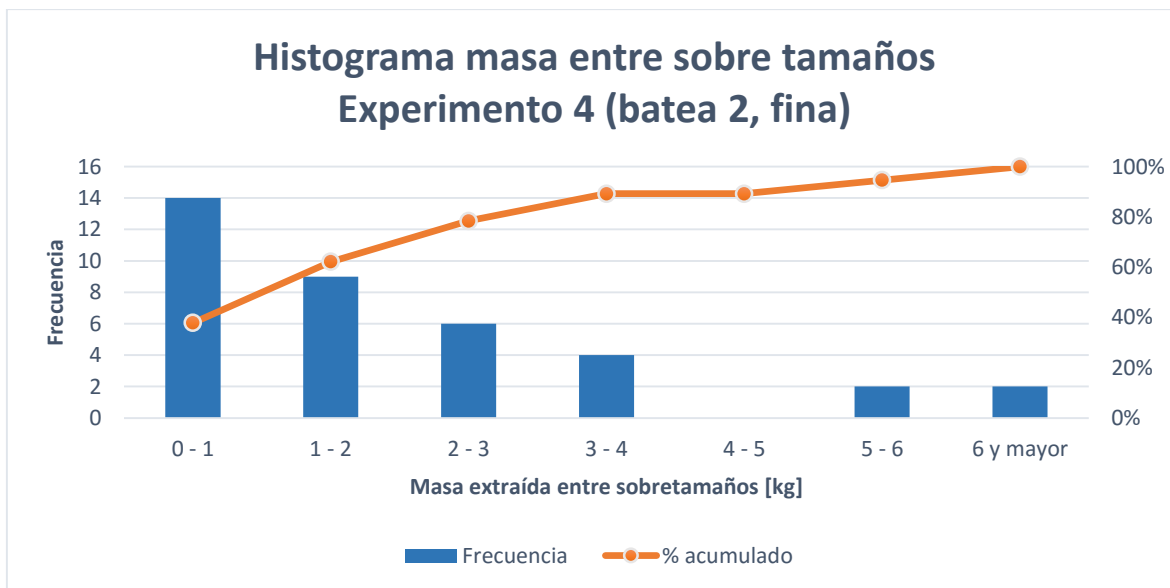


Figura 75: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 4.

La Figura 76 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre sobre tamaños para cada uno de los eventos que ocurrieron durante el experimento 5 (batea 2 y granulometría gruesa).

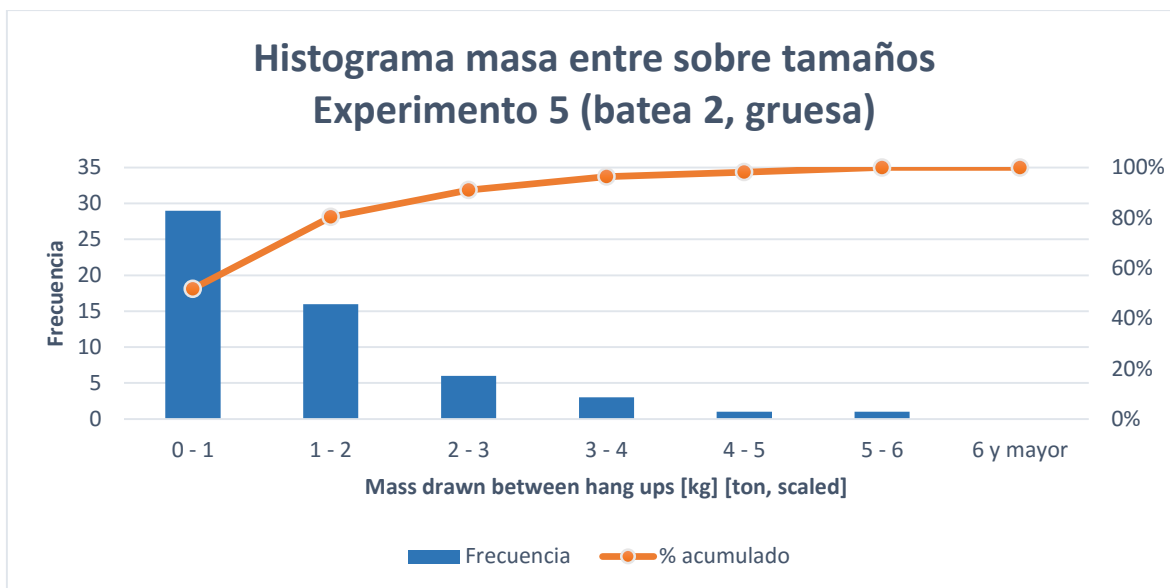


Figura 76: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 5.

La Figura 77 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre sobre tamaños para cada uno de los eventos que ocurrieron durante el experimento 6 (batea 3 y granulometría fina).

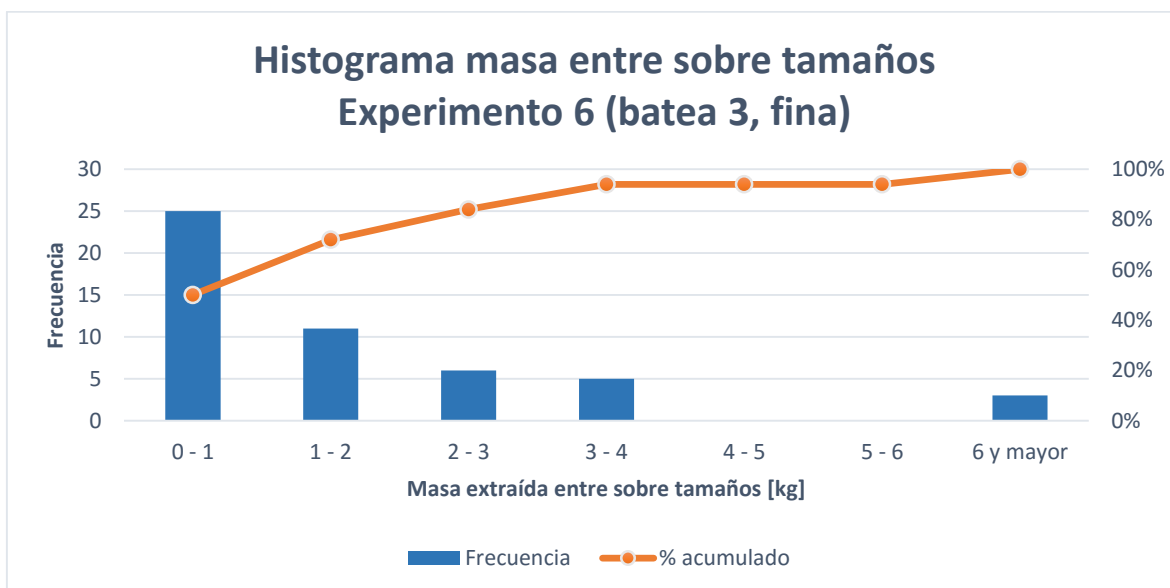


Figura 77: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 6.

La Figura 78 muestra un histograma que agrupa en clases la masa entre sobre tamaños para cada uno de los eventos que ocurrieron durante el experimento 7 (batea 3 y granulometría gruesa).

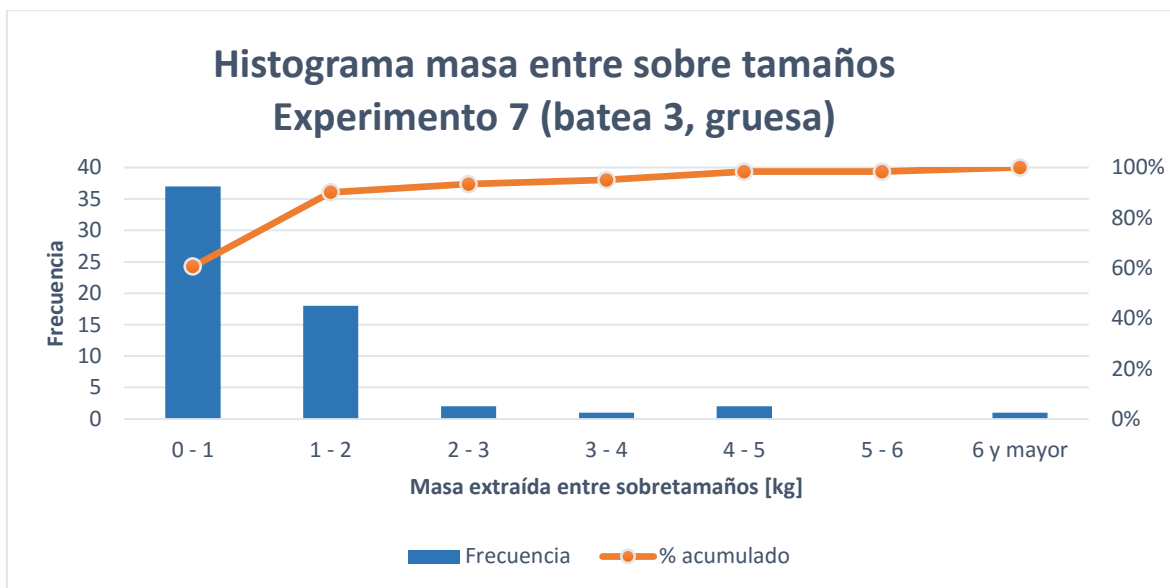


Figura 78: Histograma masa entre sobretamaños, experimento 7



## ANEXO E

**Distribución de tamaños en el punto de extracción**

La Tabla 43 muestra imagen por imagen la distribución de tamaños en el arco y su vecindad en el caso de formación de una colgadura.

*Tabla 43: Distribución de tamaños en caso de colgaduras, imágenes.*

<b>COLGADURAS</b>			
<b>Código</b>	<b>Fino</b>	<b>Intermedio</b>	<b>Grueso</b>
IMG_0440	78%	22%	0%
IMG_0425	44%	37%	19%
IMG_0443	46%	27%	27%
IMG_0426	36%	35%	29%
IMG_0465	30%	40%	30%
IMG_0479	37%	31%	32%
IMG_0486	29%	38%	33%
IMG_0416	43%	22%	34%
IMG_0434	31%	35%	34%
IMG_0446	44%	21%	35%
IMG_0480	42%	22%	37%
IMG_0484	46%	16%	37%
IMG_0481	44%	18%	38%
IMG_0498	33%	30%	38%
IMG_0441	16%	45%	39%
IMG_0489	38%	20%	42%
IMG_0447	16%	41%	43%
IMG_0487	54%	2%	44%
IMG_0492	34%	22%	44%
IMG_0483	36%	20%	44%
IMG_0464	39%	15%	46%
IMG_0500	27%	27%	46%
IMG_0461	26%	26%	48%
IMG_0466	26%	25%	49%
IMG_0449	1%	48%	51%
IMG_0482	30%	18%	52%
IMG_0475	14%	27%	59%
IMG_0496	11%	29%	59%
IMG_0463	24%	10%	65%
IMG_0455	19%	14%	67%
IMG_0436	7%	18%	75%
IMG_0420	3%	11%	87%

La Tabla 44 muestra imagen por imagen la distribución de tamaños en la base de la batea en el caso de flujo.

Tabla 44: Distribución de tamaños en caso de flujo, imágenes.

<b>FLUJO</b>			
<b>Código</b>	<b>Fino</b>	<b>Intermedio</b>	<b>Grueso</b>
IMG_0419	30%	70%	0%
IMG_0437	67%	33%	0%
IMG_0424	81%	16%	3%
IMG_0414	37%	58%	5%
IMG_0501	76%	14%	11%
IMG_0456	49%	40%	11%
IMG_0458	53%	36%	11%
IMG_0497	61%	27%	12%
IMG_0477	33%	55%	13%
IMG_0471	44%	40%	16%
IMG_0499	51%	32%	16%
IMG_0417	42%	39%	18%
IMG_0454	60%	22%	18%
IMG_0493	53%	29%	18%
IMG_0448	33%	47%	20%
IMG_0470	37%	42%	21%
IMG_0444	62%	17%	21%
IMG_0490	58%	19%	22%
IMG_0427	25%	52%	23%
IMG_0460	43%	34%	24%
IMG_0442	58%	19%	24%
IMG_0485	49%	28%	24%
IMG_0495	56%	18%	25%
IMG_0467	29%	45%	26%
IMG_0415	42%	27%	30%
IMG_0494	44%	21%	35%
IMG_0491	29%	35%	35%
IMG_0435	27%	36%	36%
IMG_0462	19%	40%	41%
IMG_0478	13%	39%	47%
IMG_0457	41%	10%	49%
IMG_0488	25%	26%	50%

## Número de partículas en una colgadura

La Tabla 45 muestra la cantidad de partículas que forman los arcos estables de una colgadura en cada una de las 32 imágenes analizadas.

Tabla 45: Análisis número de partículas por arco de colgadura.

Código imagen	Número partículas arco colgadura
487	3
420	4
496	4
441	5
447	5
455	5
463	5
479	5
483	5
492	5
434	6
436	6
449	6
461	6
464	6
465	6
466	6
475	6
482	6
484	6
426	7
446	7
489	7
498	7
500	7
416	8
425	8
443	8
481	8
486	8
480	9
440	3
Promedio	$6 \pm 1$

La tabla 48 muestra la cantidad de partículas presentes en la base de la batea para cada una de las 32 imágenes analizadas.

Tabla 46: Análisis número de partículas flujo.

<b>Código imagen</b>	<b>Número partículas flujo en la base de la batea</b>
478	4
494	5
495	5
427	6
435	6
460	6
477	6
488	6
415	7
424	7
448	7
454	7
456	7
458	7
462	7
470	7
491	7
493	7
419	8
437	8
444	8
457	8
467	8
490	8
417	9
442	9
471	9
485	9
497	9
499	9
501	10
414	12
Promedio	$7 \pm 2$