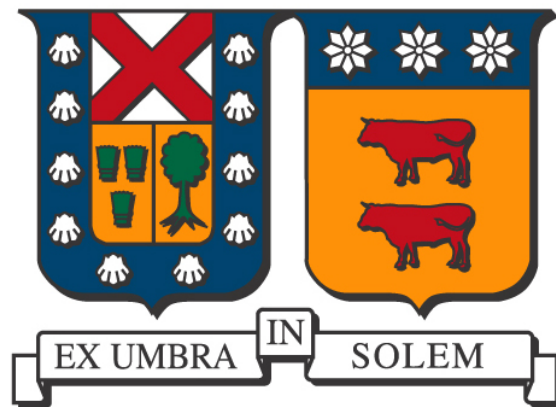


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



Modelación física de flujo de mineral en puntos de extracción de minas explotadas por hundimiento

GUILLERMO ANDRÉS BECERRA CAMPOS

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

**PROFESOR GUÍA
VICTOR ENCINA MONTENEGRO**

**PROFESOR CORREFERENTE
GONZALO NELIS**

OCTUBRE 2024

RESUMEN

La minería subterránea es una técnica de extracción de minerales que se realiza bajo la superficie terrestre, a diferencia de la minería a cielo abierto que opera en la superficie. Esta metodología de extracción resulta ser indispensable para acceder y explotar depósitos de minerales que se encuentran en formaciones geológicas de grandes profundidades o en áreas en que la minería a cielo abierto ya no resulta ser una opción viable debido a factores ambientales, económicos o sociales.

El proceso de minería subterránea involucra varias etapas importantes, donde incluye el proceso de perforación y voladura para romper el mineral fracturándolo hasta lograr un tamaño manejable para la posterior extracción por puntos de extracción estratégicos y por consiguiente el transporte de dicho mineral hacia la superficie mediante sistemas de transportes especializados. Es en el método de la disposición de los puntos de extracción en minas explotadas por métodos de hundimiento en que este estudio está orientado, ya que dicha disposición resulta ser clave para rentabilidad de este tipo de minería, resultando tener relación directa por el grado de eficiencia de recuperación de las reservas de mineral.

Este trabajo experimental se realizaron una serie de casos de estudio de la zona de extracción aislada (ZEA) con una escala de estudio de 1:100, en donde se dispusieron 2 puntos de extracción contenidos en una pared vertical, la cual incidió de forma directa en la elipsoide de extracción generada por cada punto, conllevando un desplazamiento significativo de dicha elipsoide a escala real. Al reconocer las zonas de extracción aislada (ZEA) y con respecto a la forma que se formó dentro de la batea, se obtuvo un volumen y forma de extracción semejante a una elipsoide, donde el volumen teórico y experimental fueron muy semejantes. También se tiene que la presencia de las paredes fijas produce una pequeña deformación en la forma de la ZEA provocando que desde una vista superior dicha zona pase de una forma circular a una elíptica, disponiéndose el eje mayor de forma paralela a la pared fija y siendo esta un 12% de mayor longitud que el eje menor.

Por último, después de realizado una serie de casos en que el distanciamiento entre los dos puntos de extracción fue disminuyendo, se obtuvo que para un distanciamiento igual al diámetro de la elipsoide extraída ($1D_{ZEA}$) se produce una interacción negativa o fusión de las elipsoide conllevando con ello una extracción del 35% menos de material granulado y una baja eficiencia de recuperación de este con respecto a los otros casos analizados. Por otro lado, para un distanciamiento igual a $1,4D_{ZEA}$ el comportamiento de las elipsoides fue muy positivo dado a una pequeña interacción entre ambas, resultando con ello una tasa de extracción igual a la que se venía dando para distanciamiento mayores, sin embargo, para este caso el porcentaje de eficiencia de recuperación del material granulado fue muy alto, siendo este caso de mejor eficiencia de recuperación de dicho material.

ABSTRACT

Subway mining is a mineral extraction technique that takes place below the earth's surface, as opposed to open-pit mining that operates on the surface. This mining methodology is indispensable to access and exploit mineral deposits found in deep geological formations or in areas where open pit mining is no longer a viable option due to environmental, economic or social factors.

The subway mining process involves several important stages, which include the drilling and blasting process to break the ore by fracturing it to a manageable size for subsequent extraction by strategic extraction points and consequently the transport of the ore to the surface by means of specialized transport systems. It is in the method of the disposition of the extraction points in mines exploited by sinking methods in which this study is oriented, since this disposition turns out to be key for the profitability of this type of mining, having a direct relation with the degree of efficiency of recovery of the mineral reserves.

In this experimental work, a series of case studies of the isolated extraction zone (IEZ) were carried out with a study scale of 1:100, where 2 extraction points contained in a vertical wall were arranged, which had a direct impact on the extraction ellipsoid generated by each point, leading to a significant displacement of this ellipsoid at real scale. By recognizing the isolated extraction zones (IEZ) and with respect to the shape formed inside the pan, a volume and shape of extraction similar to an ellipsoid was obtained, where the theoretical and experimental volume were very similar. Also, the presence of the fixed walls produces a small deformation in the shape of the IEZ, causing that from a top view this zone goes from a circular to an elliptical shape, the major axis being arranged parallel to the fixed wall and this being 12% longer than the minor axis.

Finally, after a series of cases in which the distance between the two extraction points was decreasing, it was obtained that for a distance equal to the diameter of the extracted ellipsoid (1DZEA) a negative interaction or fusion of the ellipsoids was produced, leading to an extraction of 35% less granular material and a low recovery efficiency with respect to the other cases analyzed. On the other hand, for a spacing equal to 1.4DZEA, the behavior of the ellipsoids was very positive due to a small interaction between them, resulting in an extraction rate equal to that occurring for larger spacings, however, for this case the percentage of recovery efficiency of the granular material was very high, being this case of better recovery efficiency of such material.

AGRADECIMIENTOS

En este apartado quisiera agradecerle de forma muy sincera y pura a todas las personas que fueron muy importante de alguna u otra forma en mi desarrollo como persona y estudiante en esta casa de estudios.

Primero quisiera agradecerle a mi familia, por ser el pilar fundamental para nunca rendirme pese a los diversos obstáculos que a cada uno se le pueden presentar en el camino de la vida. Ayer, hoy y siempre estaré infinitamente agradecido de Dios por darme unos padres tan humanos como lo son mi madre Jeannete y mi padre Guillermo quienes fueron y no tengo duda que lo serán siempre mi hombro de apoyo, son esas personas que por más que uno se pueda sentir solo en esta vida, ellos siempre aparecerán y estarán en las malas y en las peores. Muchas gracias por permitirme ser soy hijo y soy super afortunado de tenerlos como padres. Por otra parte, quiero también agradecerle a mi hermano Esteban junto con su familia, a mis abuelos y a mi tío Gonzalo que siempre se han preocupado por mí y el apoyo es de forma incondicional. A mi pareja Pía también quiero agradecerle, ya que desde que llegó a mi vida ha sido un pilar fundamental en esta etapa de la vida con su amor y apoyo incondicional.

En estas líneas quiero agradecerle a una personita que siempre me cuida y me ilumina mi camino por muy oscuro que parezca, soy un afortunado de tener un angelito en el cielo, muchas gracias por siempre estar hermanito Freddy, sé que estas con Diosito siempre acompañándome, besitos al cielo hermanito.

Yo me declaro un amante de los hijos perrunos y no quisiera olvidarlos a ellos en estas palabras de agradecimiento. Bruno, Sam, Milán y Kayser , muchas gracias existir en mi vida y por ser una fuente infinita de felicidad diariamente, los amo mucho.

También quisiera agradecerle a mi profesor guía Víctor Encina por su apoyo y preocupación constante en este gran proceso académico que si bien tuvieron algunas complicaciones y cambios durante el camino, nunca dudo en dejarme solo y me ofreció soluciones con respecto a mi gustos de la minería, muchas gracias por confiar en mí y a la vez agradecer a la Universidad Técnica Federica Santa María por ofrecerme una variada de herramientas que me ayudo a terminar esta etapa académica super importante para mí.

Finalmente agradecer a mis amigos del grupo *Humildes Usm-Usachn't* con quienes compartí a lo largo de mi etapa universitaria, siendo un gran pilar de apoyo y muy buenos momentos que me ayudaron sin duda a culminar hoy mi etapa académica.

Muchas gracias a todas la personas que quizás no haya nombrado pero ellas saben que fueron importantes en esta etapa tan linda de mi vida, estaré eternamente agradecido de cada personita que compone este apartado.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	Objetivo general	2
2.1.1	Objetivos específicos	2
3	ANTECEDENTES.....	3
3.1	Minería subterránea.....	3
3.2	Block Caving.....	3
3.2.1	Niveles y zonas del Block Caving	4
3.2.2	Puntos de extracción	6
3.2.3	Distribución geométrica de los elipsoides de extracción	12
3.3	Medio granular	13
3.4	Flujo gravitacional	14
4	TEORÍAS SOBRE FLUJO GRAVITACIONAL.....	15
4.1.1	Modelo de Janelid y Kvapil.....	16
4.1.2	Modelo de Castro	19
4.1.3	Modelo de Laubscher	19
4.1.4	Modelo de Susaeta	22
4.1.5	Estudio sobre la humedad presente en el material granulado por V. Sánchez, R. Castro & S. Palma	24
5	DESARROLLO EXPERIMENTAL	25
5.1	Metodología	25
5.1.1	Preparación del Modelo Físico	25
5.1.2	Procedimiento Experimental.....	26
5.2	Desarrollo de experimento para conocer características de elipsoide de extracción y de las zonas de extracción aisladas (ZEA) generadas.	32
5.3	Desarrollo experimento para conocer otras características de la columna(s) extraída(s) por el(los) punto(s) de extracción.	36
5.3.1	Con un solo punto de extracción	37
5.3.2	Dos puntos de extracción distanciados a 105 [cm]	40
5.3.3	Dos puntos de extracción distanciados a 90 [cm]	47
5.3.4	Dos puntos de extracción distanciados a 75 [cm]	51
5.3.5	Dos puntos de extracción distanciados a 60 [cm]	56
5.3.6	Dos puntos de extracción distanciados a 45 [cm]	61
5.3.7	Dos puntos de extracción distanciados a 40 [cm]	66
5.3.8	Dos puntos de extracción distanciados a 30 [cm]	71
6	CONCLUSIONES.....	76
7	ANEXOS	82

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: evolución del método Block/Panel Caving. (Freeport, 2020).	4
Ilustración 2: Niveles y sectores minería subterránea. (Universidad Politécnica de Madrid, 2019).	6
Ilustración 3: LHD recogiendo el mineral hundido por un punto de extracción. (Cavieres F. , 2013).	6
Ilustración 4: diseño esquemático de un punto de extracción con sus respectivos bloques de minerales que lo componen. (Cavieres F. , 2013).	7
Ilustración 5: Malla tipo cuadrada. (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).	8
Ilustración 6: Malla tipo Teniente. (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).	8
Ilustración 7: Malla tipo Henderson. (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).	9
Ilustración 8: configuración triangular tangente (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).	11
Ilustración 9: configuración triangular traslapada total (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).	11
Ilustración 10: configuración mixta tangente (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).	12
Ilustración 11: Clasificación del material granulado respecto al tamaño de partícula con su respectivo ejemplo (Andreotti, 2013).	13
Ilustración 12: Modelo del elipsoide de extracción (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).	14
Ilustración 13: Modelo de arena con la elipse de descarga dibujada (Kvapil R. , La mecánica y el diseño de sistemas de hundimiento de subniveles, 1982).	16
Ilustración 14: Aplicación de los principios de flujo por gravedad (Kvapil R. , Espeleología de subniveles. Manual de ingeniería para PYME, 1992).	17
Ilustración 15: Geometría del derrumbe del subnivel en la mina Kiruna (Marklund & Hustrulid, W., 1995).	17
Ilustración 16: Representación esquemática del elipsoide de extracción y de movimiento para una extracción aislada (Kvapil R. , Sublevel Caving, 1992).	18
Ilustración 17: ancho de elipsoide Laubscher (Pereira, 2020).	20
Ilustración 18: altura de interacción (Pereira, 2020).	20
Ilustración 19: flujo gravitacional de Laubscher (Laubscher, 2000).	21
Ilustración 20: Mecanismo de difusión de vacío. Difusión de vacío en tiraje aislado (a). Difusión de vacío en tiraje interactivo (b) (Laubscher, 2000).	22
Ilustración 21: Comportamiento aislado-interactivo (Susaeta, 2004).	23
Ilustración 22: Comportamiento para un punto de extracción abierto (a). Comportamiento para un punto de extracción cerrado (b) (Susaeta, 2004).	24
Ilustración 23: Altura y ancho del IEZ en función de la masa extraída para diferentes grados de humedad (w). (Sánchez, Castro, & Palma, 2019).	24
Ilustración 24: Esquema de trabajo para cada caso propuesto. Elaboración propia mediante Lucidchart.	27
Ilustración 25: A corresponde a marcadores 4aA (0,0,45) y 1aA (0,0,0), por otro lado la B corresponde al ángulo de talud natural. Elaboración propia.	28
Ilustración 26: marcador correspondiente a la coordenada (30,75,45). Elaboración propia.	30
Ilustración 27: cajón con las trazas verticales y horizontales correspondientes. Elaboración propia.	30
Ilustración 28: figura A corresponde al llenado de la cota 5 y la figura B al llenado de la cota 8, es decir, al llenado final. Elaboración propia.	31

Ilustración 29: salida del marcado 2hX, correspondiente a la coordenada (35,105,30). Elaboración propia.....	32
Ilustración 30: Vista Noroeste del experimento sobre el estudio de la primera y última ZEA generadas en la batea. Elaboración propia mediante Matlab.....	33
Ilustración 31: Vista Sur del experimento de la ZEA, demarcación de dichas zonas. Elaboración propia mediante Matlab.....	34
Ilustración 32: Relación Altura versus volumen extraído. Elaboración propia mediante Matlab.....	35
Ilustración 33: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°1 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.....	38
Ilustración 34: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°1 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	39
Ilustración 35: Masas acumuladas luego de las 100 extracciones realizadas por punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.....	40
Ilustración 36: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.....	41
Ilustración 37: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	42
Ilustración 38: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.....	43
Ilustración 39: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	44
Ilustración 40: Masas acumuladas luego de las 100 extracciones realizadas por cada punto de extracción. Elaboración propia mediante Matlab.	45
Ilustración 41: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	46
Ilustración 42: Vista Noreste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.....	46
Ilustración 43: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.....	47
Ilustración 44: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	48
Ilustración 45: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.....	49
Ilustración 46: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	49
Ilustración 47: Masas acumuladas luego de las 100 extracciones realizadas por cada punto de extracción. Elaboración propia mediante Matlab.	50

Ilustración 48: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	51
Ilustración 49: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	52
Ilustración 50: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	52
Ilustración 51: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	53
Ilustración 52: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	54
Ilustración 53: Masas acumuladas luego de las 101 y 102 extracciones realizadas por el punto de extracción N°1 y 2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	55
Ilustración 54: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°4 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	56
Ilustración 55: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°5 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	57
Ilustración 56: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°5 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	57
Ilustración 57: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°5 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	58
Ilustración 58: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°5 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	59
Ilustración 59: Masas acumuladas luego de las 103 y 104 extracciones realizadas por el punto de extracción N°1 y 2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	60
Ilustración 60: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°5 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	61
Ilustración 61: Vista Noroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°6 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	62
Ilustración 62: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°6 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	62
Ilustración 63: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°6 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	63
Ilustración 64: Vista Norte de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°6 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	64
Ilustración 65: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°6 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	65

Ilustración 66: Masas acumuladas luego de las 101 extracciones realizadas por el punto de extracción N°1 y 2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	66
Ilustración 67: Vista Noroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°7 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	67
Ilustración 68: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°7 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	68
Ilustración 69: Vista Suroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°7 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	69
Ilustración 70 Vista Norte de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°7 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	69
Ilustración 71: Vista Sureste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°7 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	70
Ilustración 72: Masas acumuladas luego de las 105 y 103 extracciones realizadas por el punto de extracción N°1 y 2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	71
Ilustración 73: Vista Noroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°8 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	72
Ilustración 74: Vista Noroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°8 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.	72
Ilustración 75: Vista Suroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°8 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	73
Ilustración 76: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°8 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.	74
Ilustración 77: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°8 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	74
Ilustración 78: Masas acumuladas luego de las 88 y 86 extracciones realizadas por el punto de extracción N°1 y 2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.	75
Ilustración 79: Representación de un distanciamiento optimo entre elipsoides. (Encina & Letelier).	76
Ilustración 80: Fenómeno de fusión entre elipsoides. (Encina & Letelier).	77
Ilustración 81: Extracción de mineral del experimento 7 versus el experimento 8. Elaboración propia mediante Matlab.	78
Ilustración 82: Vista superior de la elipsoide extraída. Elaboración propia.	79

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Ecuación experimente del volumen extraído en función de la altura H. Elaboración propia.....	35
Ecuación 2:Ecuación teórica del volumen de una elipsoide. Elaboración propia.	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: índices geométricos asociados a cada configuración (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).....	10
Tabla 2: estudios sobre el flujo gravitacional en modelos físicos (Vergara, 2016).....	15
Tabla 3: letras y valores correspondiente a la coordenada X e Y. Elaboración propia.	29
Tabla 4: cotas con sus valores correspondientes. Elaboración propia.....	29
Tabla 5: Masas extraídas por cada cota. Elaboración propia.	34

GLOSARIO

ZEA = Zona de extracción aislada.

IEZ = Zona de extracción aislada.

D_{ZEA} = Diámetro de la zona de extracción aislada.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Chile es un país de interés minero a nivel mundial, dado una gran participación en el comercio específicamente del cobre, donde cuenta con el 21% de las reservas a nivel global y conllevando esto a ser un productor que representa el 24% de la producción de cobre en el mundo (Consejo minero, 2023).

La industria minera se ha visto enfrentada a un agotamiento de los yacimientos a nivel superficial lo que ha provocado que las diferentes industrias vean en la minería subterránea una viabilidad para seguir explotando y extrayendo minerales para abastecer a nivel mundial el mercado de minerales. Es tal dicho efecto que puede provocar la minería subterránea en Chile y en su rol a nivel mundial, que se dice que si importantes operaciones minerales tales como Chuquicamata (la cual ya comenzó sus operaciones subterráneas el año 2022), Los Bronces Integrado, Collahuasi, Ministro Hales y Escondida comienzan sus operaciones subterráneas, Chile podría aumentar la participación de la minería subterránea, llevándola hasta un 40% del total, donde ya en siglo XXI la participación de este tipo de minería ya es de un 20% (Minería chilllena, s.f.).

Al analizar los métodos de extracción de mineral a nivel de minería subterránea se tiene que el Block/Panel Caving es un método que se basa en la explotación de minerales a través de la fracturación y posterior transporte de dichos minerales, donde dicho método puede alcanzar ritmos de explotación muy altos inclusive muy semejantes a los obtenidos en la minería a rajo abierto. Lo anterior, solo se podrá obtener a través de una buena planificación minera donde las columnas de extracción sean las óptimas y con ello los puntos de extracción sea también los óptimos para realizar la extracción de los minerales y de esta forma obtener tasas de producción altas.

Es por todo lo anterior, que el interés y motivación por el cual nace este trabajo experimental es para analizar en base a observaciones experimentales los distintos efectos que puede ocasionar la ubicación de uno o dos puntos de extracción para una columna de mineral, por ende se analizará las tasa de extracción y también el estudio de la o las elipsoides que se producen en la extracción de mineral producto del o los puntos de extracción y las diferentes distancias que puedan existir entre ellos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

El objetivo principal de este estudio es analizar el grado de influencia que tiene una pared fija con respecto a la elipsoide de extracción originada por un punto de extracción dispuesto en aquella pared.

2.1.1 Objetivos específicos

- Describir la zona de extracción aislada (ZEA) generada por los puntos de extracción.
- Identificar y cuantificar el desplazamiento de la zona de extracción aislada con respecto a una pared fija.
- Determinar el distanciamiento mínimo entre 2 puntos de extracción para una mejor eficiencia de recuperación de mineral.

3 ANTECEDENTES

3.1 Minería subterránea

La minería tiene por objetivo extraer minerales de interés desde un área en específico utilizando diferentes métodos para explotar y disminuir el tamaño de las diferentes rocas que existen en la tierra, de esta forma realizar el transporte de este a un lugar donde seguirá siendo procesado hasta obtener el mineral de interés como tal. Con el pasar de los años y las diferentes explotaciones ha ocurrido un agotamiento de los yacimientos superficiales, es por esto que la industria minera se enfrenta a un escenario global en que los yacimientos con alta ley en la superficie (rajo abierto) se están agotando, lo que está obligando a las mineras a cambiar sus modelos de operación y ver la viabilidad y/o desarrollar la minería subterránea, es decir, como una alternativa para satisfacer la creciente demanda de minerales a nivel mundial y en el caso de Chile específicamente del cobre (Minería chilena, s.f.).

3.2 Block Caving

El Block/Panel Caving corresponde a un método de hundimiento por gravedad y fracturación de un cuerpo rocoso utilizado en la minería subterránea, dado que permite extraer grandes depósitos de minerales de baja ley bajo tierra. Dicho método se basa en socavar el yacimiento provocando un colapso en su estructura producido por su mismo peso en una serie de cámaras que se utilizan como puntos de extracción donde se procede a extraer el mineral. Este método es utilizado en la minería subterránea para prolongar la vida útil de grandes depósitos previamente explotados a cielo abierto y a su vez es un método cada vez más utilizado a nivel mundial. Lo anterior es debido a que el hundimiento de bloque tiene una alta tasa de producción, lo que llevado a números significa altos costos de capital al inicio del proyecto, pero, por otro lado, bajos costos operativos relativamente bajos. En sus diferentes formas es aplicable a depósitos de diversas formas y a minerales de diversa resistencia, pero tiene requisitos y limitaciones rígidos, dado que, en yacimientos inadecuados, o cuando se lleven a cabo descuidadamente, la pérdida de mineral puede exceder la de cualquier otro método. Dentro de las condiciones generales que debe de haber para la utilización este método se tiene que el yacimiento contenga un área horizontal grande, mineral débil o si es duro que se encuentre fracturado (Freeport, 2020).

Sin embargo, hay una gran incertidumbre aún sobre la predicción del rendimiento del derrumbe por bloques, debido a que el conocimiento es limitado dado a las características del yacimiento, de los procesos de fragmentación y flujo. También se tiene poco control directo de lo que puede aparecer en los puntos de extracción.

Debido a que es un método que va creciendo y siendo cada vez más utilizado por las mineras, provoca una evolución continua y se refleja en los resultados que se van generando años tras años y que se verifica en el aumento de las tasas de producción.



Ilustración 1: evolución del método Block/Panel Caving. (Freeport, 2020).

Una de las desventajas de la utilización de este método es la inhabilitación de una explotación selectiva por lo que es imposible separar sectores de baja ley incluidos dentro del macizo mineralizado. Dentro de cuerpo mineralizado ya preexisten esfuerzos internos como los son los esfuerzos gravitacionales y tectónicos, a estos se le agregan los esfuerzos inducidos por la modificación de sus condiciones de equilibrio debido al corte basal, todo lo anterior provoca en dicha columna que se desea extraer una inestabilidad por lo que la parte de la loza superior se desploma de forma parcial rellenando el vacío que se genera hasta que el equilibrio tiende a reestablecerse.

Posteriormente el mineral de la columna que se ha desplomado se comienza a extraer por la base de esta a través de una especie de embudo que se genera y esto a su vez a través de los puntos de extracción se empieza a transportar a la superficie. Al momento de ir extrayendo el mineral a través de los puntos de extracción se van generando nuevas inestabilidades en dichas columnas, generando que el mineral aun contenido en las columnas se vaya desplomando o hundiendo hasta la superficie, a lo que se le denomina subsidencia donde dicho fenómeno termina cuando se extrae toda la columna mineralizada.

Por otro lado, se tiene que dependiendo de la extensión vertical que se tenga del cuerpo mineralizado que se quiere extraer este puede ser explotado a partir de uno o más niveles de producción, donde la altura de las columnas que se van a extraer puede variar entre los 40 y 300 metros. De la misma forma, se tiene que en terreno se distinguen dos modalidades de aplicación de este método como los son el Block y Panel Caving, donde el primero contiene columnas de extracción en que el área basal de estas está entre los 3.600 a 10.000 metros cuadrados, es decir, con medidas basales de 60 x 60 y 100 x 100 metros respectivamente (ELPHOS Mine Planning Laboratory, s.f.).

3.2.1 Niveles y zonas del Block Caving

- Nivel de producción: es el conjunto de galerías situadas de forma paralela y a su vez espaciadas entre 15 a 30 metros donde se realiza la operación de extracción del cuerpo mineralizado hundido.

- Nivel de hundimiento (UCL): es el conjunto de galerías dispuestas de forma paralela con un espaciamiento entre los 15 a 30 metros a partir de los cuales se realiza la socavación o corte basal de la columna que se va a extraer. Este nivel se ubica a una cota que puede variar entre los 7 a 20 metros por sobre el nivel de producción.
- Embudos: también llamados zanjias recolectoras de mineral, estocadas de carguío o brazos. Consisten en excavaciones las cuales conectan el nivel de producción con el nivel de hundimiento, lo cual ayuda la extracción de mineral.
- Piques de traspaso: son labores en orientación vertical o con cierto grado de pendiente los cuales conectan el nivel de producción con el nivel de transporte.
- Nivel de transporte: son el conjunto de galerías paralelas con un espaciamiento entre los 60 a 120 metros donde llega el mineral desde el nivel de producción. Aquí también se encuentran buzones que funcionan como mecanismo de carga a un sistema de transporte determinado por la minera.
- Subnivel de ventilación: es el conjunto de galerías paralelas con un espaciamiento entre los 60 a 120 metros y otro grupo ubicados en la cabecera, estos se ubican bajo el nivel de producción entre los 15 a 30 metros. También se usan chimeneas para ventilar (inyectar y extraer aire) el nivel de producción.
- Subnivel de control: también llamado de reducción, este sector no es completamente necesario, ya que va a depender de la geometría del cuerpo mineralizado y de las características que posea la roca presente en este cuerpo (Universidad Politécnica de Madrid, 2019).

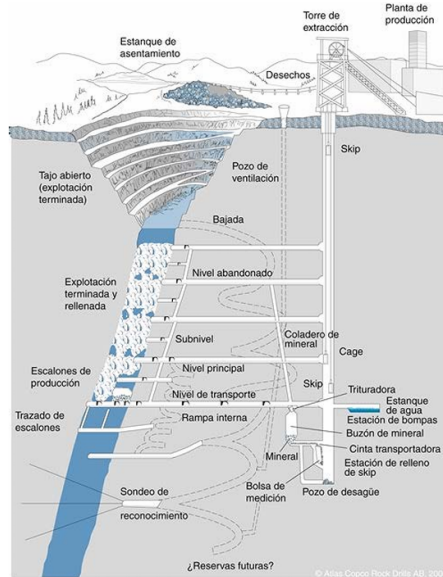


Ilustración 2: Niveles y sectores minería subterránea. (Universidad Politécnica de Madrid, 2019).

3.2.2 Puntos de extracción

Los puntos de extracción son por donde se extrae el cuerpo mineralizado hundido o fractura que a su vez cae por efecto de la fuerza de gravedad, es decir, son las unidades de producción de una mina subterránea (Cavieres F. , 2013). Este a su vez al caer por las bateas al nivel de producción es recogido mediante equipos LHD y posteriormente transportado hacia depósitos donde seguirá siendo transportado para ser parte de diferentes procesos de refinamiento.

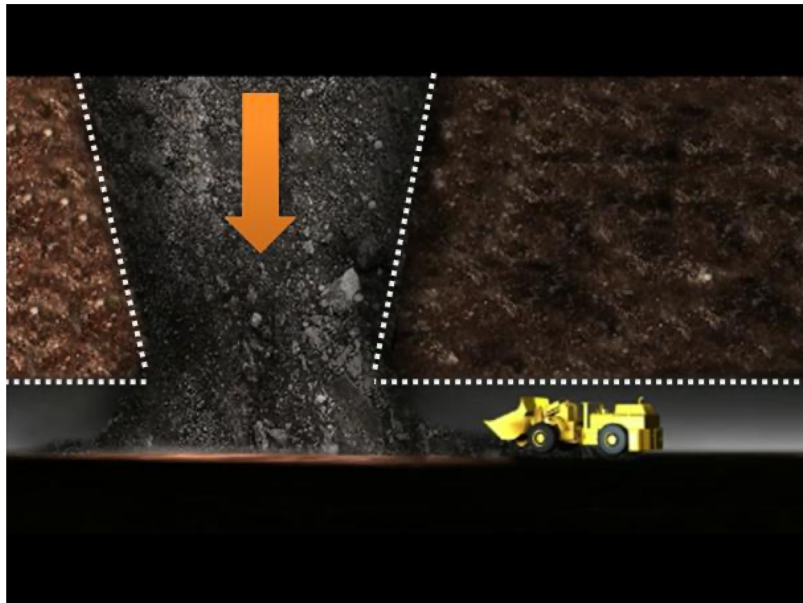


Ilustración 3: LHD recogiendo el mineral hundido por un punto de extracción. (Cavieres F. , 2013).

A su vez un punto de extracción considera una columna de mineral constituida por bloques apilados verticalmente, de la misma forma, se tiene que los bloques más cercanos al nivel de producción serán los primeros en extraerse y así sucesivamente.

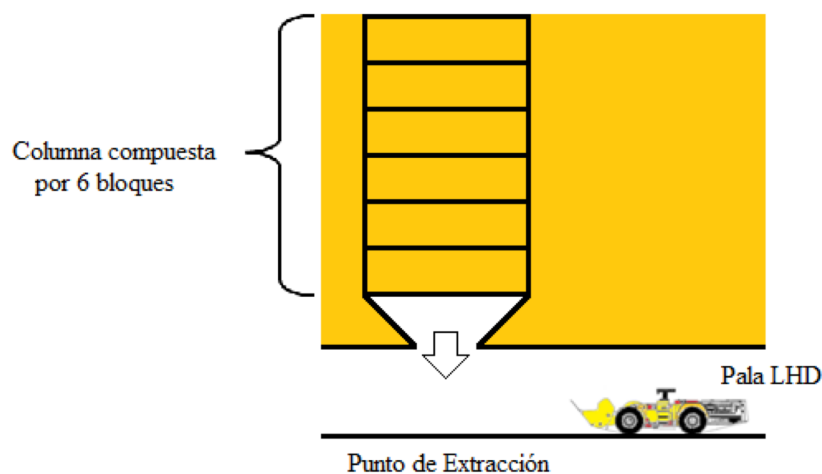


Ilustración 4: diseño esquemático de un punto de extracción con sus respectivos bloques de minerales que lo componen. (Cavieres F. , 2013).

El método de explotación y las características de los bloques de cada sector en que se divida el cuerpo mineralizado permitirán determinar el diseño de la malla de puntos de extracción los cuales permitirán cumplir de la mejor forma los objetivos planteados ya sea obtener una mayor eficiencia de recuperación del mineral, estabilidad de la mina, la máxima eficiencia en operación de los equipos encargados de la extracción del mineral y por último realizar un estudio comparativo de los tipos de mallas de extracción que se podrían aplicar en este caso al método de Block Caving, cabe señalar que este estudio tiene que estar aplicado específicamente en la roca primaria (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019). Para esto se tienen diversos modelos de mallas de puntos de extracción dentro de los conocidos se tienen:

- Malla Cuadrada: utiliza como base de diseño una configuración cuadrangular de elipsoides de extracción, es utilizada en el Block Caving (roca secundaria).
- Malla tipo teniente: utiliza como base de diseño una configuración triangular de elipsoides de extracción, es utilizada en el Panel Caving. Este tipo de malla ha entregado muy buenos resultados conllevando a ser utilizada en todos los sectores de la Mina El Teniente.
- Malla tipo Henderson: utiliza como base de diseño una configuración mixta de elipsoides de extracción, también es utilizada en el Panel Caving y es una alternativa a la malla tipo teniente.

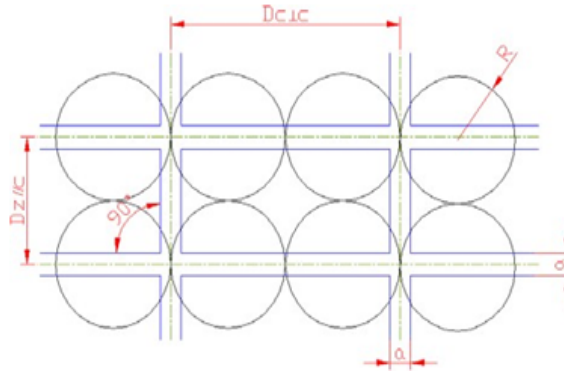


Ilustración 5: Malla tipo cuadrada. (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).

En donde:

R : Radio del Elipsoide de Extracción.

D_{C1C} : Distancia entre Calles de Producción.

D_{Z1C} : Distancia entre Galerías Zanjías.

a : Ancho de Calles de Producción y de Galerías Zanjías.

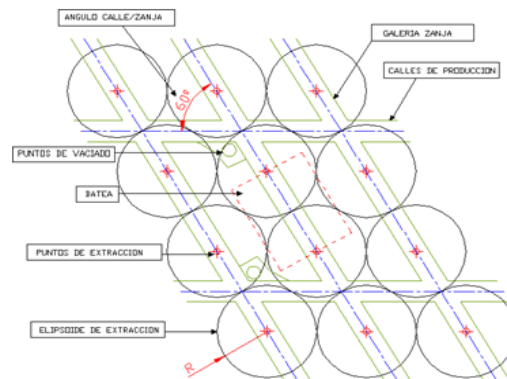


Ilustración 6: Malla tipo Teniente. (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).

En donde:

R : Radio del Elipsoide de Extracción.

D_{C1C} : Distancia entre Calles de Producción, medida perpendicularmente entre calles.

D_{Z1C} : Distancia entre Zanjías, medida paralelamente a las calles.

D_{Z1Z} : Distancia entre Zanjías, medida perpendicularmente entre Zanjías.

a : Ancho de las Calles de Producción y de las Galerías Zanjías.

Por otro lado, en este tipo de malla se tiene que las secciones de las galerías zanjías pueden ser diferentes en las secciones de las calles de producción.

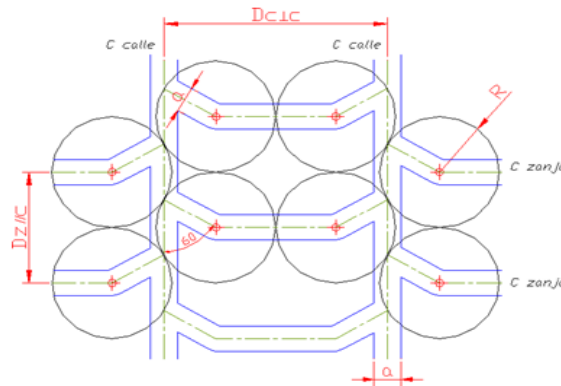


Ilustración 7: Malla tipo Henderson. (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).

En donde: R: Radio del Elipsoide de Extracción.

D_{C1C} : Distancia entre Calles de Producción.

D_{Z1C} : Distancia entre Zanjas.

a: Ancho de las Galerías.

Finalmente se tiene que a través de diversos estudios de casos y realizando su correspondiente comparación de las ventajas y desventajas que otorga cada malla de extracción se tiene que la malla tipo Teniente otorga mayores beneficios utilizando el Block Caving como método de extracción en la minería subterránea, esto se debe a que esta malla dado la experiencia que se tiene con los años en que ha sido utilizada a otorgado un gran grado de mecanización en la utilización del equipo LHD, esto también es debido a la geometría que presenta este tipo de malla, también otorga a la mina un mayor factor de seguridad y probabilidad de falla y de la misma forma ofrece una mayor ventilación de las galerías.

Del mismo modo se han realizado pruebas donde se han comparado diversas configuraciones con las mallas anteriormente descritas donde los criterios geométricos de comparación fueron los siguientes:

- Densidad (A_h): es el área de influencia promedio de los puntos de los elipsoides.
- Angulo entre ejes (α): es el ángulo formado entre los ejes de filas horizontales y los elipsoides de una misma fila.
- Área de diseño (A_d): es el área que encierran los círculos de los elipsoides de extracción menos $\frac{1}{2}$ del área compartida entre ellos.
- Sustentación (% interacción): índice que mide el porcentaje de área que encierran los elipsoides de extracción (A_d) sobre el área que abarcan la malla (A_h).
- Anisotropía: relación existente entre el máximo y mínimo radio de influencia de un punto de extracción.
- Distorsión: relación existente entre la máxima y mínima distancia entre puntos de extracción contiguos.

Dentro de las configuraciones de mallas que se estudiaron se tienen las siguientes (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019):

- Cuadrangular tangente (1)
- Cuadrangular tangente y traslapada (2)
- Triangular tangente (3)
- Triangular tangente y separada (4)
- Triangular traslape parcial (5)
- Triangular traslape total (6)
- Mixta tangente (7)
-

A continuación, se tienen los detalles que presentó cada configuración con respecto a cada criterio geométrico estudiado.

Tabla 1: índices geométricos asociados a cada configuración (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).

Radio = 10 m		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	Ideal
Configuración		Cuadrangular		Triangular			Mixta		
Variante		Tang	Tras	Sep	Tang	Tras Parcial	Tras Total	Mixta Tang	
Índices Geométricos	Densidad [m²]	400.0	346.4	400.0	346.4	300.0	259.8	373.2	340
	Angulo	90º	90º	63.5º	60º	63.5º	60º	60º	60º
	Area Diseño [m²]	314.2	296.0	314.2	314.2	292.4	259.8	314.2	---
	Sustentación	78.5%	85.5%	78.5%	90.7%	97.5%	100%	86.2%	100%
	Distancia Dn [m]	14.1	13.2	12.5	11.5	10.80	10.0	12.20	---
	Anisotropía	1.41	1.32	1.25	1.15	1.25	1.15	1.22	1.15
	Distorsión	1.00	1.15	1.12	1.00	1.12	1.00	1.00	1.00

Donde las configuraciones que obtuvieron los mayores puntajes de acuerdo con los criterios geométricos establecidos fueron los siguientes:

- Configuración triangular tangente: tiene un ángulo entre ejes de 60°, donde los elipsoides están en su totalidad tangentes, por otro lado, la sustentación llega al 90.7° (valor muy aceptable).

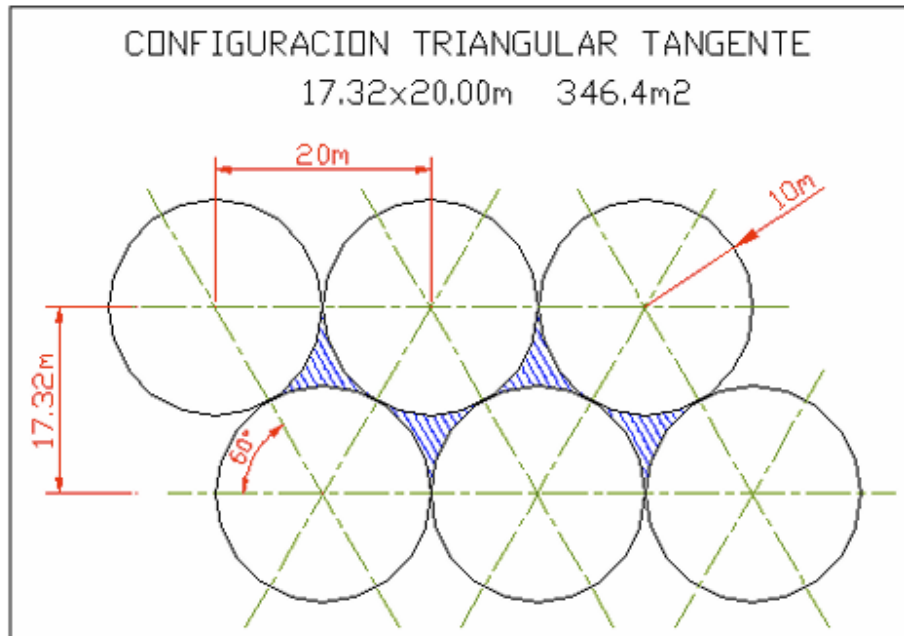


Ilustración 8: configuración triangular tangente (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).

- Configuración triangular traslapada total: tiene un ángulo de 60°, los elipsoides se encuentran totalmente traslapados, esto para eliminar el área intacta, la sustentación es del 100° (interacción).

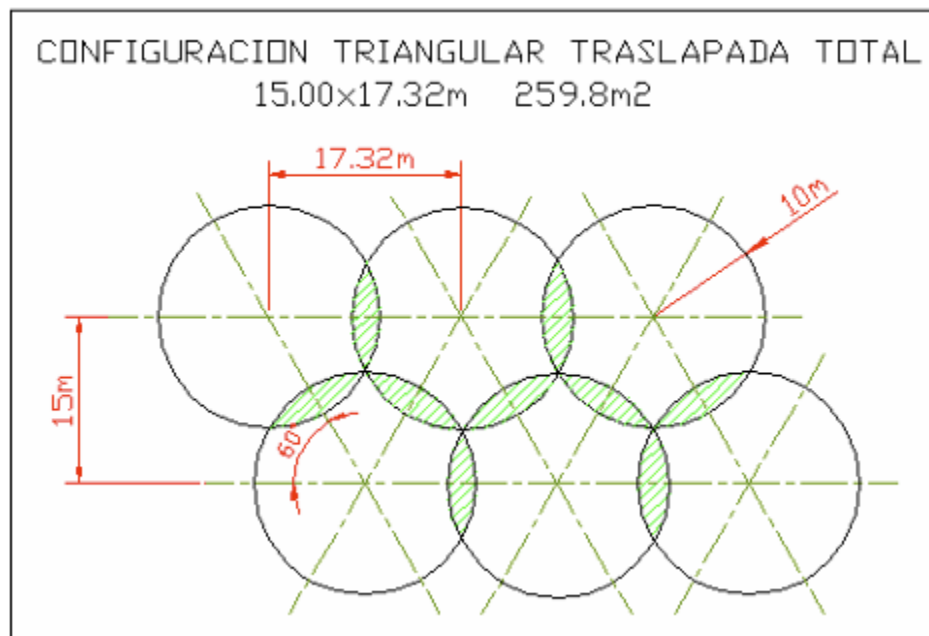


Ilustración 9: configuración triangular traslapada total (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).

- Configuración mixta tangente: presenta ángulos entre los ejes de 60° , dicho ángulo tiene una mayor importancia con respecto al ángulo de 90° , ya que en este caso el ángulo de intersección que se produce entre calle y zanja es de 60° y finalmente se tiene una sustentación del 86.2° .

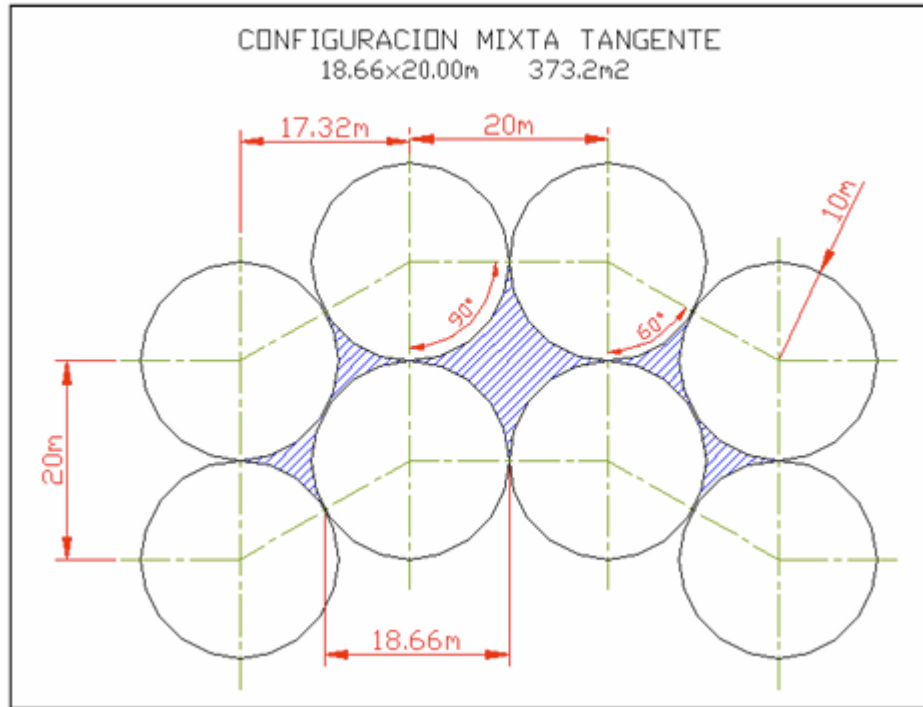


Ilustración 10: configuración mixta tangente (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).

De lo anterior se concluyó que el área intacta entre los elipsoides en la configuración triangular tangente fue de un 9.3% , mientras que la traslapada total fue de un 0% y en la mixta tangente fue de un 13.8% , por otro lado, la densidad de área fue de un 346.4 , 259.8 y 373.2 m^2 respectivamente. Ahora bien, considerando la teoría de Laubscher, los elipsoides de extracción interactúan con separaciones entre sus centros de hasta 1.5 veces el valor de su diámetro, lo que indica que se puede utilizar cualquiera de estas configuraciones para el diseño de las mallas de extracción.

3.2.3 Distribución geométrica de los elipsoides de extracción

Para esto se debe de conocer la metodología para determinar el radio del elipsoide de extracción, una vez ya determinado lo anterior, se puede definir la distribución geométrica de elipsoides, el cual es un arreglo espacial en el cual se ubicarán los elipsoides en el diseño minero del nivel de producción y donde dicho arreglo definirá la malla de extracción.

Es por esto por lo que en este trabajo experimental que se llevará a cabo se analizará a través de observaciones experimental el comportamiento del elipsoide de extracción que se genera en cada punto de extracción, variando de esta forma su ubicación a la altura o cota del nivel de producción.

3.3 Medio granular

Un medio granular se le denomina al conjunto de partículas de tamaño macroscópicas suaves y duras con un tamaño mayor a $100\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro las cuales interactúan entre sí (Andreotti, 2013).

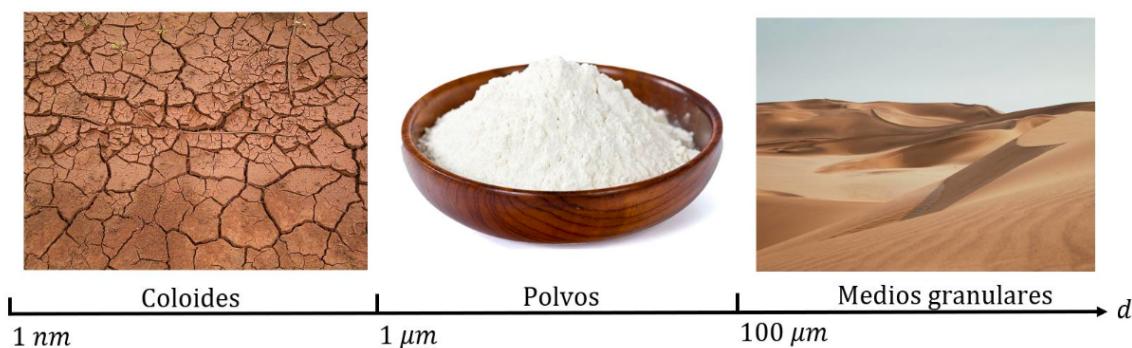


Ilustración 11: Clasificación del material granulado respecto al tamaño de partícula con su respectivo ejemplo (Andreotti, 2013).

En el área de la minería el medio granular abarca un tema muy importante de estudio, ya que está presente en el área de la extracción, transporte, almacenamiento y del procesamiento del mineral que se extrae. Si bien se han realizado varios estudios sobre el comportamiento frente a diversas situaciones que se pueden presentar en la minería, este tema aún es muy complejo de comprender y más aun llevándolo al área de la ingeniería.

Algunas de las dificultades que se presentan al momento de estudiar y comprender el comportamiento de los medios granulares son:

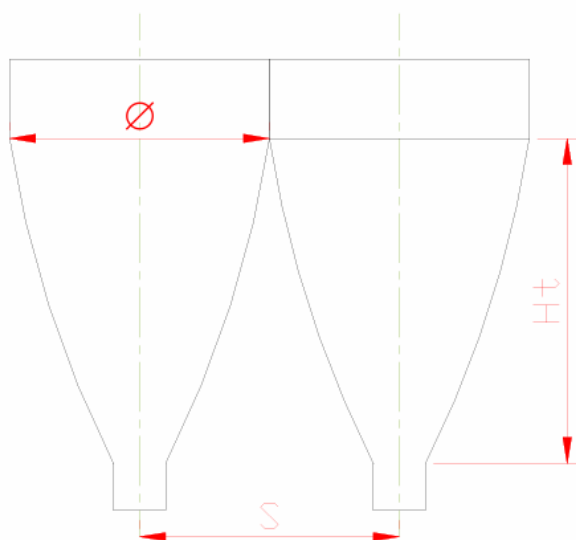
- Los medios granulares se pueden presentar en diferentes estados de la materia, ya que este se puede comportar como un material sólido, líquido o gaseoso.
- Los medios granulares dado el tamaño en que se pueden presentar están compuestos por una gran cantidad de partículas por lo que se hace muy difícil describir un comportamiento de forma continua de cada partícula que compone el medio granular.
- Los medios granulares disipan de forma fácil la energía.
- La interacción entre partículas es compleja.
- La falta de una clara separación de escalas (microscópica y macroscópica), es decir, la separación entre la partícula el tamaño del flujo.
- Las fluctuaciones térmicas son insignificantes, por tanto, los medios granulares son sistemas atérmicos.

De esta forma, el comportamiento de los medios granulares puede ser explicado definiendo ciertas relaciones físicas por las que se rigen. Caracterizar el comportamiento de estos medios es un tema super importante en el mundo de la minería y especialmente a la minería subterránea para el proceso de hundimiento y posterior extracción del cuerpo mineralizado (Sturla, Vivanco, & Palma, 2022).

3.4 Flujo gravitacional

El flujo gravitacional de partículas se define como: “El flujo de material fragmentado no cohesivo a través de un punto de extracción afectado por la fuerza de gravedad” (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019). Este se caracteriza por el movimiento de partículas dentro de un elongado elipsoide de revolución. El flujo gravitacional de partículas describe un movimiento donde además del desplazamiento vertical hay una rotación (movimiento secundario).

ESQUEMA ELIPSOIDE DE EXTRACCION



S: Distancia entre Puntos de Extracción

Ht: Altura de Interacción

Ø: Diámetro Elipsoide de Extracción

Ilustración 12: Modelo del elipsoide de extracción (Cavieres, Contreras, & Arce, 2019).

Hasta la actualidad y como lo es también el objetivo de este trabajo, se han realizado diversos estudios para comprender de alguna forma bajo cierto parámetros el comportamiento de las elipsoides de extracción que se forma en la minería subterránea dado la gran cantidad de puntos de extracción que existen en un yacimiento producto del interés de extraer un cuerpo mineralizado, dado la gran complejidad que involucra describir el comportamiento de un medio granular es que se han realizado muchos estudios y con ello teorías sobre el flujo gravitacional abocado al área de la minería.

4 TEORÍAS SOBRE FLUJO GRAVITACIONAL

El flujo gravitacional de material granular se describe como el movimiento vertical de las partículas gobernado por la fuerza de gravedad y las interacciones entre ellas (Castro R. , 2006). Este tema es muy importante en el mundo de la minería realizada por hundimiento de bloques, dado que el método se sustenta en el flujo gravitacional del mineral fragmentado hacia los puntos de extracción, con ello, el movimiento de las partículas tendrá un gran impacto sobre la eficiencia de recuperación y la posible dilución que se pueda registrar (Morales & Salvador, 2012).

A lo largo de los años se han realizado diversos estudios para entender y comprender los principales mecanismos asociados al flujo gravitacional y las implicancias en la minería por hundimiento de bloques. Es por esto por lo que a continuación se presenta una tabla con los principales estudios que se han realizado con respecto al flujo gravitacional.

Tabla 2: estudios sobre el flujo gravitacional en modelos físicos (Vergara, 2016).

Año	Autores	Materiales	Objetivos	Resultados
1916	G.Lheman	Mineral Chancado	Estudiar Recuperación Minera (Miami Copper mine)	Efectos del tamaño del punto de extracción sobre la recuperación
1946	McNicholas	Mineral Chancado	Estudiar Recuperación Minera (Climax Molybdenum mine)	Diferencias en el tamaño de los puntos de extracción dependiendo del tamaño de las partículas
1965	Kvapil	Arena	Proveer relaciones matemáticas respecto al flujo de materiales granulares en silos	Teoría de Elipsoides de Movimiento y extracción
1966	Janelid y Kvapil	Arena	Extender modelo de silos (Kvapil, 1966) a mina de hierro en Suecia explotada mediante el método de Sublevel Caving	Criterios de diseño para Sublevel Caving basados en la teoría de elipsoides
1972	Janelid	Mineral Chancado	Estudiar escalamiento desde modelo a escala mina	Resultados similares entre prototipo y modelo; diferencias asociadas a mayor movilidad y menor compactación en modelo
1984	Peters	Grava	Estudiar efecto; del tamaño de partícula en la forma de la zona de extracción	Ancho de la zona de extracción no depende del tamaño de partícula,
2001	Castro	Grava	Escalamiento de modelo físico para estudio de flujo gravitacional en minería por hundimiento	Las fuerzas preponderantes corresponden a la gravedad y la fricción. El movimiento de las partículas se limita a una elipsoide caracterizada por altura (H) y ancho (W)
2004	Power	Grava	Revisión de las escalas utilizadas en modelos físicos.	Resultados similares entre escala mina y modelo a la escala (1:30), destaca diferencia entre modelos 2Dy 3D (Rebate resultados de Peters)
2004	Susaeta	Arena	Estudio velocidad flujo gravitacional para tiraje aislado, tiraje interactivo.	Índice de Uniformidad (IU). A mayor uniformidad del tiraje, más tardía será la entrada de dilución
2006	Castro	Grava	Estudio flujo gravitacional en modelo 3D a gran escala	La masa extraída y la altura de extracción tienen gran influencia sobre la zona de extracción aislada.

Cabe señalar que estos estudios se realizaron a través de modelamiento físico a distintas escalas, modelamiento numérico y a base de experiencias a escala mina.

A continuación, y con respecto a lo anteriormente descrito, se detallarán y se explicarán algunos de los estudios que han trascendido en el mundo de la minería dado la importancia que conllevó el estudio y análisis realizado. Estos estudios han sido muy importantes dentro del mundo de la minería dado que los modelos físicos permiten de alguna manera representar a través de una escala de tamaño los distintos fenómenos y estudiar los principios físicos que los rigen. Así, los modelos pueden representar similitudes con el fenómeno a estudiar, entre ellas se encuentran: la similitud geométrica, cinemática y dinámica, las cuales buscan reproducir la geometría, velocidades y fuerzas escaladas en relación al modelo configurado (Langhaar, 1980).

4.1.1 Modelo de Janelid y Kvapil

En 1965 Rudolf Kvapil y Janelid se unieron en la división de Minería del Real Instituto de Tecnología (KTH) para empezar a utilizar los principios del flujo por gravedad adquiridos en el estudio de contenedores y silos al hundimiento de subniveles, dicho estudio lo realizó Kvapil en el año 1950 en KTH, donde para obtener los primeros principios del flujo por gravedad estudió diversos modelos físicos de descargar de mineral, donde lo realizó con modelos a base de escalas, de la misma forma probó diversos modelos y en base a estos y las observaciones in situ determinó ciertos principios, ya que en aquel año no se tenía ningún principio del flujo por gravedad en material parecido a roca rota.

Junto con Janelid ocuparon los principios determinados por un modelo de estudio de contenedores y silos enfocándose las observaciones en la columna que se forma en los puntos de extracción como se puede ver en la siguiente ilustración.

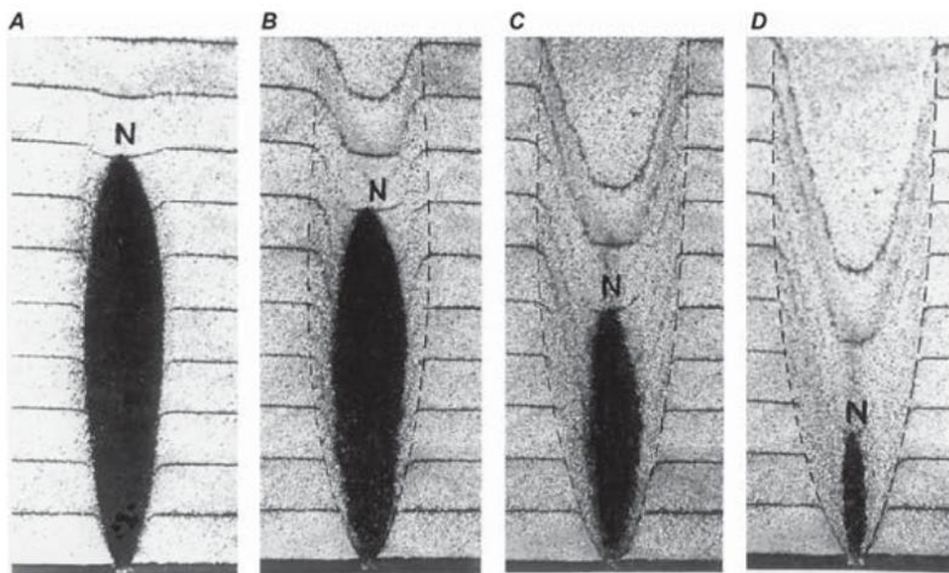


Ilustración 13: Modelo de arena con la elipse de descarga dibujada (Kvapil R. , La mecánica y el diseño de sistemas de hundimiento de subniveles, 1982).

Como se puede observar en la ilustración 13, este fue uno de los estudios realizados y se puede observar que a medida que se realiza la extracción de mineral, el elipsoide de extracción en negro va desapareciendo a medida que se va extrayendo mineral y con ello se va formando una nueva elipsoide que se le denomina elipsoide de aflojamiento, esto se puede visualizar en la ilustración B, C y D con líneas segmentadas.

Utilizando aquellas observaciones y utilizándolas como base, Kvapil en el año 1992 llevó aquel estudio a un modelo del diseño de una mina explotada a través del método de hundimiento con diferentes subniveles. Para este estudio en particular el espaciamiento entre subniveles fue de 12.5 [m], la dimensión de la deriva o punto de extracción fue de 5 x 3.5 [m], la separación entre subniveles de 12 [m] y la carga fue de 2 [m].

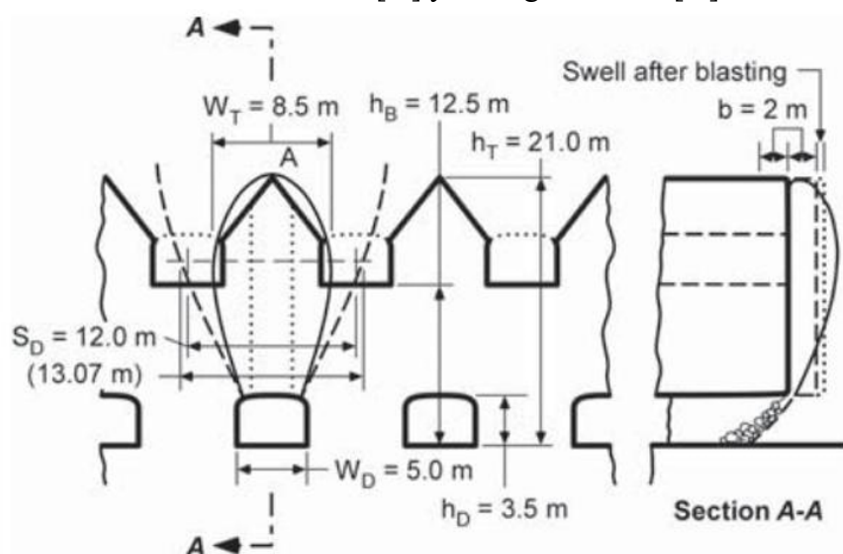


Ilustración 14: Aplicación de los principios de flujo por gravedad (Kvapil R. , Espeleología de subniveles. Manual de ingeniería para PYME, 1992).

La escala de la espeleología subnivel ha ido cambiando de manera notoria, a continuación, se presenta una comparación de las geometrías mineras de hundimiento de subnivel apropiadas para los años 1963, 1983 y 2003 en la mina Kiruna, en la cual se realizaron los primeros estudios del flujo por gravedad de un material no líquido (Kvapil R. , Espeleología de subniveles: pasado y futuro, 2008; Kvapil R. , Sublevel Caving, 1992).

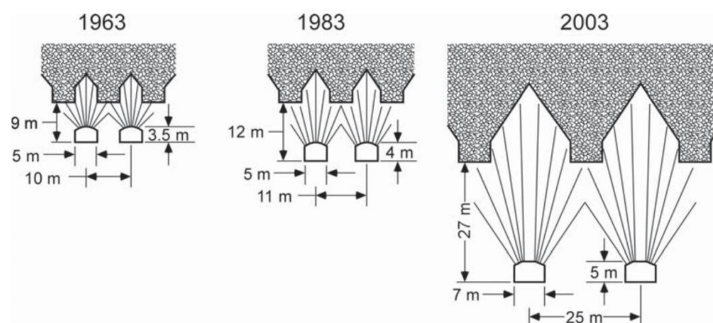


Ilustración 15: Geometría del derrumbe del subnivel en la mina Kiruna (Marklund & Hustrulid, W., 1995).

Kvapail construyó este modelo con arena blanca y negra, de esta forma se visualizó la elipsoide de extracción que se formaba a medida que se iba extrayendo mineral (arena). Una vez observado lo que pasaba al momento de hacer la extracción propiamente tal, postuló la existencia de dos regiones que experimentan flujo, donde la primera región se denomina elipsoide de extracción, la cual corresponde al volumen definido por la ubicación original del material extraído desde el punto de extracción, por otro lado, se tiene la segunda región que se denomina elipsoide de movimiento al volumen que determina el límite entre el material estacionario (sin movimiento) y el material que se ha movido desde su posición original. De la misma forma Kvapil en el año 1992 establece las relaciones geométricas entre ambas elipsoides, estableciendo que la relación de altura entre las elipsoides extracción y de movimiento es 1:2.5 y la de volumen es de 1:15.

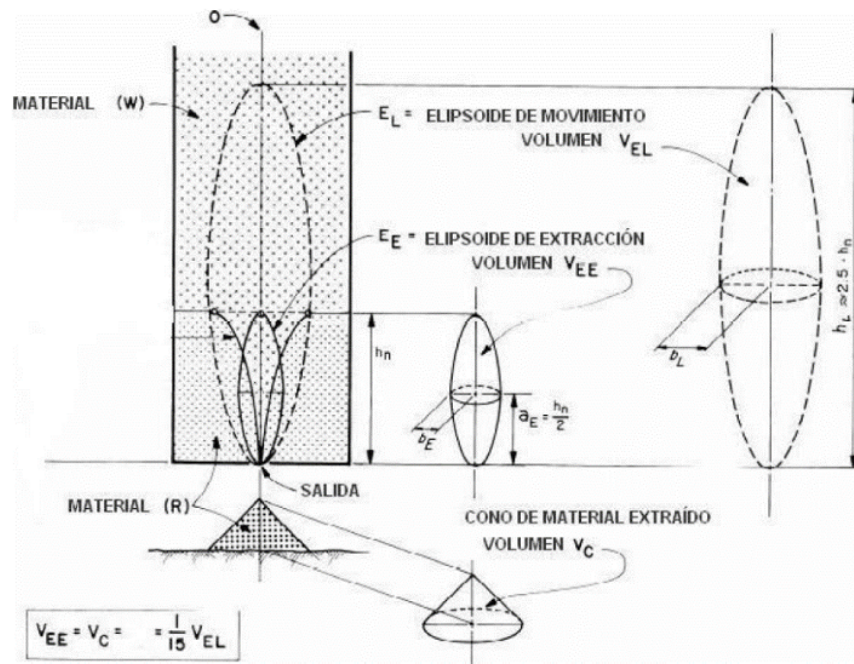


Ilustración 16: Representación esquemática del elipsoide de extracción y de movimiento para una extracción aislada (Kvapil R. , Sublevel Caving, 1992).

Esta teoría elipsoidal de Kvapil, desde aquel entonces, ha sido ampliamente aceptada como guía de diseño en minas de sublevel caving, sin embargo, algunos autores posteriores encontraron que esta teoría no modela el flujo con precisión como lo son los estudios realizados por McCormick en 1968, Morano en 1980, Heslop & Laubscher en 1981, Heslop en 1983 y Laubscher en 1994 y 2000. Kvapil después de los años 1980's tras múltiples estudios con tolva, sostuvo que, para asegurar una correcta actividad de las aberturas, la distancia entre las tolvas debe de ser menor o igual al ancho del elipsoide de movimiento, de esta forma, la formación de zonas pasivas entre las aberturas se limita al mínimo.

4.1.2 Modelo de Castro

En cuanto a modelamientos físicos de gravas se tienen que estos son más representativos de la realidad, es por esto que Castro en el año 2006 realizó un modelamiento físico a gran escala en tres dimensiones, esto con el objetivo de estudiar el flujo gravitacional de material y de esta forma concluir sobre los mecanismos de flujo que rigen en la minería como tal (Castro, 2006). Castro utilizó grava para simular material fragmentado llevando a concluir las siguientes conclusiones más relevantes de su estudio:

- Los factores principales que afectan la geometría de la zona de extracción aislada (ZEA) y la zona de movimiento aislada (IMZ) corresponden a la extracción de mineral y la altura de extracción.
- Las velocidades de flujo indican que para diferente tamaño la velocidad es diferente, de esta forma, las partículas más finas tienen a viajar más rápido que los fragmentos más grandes dentro del flujo granular. Así, entre más pequeño sea el fragmento de partícula, mayor será la velocidad y viceversa.
- La altura a la cual el flujo de masa se presenta, las zonas de extracción de puntos de extracción adyacentes se traslapan
- La altura a la cual el flujo de masa comienza (altura de interacción) depende del espaciamiento de los puntos de extracción.

4.1.3 Modelo de Laubscher

En cuanto al modelamiento de flujo gravitacional, Laubscher planteó un modelo empírico, el cual permite conocer el ancho de la zona de movimiento y la altura de interacción en función del espaciamiento. Para determinar el ancho del elipsoide de movimiento, se requiere en primera instancia conocer distintas propiedades del material, entre las cuales se encuentra la clase del macizo rocoso, las fracturas por metro y el rango de tamaños. Una vez obtenida toda la información la información anteriormente mencionada y del ancho del punto de extracción se puede escoger un diámetro de elipsoide presentado en la siguiente ilustración.

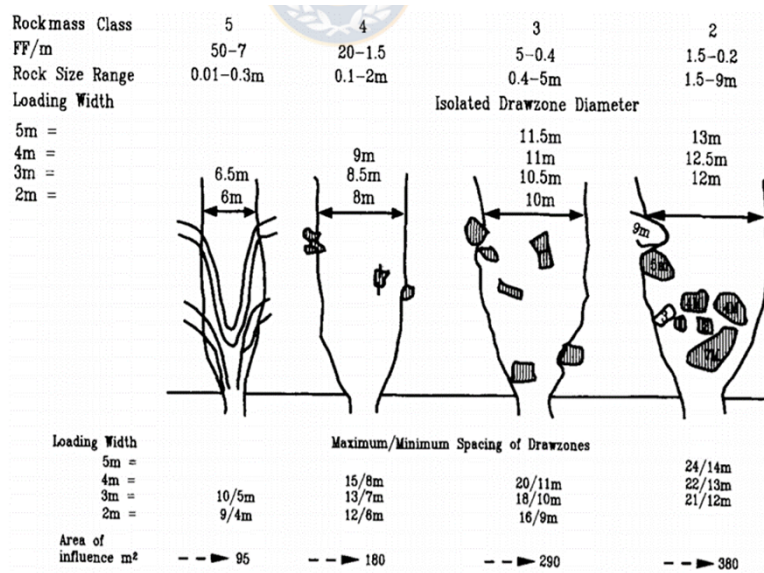


Ilustración 17: ancho de elipsoide Laubscher (Pereira, 2020).

Por otro lado, para determinar la altura de interacción HIZ, se utiliza el grafico presentado a continuación, donde se considera como parámetro de entrada el índice de calidad de macizo rocoso, a través de los parámetros RMR, junto con el espaciamiento entre las galerías de extracción.

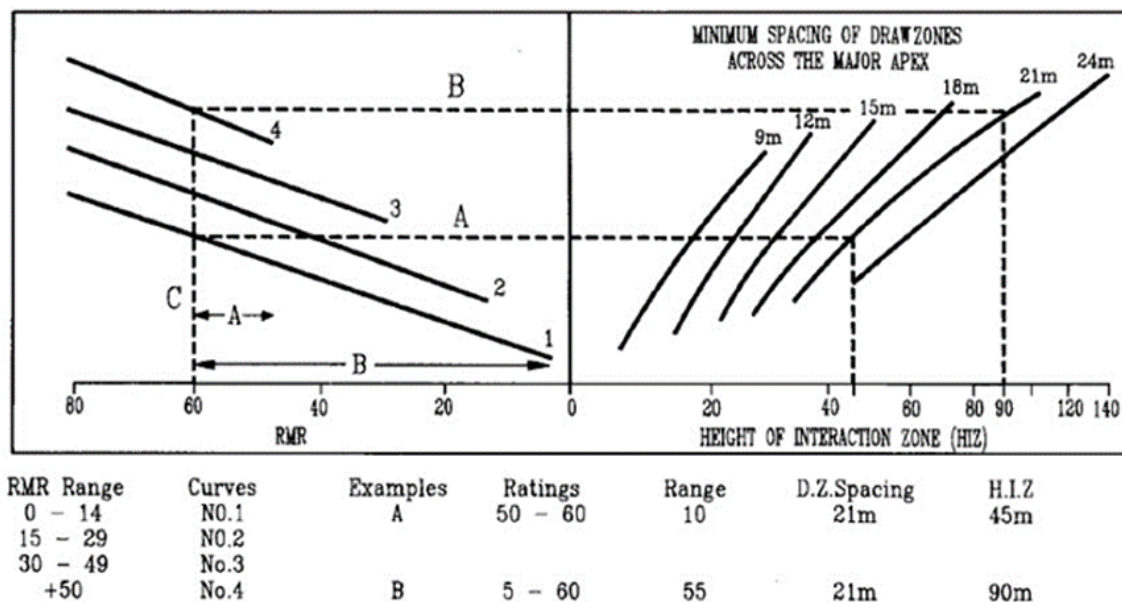


Ilustración 18: altura de interacción (Pereira, 2020).

Dado el estudio anterior Laubscher postula 3 posibles mecanismos de flujo gravitacional de material fragmentado, que se visualizan en la siguiente ilustración.

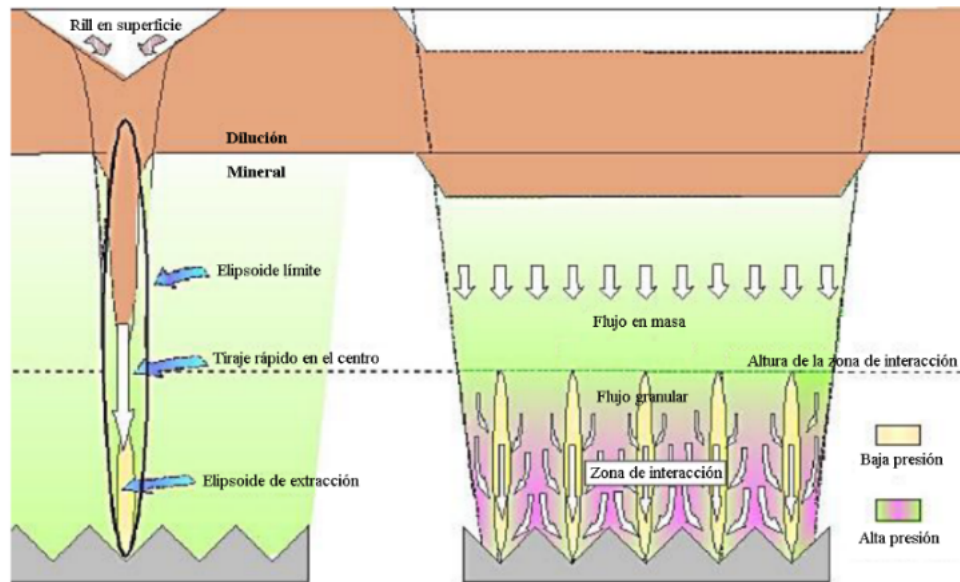


Ilustración 19: flujo gravitacional de Laubscher (Laubscher, 2000).

En este postulado Laubscher dice que si el material fragmentado se compone por fragmentos de forma redondeada y distribución granulométrica homogénea, el comportamiento del flujo gravitacional es semejante al modelo del flujo granular, por otro lado, si el material presenta un amplio rango de tamaño con alta proporción de grandes fragmentos y elevada angulosidad, el comportamiento del flujo gravitacional estará determinado por el mecanismo de difusión de vacío, donde dicho mecanismo se asocia a las etapas tempranas del hundimiento, en las cuales no se desarrolla la teoría elipsoidal del flujo, esto dado a la presencia de material esencialmente grueso y angular. En cambio, se presentará un patrón irregular de flujo gravitacional, caracterizado por la formación de chimeneas de flujo a lo largo de la columna. Esta difusión es producida por la variación de tamaño de roca y la angulosidad que exhiben los fragmentos. De esta forma, los vacíos pueden ser llenados con material más finos proveniente de zonas superiores o desde los costados, este concepto fue postulado por Jolley en 1968. Por otra parte, Laubscher postula que la difusión de vacío actúa de forma similar en Block y Panel Caving, identificando 2 tipos de difusión diferentes dados si es para tiraje aislado o tiraje interactivo (Laubscher, 2000).

- Difusión de vacío en tiraje aislado: La interacción de vacíos sobre el punto de extracción induce una zona de baja densidad, ayudando de esta forma el flujo preferencial de material fino superior y la entrada de dilución de forma anticipada.

- Difusión de vacío en tiraje interactivo: La existencia de más de un punto de extracción activo induce un traslape entre los vacíos, produciendo de esta forma una mezcla vertical y horizontal de material fragmentado, es de esta forma que el flujo vertical de masa resulta favorecido y se retrasa la entrada de material estéril.

A continuación, se puede observar lo anteriormente descrito con respecto a los tipos de difusión que se pueden presentar según Laubscher.

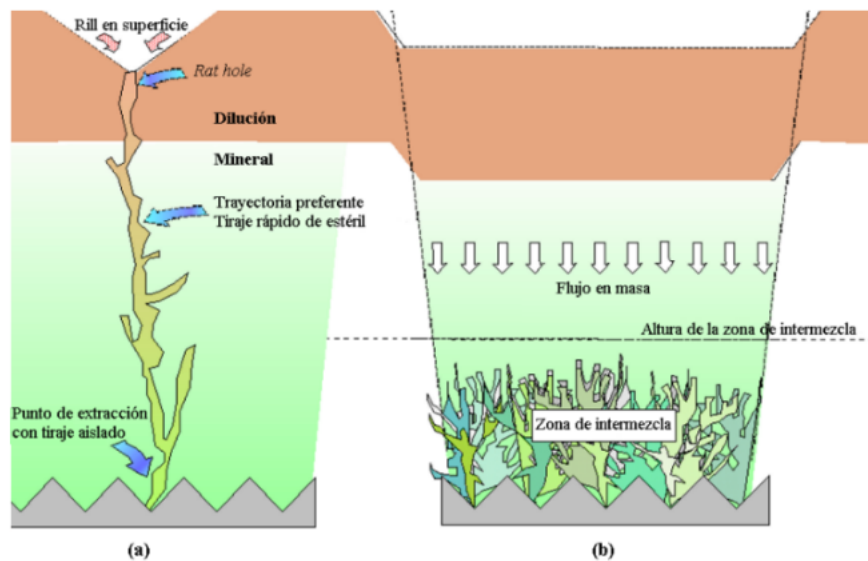


Ilustración 20: Mecanismo de difusión de vacío. Difusión de vacío en tiraje aislado (a). Difusión de vacío en tiraje interactivo (b) (Laubscher, 2000).

4.1.4 Modelo de Susaeta

El modelo de flujo propuesto por Susaeta está formado por una serie de experimentos físicos de arena, en los cuales se presentan análisis conceptual y black-análisis de minas pertenecientes a Codelco-Chile. En esta propuesta Susaeta observa que pueden presentarse dos tipos de velocidades. Donde la primera velocidad corresponde a la que está presente en el material contenido por el elipsoide de flujo aislado (velocidad de tiraje aislado) y la segunda velocidad está presente en las partículas que se traslada fuera del elipsoide de flujo aislado, a la cual se le denomina velocidad de tiraje interactivo (Susaeta, 2004).

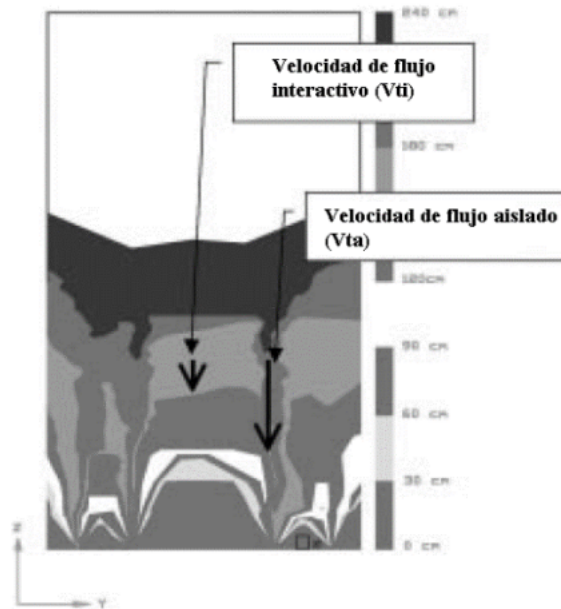


Ilustración 21: Comportamiento aislado-interactivo (Susaeta, 2004).

Es de esta forma que Susaeta plantea que el fenómeno del flujo gravitacional es influenciado por la presencia de la superposición de dos estados que generan el movimiento del material, donde los dos mecanismos que están presentes en este modelo son:

- Punto de extracción abierto: El comportamiento del flujo gravitacional está determinado por el movimiento real del material hundido cuando el equipo (LHD podría corresponder) carga el material. Con respecto a la propagación, la región más cercana a la zona de extracción aislada en la parte baja de la columna es afectada generando un movimiento lateral hacia la zona de extracción, cuando la distancia entre los puntos de extracción es menor a 1.5 veces el diámetro del flujo aislado, a lo que se le denomina tiraje aislado-interactivo.
- Punto de extracción cerrado: La densidad en este caso sobre el punto de extracción es mucho menor que en el entorno inmediato, por lo que se genera una lenta igualación de densidades, similar al comportamiento de medios continuos (como fluidos). Es decir, se provoca un arreglo de material hacia un equilibrio estático litológico con movimiento vertical y lateral hacia sectores de menores densidades.

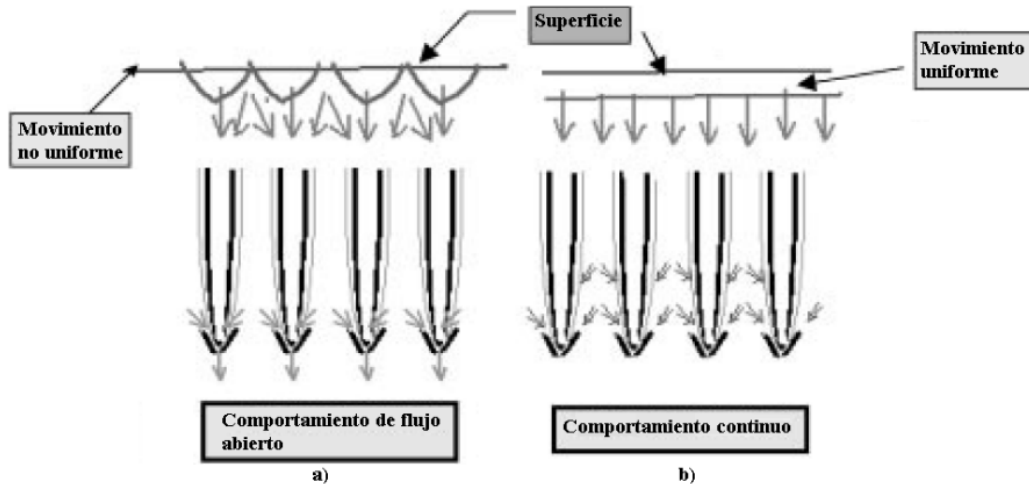


Ilustración 22: Comportamiento para un punto de extracción abierto (a). Comportamiento para un punto de extracción cerrado (b) (Susaeta, 2004).

4.1.5 Estudio sobre la humedad presente en el material granulado por V. Sánchez, R. Castro & S. Palma

El impacto de la humedad en las dimensiones de la Zona de Influencia del Excavador (IEZ) y la Zona de Influencia del Material (IMZ) ha sido poco explorado hasta ahora. (Sánchez, Castro, & Palma, 2019) introducen la humedad como una variable relevante en el estudio de materiales granulares. Para ello, desarrollaron un modelo físico empleando un sistema LHD para la extracción de material granular fino con niveles de humedad que varían entre 0% y 8%. Este estudio considera que un mayor contenido de humedad reduce la cantidad de masa extraída en cada evento. Los resultados indican que las dimensiones de la IEZ están influenciadas por tres factores: el contenido de humedad, el tamaño de las partículas y la masa acumulada extraída. Se ha observado que el tamaño de la IEZ varía en función de la humedad del material granular; específicamente, a medida que aumenta la humedad, la altura de la IEZ disminuye y su ancho aumenta. Esta relación puede visualizarse en la figura que se presenta a continuación.

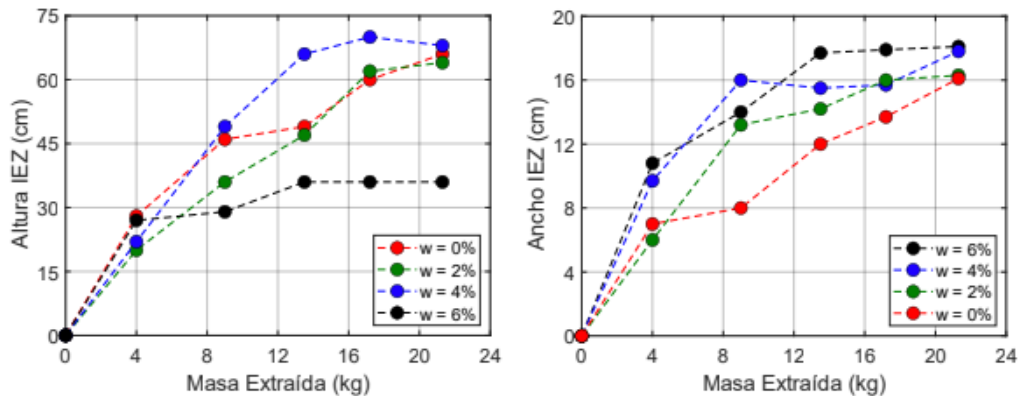


Ilustración 23: Altura y ancho del IEZ en función de la masa extraída para diferentes grados de humedad (w). (Sánchez, Castro, & Palma, 2019).

5 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como se señaló anteriormente en este trabajo experimental que se llevará a cabo se analizará de forma experimental y en base a observaciones experimentales el comportamiento del flujo gravitacional de material granulado del elipsoide de extracción que se genera a partir de los puntos de extracción.

5.1 Metodología

Para llevar a cabo el estudio del comportamiento de la columna de extracción utilizando uno y dos puntos de extracción en un modelo físico, se seguirá la siguiente metodología de trabajo.

5.1.1 Preparación del Modelo Físico

- ✓ Construcción del cajón simulador: Se utilizará un cajón armado de tableros terciados de 18 [mm] de espesor, a fin de poder soportar en su interior la gravilla, dicho cajón posee medidas a escala 1:100 para simular una batea. Sus dimensiones interiores serán de 105 x 70 x 106 [cm]. Las paredes laterales estarán forradas con lija de madera de grano 120 para representar la rugosidad de la roca circundante.
- ✓ Puntos de Extracción: En la parte inferior de las caras de 70 x 106 cm del cajón, se ubicarán dos puntos de extracción con aberturas de 4 x 3 cm cada una. Estos puntos serán donde se extraerá el material granulado (gravilla) para el estudio.
- ✓ Material Utilizado: La gravilla utilizada tendrá un tamaño nominal de 3/8" (9-12 mm de diámetro), lo cual simula el material que se extraería en un contexto minero real. Por otro lado, el material utilizado presenta un ángulo de talud natural de 43° (véase ilustración 25.B).
- ✓ Marcadores de Trayectoria: Se utilizarán granos de poroto pintados de colores como indicadores o marcadores que señalen su posición dentro del cajón con respecto a las tres dimensiones para cada situación. Cada grano estará marcado con un número, una letra minúscula y una letra mayúscula para indicar su posición tridimensional (x, y, z) dentro del cajón, dicho código se explicará más adelante de forma más detallada, por último, se tiene que cada vez que salga un marcador por el punto de extracción se parará la extracción para proceder al pesado de la masa que se tendrá hasta ese momento para posteriormente seguir con la extracción y así sucesivamente se realizara el procedimiento de cada escenario de extracción que se establezca para el estudio y análisis de este.

5.1.2 Procedimiento Experimental

En cuanto a la configuración de los casos de estudio, se realizarán dos configuraciones principales:

- ✓ Caso 1: Un Punto de Extracción: Se estudiará el comportamiento de la columna de extracción utilizando solo uno de los puntos de extracción.
- ✓ Caso 2 y otros: Dos Puntos de Extracción se analizará cómo varía la columna de extracción al utilizar ambos puntos, posteriormente, se irá variando la distancia entre ellos moviendo la placa movable y fijándola con tornillos en los lados laterales hasta que se produzca el efecto de la extracción negativa para obtener la mínima distancia de separación entre los dos puntos de extracción para que no ocurra dicho efecto en la extracción de material.
- ✓ Implementación del Experimento: Se introducirá la gravilla en el cajón a través de su parte posterior, en cuanto a los puntos de extracción designados estos se encontrarán cerrados hasta completar el llenado total del cajón con sus respectivos marcadores. Se registrarán las posiciones de los marcadores (granos de poroto) en intervalos de tiempo predefinidos para estudiar la trayectoria de la columna de extracción.
- ✓ Registro de Datos: Se tomarán datos precisos de las coordenadas (x, y, z) de cada marcador a medida que la gravilla se mueva dentro del cajón y permita la salida del marcador por dicho punto. Se documentarán visualmente los patrones de movimiento y la acumulación de gravilla en relación con los puntos de extracción.
- ✓ Análisis de Resultados: Se analizarán los datos recopilados para comparar cómo varía la dispersión y la trayectoria de la gravilla en los diferentes casos de estudio. Se evaluará la eficacia de utilizar uno o dos puntos de extracción en términos de la distribución y la eficiencia de la extracción de material granular.
- ✓ Conclusiones y Recomendaciones: Se extraerán conclusiones sobre la influencia de la configuración de los puntos de extracción en el proceso de extracción de gravilla. Se proporcionarán recomendaciones basadas en los resultados para optimizar el diseño y la operación de columnas de extracción en aplicaciones mineras.

La metodología en cada caso propuesto, conllevará la siguiente metodología de trabajo que se presenta en la ilustración presentada a continuación.

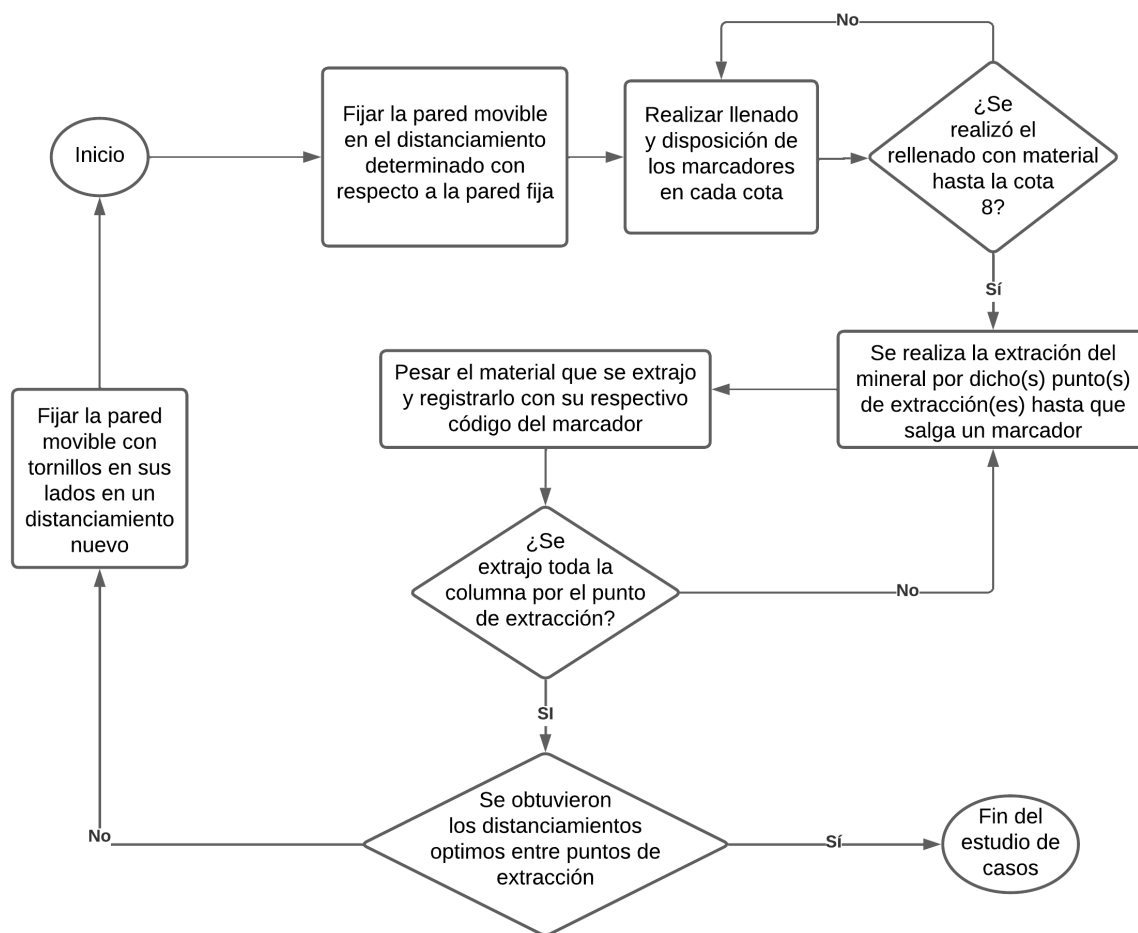


Ilustración 24: Esquema de trabajo para cada caso propuesto. Elaboración propia mediante Lucidchart.

Este enfoque metodológico asegura una comprensión detallada del comportamiento de la columna de extracción bajo condiciones controladas, utilizando marcadores adecuados para una observación precisa de la trayectoria y distribución del material granular dentro del modelo físico simulado.



Ilustración 25: A corresponde a marcadores 4aA (0,0,45) y 1aA (0,0,0), por otro lado la B corresponde al ángulo de talud natural. Elaboración propia.

Para este experimento en minería, se planea disponer marcadores a intervalos específicos tanto en el plano horizontal como en el vertical dentro de un cajón de estudio. En el plano x e y, los marcadores se colocarán cada 5 [cm], asegurando una densidad uniforme que permitirá un mapeo preciso de la superficie. Esto resultará en un total de 330 marcadores por cada eje, garantizando una cobertura exhaustiva de las áreas de interés.

En cuanto al eje z, se ha decidido disponer los marcadores cada 15 [cm] para asegurar una representación tridimensional precisa. Con ocho niveles de marcadores a lo largo del eje z dentro del cajón, se alcanzará una profundidad adecuada para capturar variaciones significativas en la estructura y composición del material estudiado. Esto sumará un total de 2 640 marcadores distribuidos de manera estratégica dentro del volumen del cajón.

Es crucial mencionar que la cantidad exacta de marcadores podría ajustarse según las distancias entre los puntos de extracción, lo cual es fundamental para adaptarse a las condiciones específicas del terreno. Esta disposición meticulosa de marcadores no solo facilitará la recopilación de datos detallados, sino que también permitirá análisis precisos y comparativos a lo largo del tiempo y en diferentes escenarios geológicos.

Además, para facilitar la interpretación de los datos recopilados, se ha desarrollado una tabla detallada que muestra las correspondencias entre las letras utilizadas como marcadores y sus valores numéricos asociados a cada coordenada. Esta tabla será una herramienta invaluable para correlacionar observaciones en el campo con datos analíticos posteriores, asegurando así resultados robustos y confiables en el estudio de la minería.

X	Y	Valor
a	A	0
b	B	5
c	C	10
d	D	15
e	E	20
f	F	25
g	G	30
h	H	35
i	I	40
j	J	45
k	K	50
l	L	55
m	M	60
n	N	65
o	O	70
-	P	75
-	Q	80
-	R	85
-	S	90
-	T	95
-	U	100
-	X	105

Tabla 3: letras y valores correspondiente a la coordenada X e Y. Elaboración propia.

Por otro lado, con respecto a la coordenada Z se utilizaron números que corresponden al número de cota correspondiente, a continuación, se presentan las cotas con sus valores correspondiente.

Cota (Z)	Valor
1	0
2	15
3	30
4	45
5	60
6	75
7	90
8	105

Tabla 4: cotas con sus valores correspondientes. Elaboración propia.

De esta forma, los marcadores llevarán un número y 2 letras consigo como se muestra a continuación en un ejemplo.

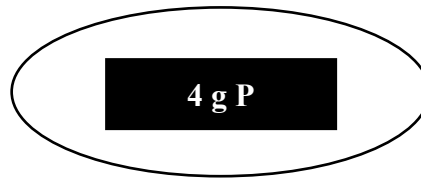


Ilustración 26: marcador correspondiente a la coordenada (30,75,45). Elaboración propia.

Para efectos de obtener resultados que no sean afectados por errores humanos que en este caso puede venir por situar mal un marcador dentro del cajón, se realizaron trazas de líneas verticales y horizontal para señalar las coordenadas X, Y, Z respectivamente dentro del cajón como se puede observar en la siguiente ilustración.



Ilustración 27: cajón con las trazas verticales y horizontales correspondientes. Elaboración propia.

Una vez realizado todos los pasos anteriores, se procede a la disposición de los marcadores en el cajón, partiendo por la cota n°1 correspondiente a $z=0$, luego se realiza el llenado con material hasta la siguiente cota para realizar el mismo procedimiento con los marcadores. Cabe señalar que se realiza un compacto del mineral y su posterior nivelación con regla niveladora manual para corroborar la correcta disposición de los marcadores en dicha cota. Los anteriores pasos se realizan sucesivamente hasta llegar a la última cota situada a una altura de 105 [cm].

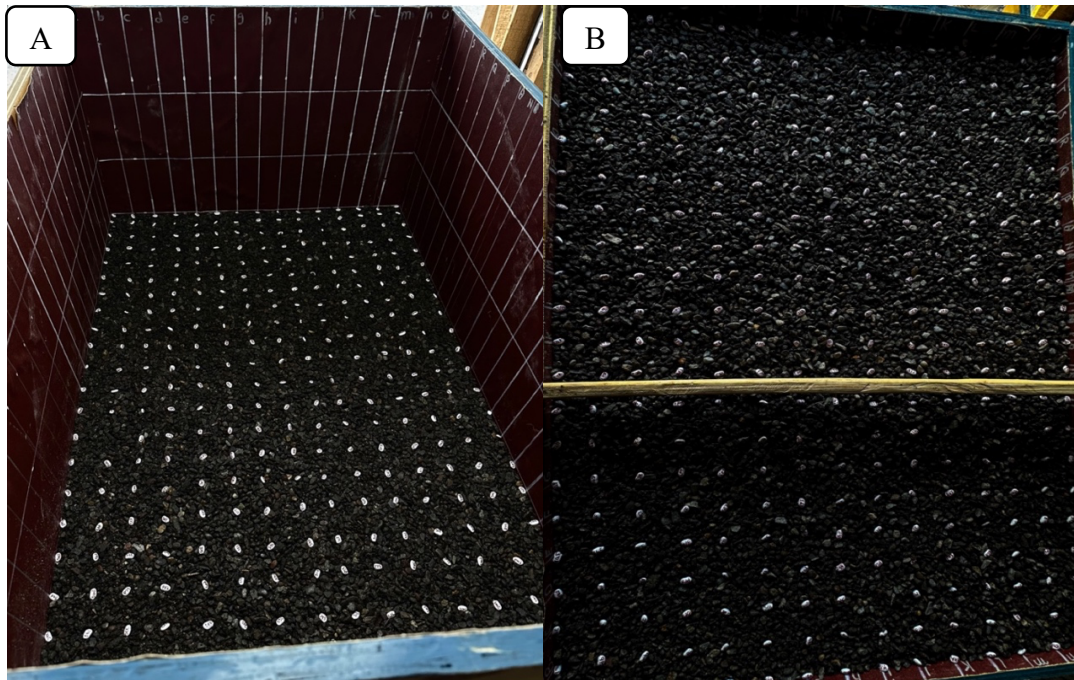


*Ilustración 28: figura A corresponde al llenado de la cota 5 y la figura B al llenado de la cota 8, es decir, al llenado final.
Elaboración propia.*

Una vez completado el llenado total de la batea, se procede a la extracción del mineral, siguiendo el método específico designado: extracción por un punto o por dos puntos de forma alternada. A continuación, se presentará un análisis detallado de los resultados obtenidos en diversos escenarios de extracción.

Conforme a la metodología descrita previamente, cada vez que se complete la extracción por un punto específico, se interrumpe el proceso para pesar el mineral recolectado hasta ese momento. Este peso se registra meticulosamente para su posterior tabulación. Después de este paso, se reanuda la extracción para continuar con el siguiente punto de recolección.

Es importante destacar que este procedimiento asegura una recopilación precisa de datos en tiempo real, permitiendo una evaluación detallada de los rendimientos y distribución del mineral en la muestra analizada.



Ilustración 29: salida del marcado 2hX, correspondiente a la coordenada (35,105,30). Elaboración propia.

5.2 Desarrollo de experimento para conocer características de elipsoide de extracción y de las zonas de extracción aisladas (ZEA) generadas.

En primer lugar, se llenará completamente la batea anteriormente descrita con sus respectivos marcadores en cada coordenada. Luego de realizar el llenado se procede a la extracción de la columna solamente utilizando el punto de extracción n°1 ubicado en la pared fija. Una vez realizado la extracción total de dicha columna, se obtuvieron un total de 100 extracciones, es decir, se extrajeron 100 marcadores donde la masa total de mineral extraído de la batea fue de 47 644 [g], dichas extracciones se encuentra tabuladas en el Anexo A. A continuación, se presentan unas ilustraciones de la distribución espacial de los marcadores extraídos de la batea.

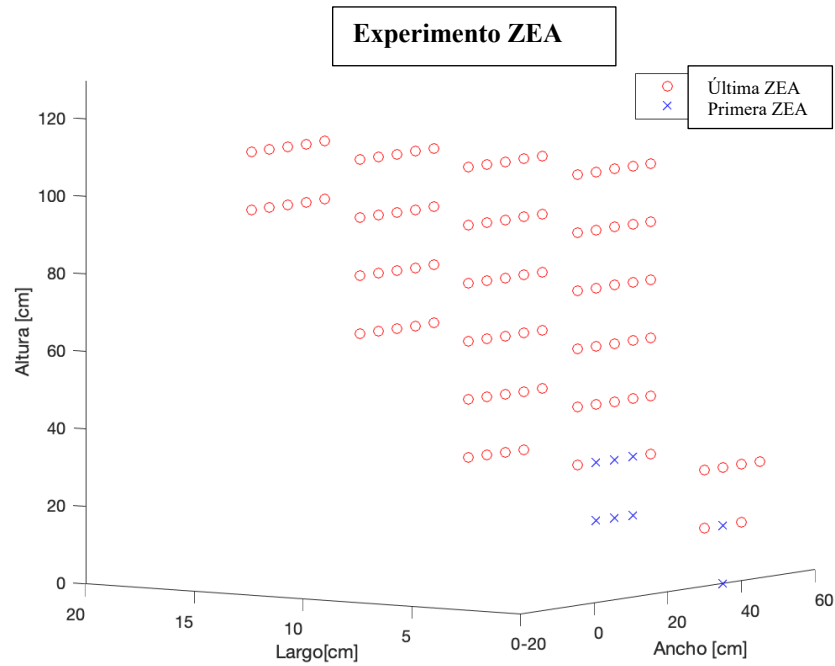


*Ilustración 30: Vista Noroeste del experimento sobre el estudio de la primera y última ZEA generadas en la batea.
Elaboración propia mediante Matlab.*

Al analizar el orden en que se fueron extrayendo los diferentes marcadores, se reconocieron las dos zonas de interés por lo cual se realizó este caso, donde se pudieron visualizar la primera y última zona de extracción aislada (ZEA). Dichas zonas se presentan demarcadas en la siguiente ilustración.

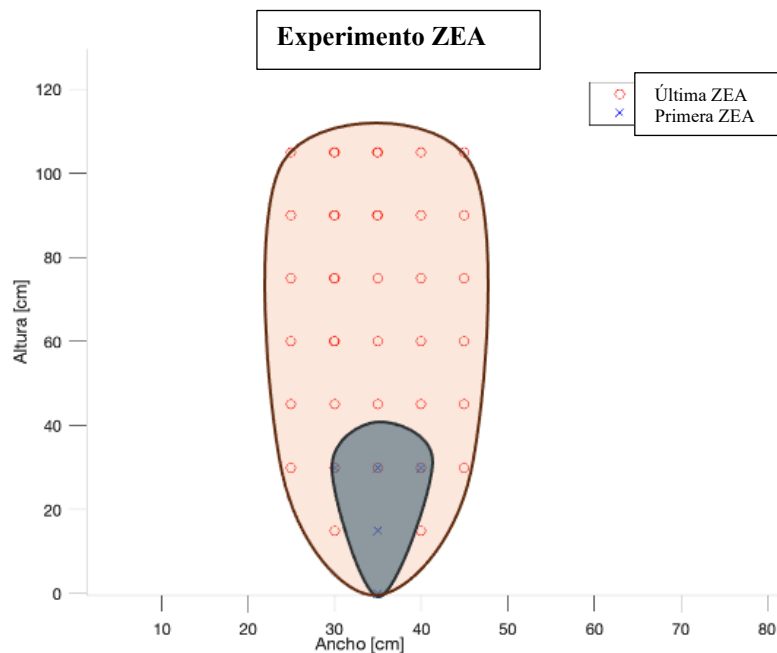


Ilustración 31: Vista Sur del experimento de la ZEA, demarcación de dichas zonas. Elaboración propia mediante Matlab.

Dado la ilustración anterior, se tiene que dado el detalle presentado en el Anexo A, la cantidad de marcadores extraídos por la elipsoide de extracción (IEZ) fue de 8, resultado en la extracción de 2 971[g] de mineral desde la batea. Por otro lado, con respecto a la última ZEA identificada, se obtuvo como resultado una extracción total de 92 marcadores equivalentes a 44 673[g].

Ahora bien, dado el detalle de las extracciones realizadas en este experimento tabuladas en el Anexo A, se tiene la siguiente tabla confeccionada con la cantidad de material extraído por cada cota demarcada.

Tabla 5: Masas extraídas por cada cota. Elaboración propia.

Cota	altura	Masa [g]	Volumen [cm ³]	Volumen acumulado [cm ³]
1	0	0	0	0
2	15	1491	1193	1193
3	30	6029	4823	6016
4	45	6949	5559	11575
5	60	7722	6178	17753
6	75	7015	5612	23365
7	90	8975	7180	30545
8	105	9463	7570	38115

A continuación, se presentará un gráfico de altura versus volumen acumulado extraído para obtener un relación sobre estos 2 parámetros.

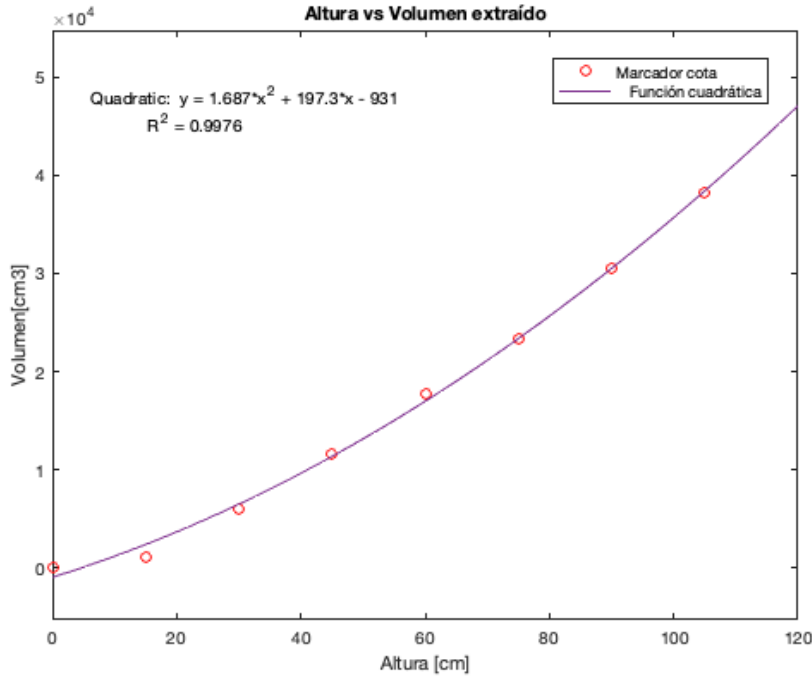


Ilustración 32: Relación Altura versus volumen extraído. Elaboración propia mediante Matlab.

De esta forma y probando la función que mejor se ajustara a la relación planteada, se tiene que la función cuadrática se ajusta de excelente forma a la gráfica Altura-Volumen, con coeficiente R^2 igual a 0,9976.

A continuación, dado que se tiene que la función experimental para calcular el volumen en función de la altura (H) de la elipsoide extraída viene dada por:

$$Volumen\ extraído(H) = 1,687H^2 + 197,3H - 931$$

Ecuación 1: Ecuación experimente del volumen extraído en función de la altura H. Elaboración propia

Se compara con la ecuación de volumen de un elipsoide encontrado en la literatura, el cual viene dado por:

$$Volumen\ elipsoide = \frac{4\pi}{3} abc$$

Ecuación 2: Ecuación teórica del volumen de una elipsoide. Elaboración propia.

Donde:

- a: Corresponde a la mitad de la altura de la elipsoide.
- b: Corresponde a la mitad del largo de la elipsoide.
- c: Corresponde a la mitad del ancho de la elipsoide.

De esta forma se tiene que el volumen dado la ecuación encontrada en la literatura (teórico) y ocupando la ilustraciones 30-31 respectivamente es:

b= 14 [cm] dado la ilustración 29.

c= 12,5 dado que el ancho de la elipsoide viene dado por la hipotenusa de lados 15[cm] (dado por la separación entre cotas) y 20[cm] (por la cantidad de marcadores en la horizontal).

Ahora reemplazando los valores en la ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Volumen elipsoide} &= 4,19 * \frac{105,5}{2} * 14 * 12,5 \\ \text{Volumen elipsoide} &= 38\,660 \text{ [cm}^3\text{]} \end{aligned}$$

Luego ocupando la ecuación N°3 (experimental) se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Volumen extraído}(105) &= 1,687 * 105,5^2 + 197,3 * 105,5 - 931 \\ \text{Volumen extraído}(105) &= 38\,650 \text{ [cm}^3\text{]} \end{aligned}$$

Como se puede apreciar para efectos de este estudio y en la escala en que se está trabajando los resultados de los volúmenes tanto teórico y experimental de la elipsoide extraída por el punto de extracción son prácticamente iguales.

5.3 Desarrollo experimento para conocer otras características de la columna(s) extraída(s) por el(los) punto(s) de extracción.

Durante el estudio del comportamiento de la extracción minera, se implementó un método que consistió en alternar la extracción entre dos puntos específicos. Los resultados obtenidos mostraron una sorprendente consistencia, prácticamente idéntica, al considerar la escala y el contexto del análisis realizado. Este hallazgo inicial proporciona una base sólida para continuar explorando y profundizando en el fenómeno de la extracción minera.

Para avanzar en nuestra comprensión, se plantea ahora una fase de experimentación más detallada. En esta etapa, se explorará cómo varía la extracción al reducir gradualmente la distancia entre los dos puntos de extracción. Este enfoque nos permitirá identificar con mayor precisión el punto crítico en el cual podría surgir el fenómeno conocido como 'extracción negativa'.

Cabe recordar que el término 'extracción negativa' se refiere al fenómeno donde la extracción de recursos minerales de una zona puede tener un efecto adverso, como una disminución en la eficiencia de la extracción o incluso una reducción en la cantidad total extraída. Este fenómeno es de particular interés y relevancia en la minería moderna, donde la optimización de los procesos puede tener un impacto significativo en la rentabilidad y sostenibilidad ambiental de las operaciones.

5.3.1 Con un solo punto de extracción

Para comenzar el experimento, se llevará a cabo la extracción en un solo punto para analizar las propiedades de la elipsoide que se formará al extraer mineral de esa área en particular. Este método nos ayudará a analizar las características de la elipsoide sin interferencias de otros puntos de extracción, los cuales podrían afectar tanto la forma como la cantidad de mineral extraído durante la operación. Es crucial resaltar que la extracción finalizará al llegar a la cota superficial más elevada, que es la cota N°8, situada a 105 [cm] de altura. Después de extraer el mineral de esta cota, se harán visibles los marcadores de cotas inferiores. Esto sucede porque estaremos sacando mineral que se ha derrumbado debido a la gravedad una vez que hayamos retirado la columna de extracción inicial. Esta estrategia experimental nos posibilitará obtener información precisa sobre la forma y la distribución del mineral extraído desde un único punto, sentando así las bases para futuras comparaciones al agregar más puntos de extracción. Analizar en detalle la elipsoide de extracción generada nos dará datos clave para mejorar tácticas de extracción minera y comprender más a fondo los fenómenos geológicos presentes en la operación. Utilizando este enfoque, podemos investigar de manera precisa las propiedades de la extracción desde un solo punto antes de avanzar a escenarios más complicados con dos puntos de extracción a distintas distancias entre sí.

Por último, cabe señalar que estos casos o experimentos que se desarrollarán en este apartado, solo se enfocará en analizar en que influye al punto de extracción tener otro punto cercano, estudiando varios casos a diferentes distancias de separación como se señaló anteriormente.

Después realizar el llenado con los respectivos marcadores en cada coordenada y vaciar la columna, se observan los resultados sobre la ubicación de los marcadores extraídos por el punto de extracción designado.

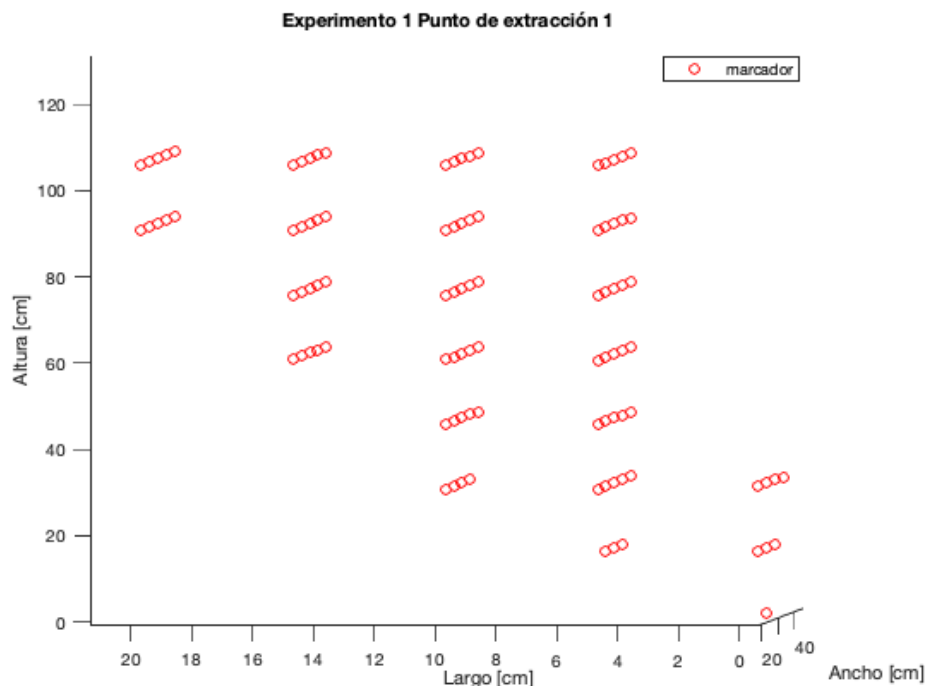


Ilustración 33: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°1 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

Como se puede apreciar en la ilustración anterior, la elipsoide que se extrajo por dicho punto tiene un desplazamiento de 10-15 [m] a escala real considerando como punto de origen la pared en la cual se encuentra el punto de extracción n°1. Estos 10-15 [m] de desplazamiento son debido a que el centro por la parte superior de la elipsoide de extracción fue conocido dado que el primer marcador en bajar desde la cota más superficial de la batea, es decir, correspondiente a la cota 8, fue el marcador 8hC (35,10,105). Lo anterior se puede verificar en el Anexo A, que es la tabla correspondiente al registro de marcadores y en la secuencia en que fueron extraídos .

Por otro lado, se tiene que el ancho de la elipsoide de extracción es de aproximadamente 24-30[m] aproximadamente, esto se puede verificar visualizando una vista sur del grafico obtenido por los marcadores que se extrajeron y que se puede visualizar a continuación.

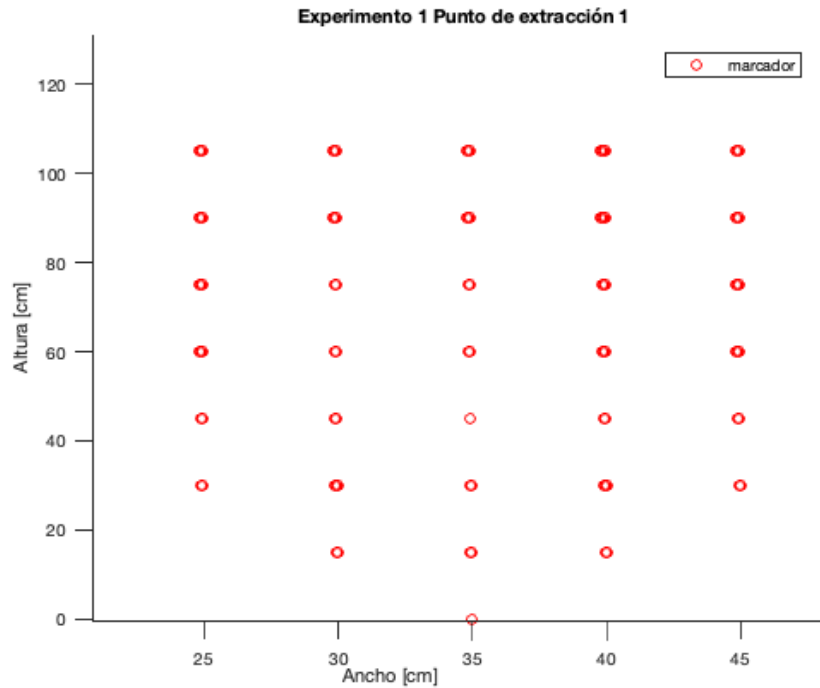


Ilustración 34: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°1 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

Por último, se tiene que dado la tabla de registro de los marcadores con sus respectivas masas extraídas (Anexo A), el total de masa extraída por el punto de extracción n°1 después de haber realizado un total de 100 extracciones fue de 47 644 [g], lo cual servirá como indicador para las siguientes pruebas que se realicen pero esta vez dado dos puntos de extracción con una extracción de tipo alternada, de esta forma existirá un parámetro para analizar cómo y bajo que circunstancias la tasa de extracción de un punto se ve afectado al tener otro punto de extracción a cierta distancia de separación. Dado lo anterior, se presenta una ilustración de la variación de la tasa de extracción luego de cada evento.

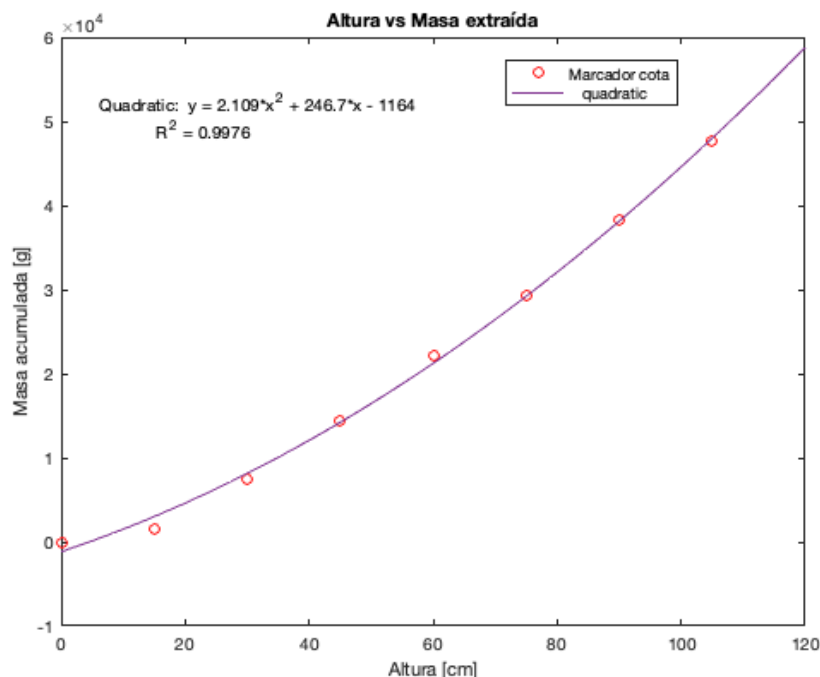


Ilustración 35: Masas acumuladas luego de las 100 extracciones realizadas por punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

Como se aprecia en la ilustración, la función que más se ajusta a la extracción por cota luego de las 100 extracciones realizadas, es de tipo cuadrática con un coeficiente R^2 igual a 0,9976.

5.3.2 Dos puntos de extracción distanciados a 105 [cm]

En el marco de esta simulación, se llevó a cabo un estudio detallado utilizando dos puntos de extracción separados por una distancia de 105 [cm], la cual se determinó como la máxima posible dentro de las dimensiones específicas del cajón utilizado para el experimento. Con un total de 2 640 marcadores distribuidos estratégicamente según la metodología previamente descrita, se procedió a realizar la extracción de manera alternada entre ambos puntos.

El objetivo principal de este enfoque experimental fue evaluar la distribución del mineral dentro de la columna de material depositado en la batea. Cada marcador representaba un punto de interés en la muestra, permitiendo no solo la recolección sistemática de datos, sino también la capacidad de estudiar cómo varía la concentración y composición del mineral a lo largo de la distancia establecida.

Durante la fase de extracción, se registró cuidadosamente la cantidad de material recuperado en cada punto específico de recolección. Este proceso incluyó la interrupción temporal de la

extracción para pesar y tabular el mineral obtenido hasta ese momento, asegurando una recopilación precisa de datos en tiempo real.

Los resultados obtenidos proporcionaron una visión detallada de la distribución espacial del mineral en la batea, destacando patrones de concentración y posibles variaciones significativas a lo largo de la distancia medida. Este análisis no solo contribuye al entendimiento fundamental de los procesos de deposición y acumulación mineral en entornos de extracción, sino que también ofrece información valiosa para la optimización de técnicas de muestreo y extracción en operaciones mineras.

A continuación, se muestra una ilustración con los marcadores que fueron extraídos a lo largo que duró la extracción por los dos punto de extracción.

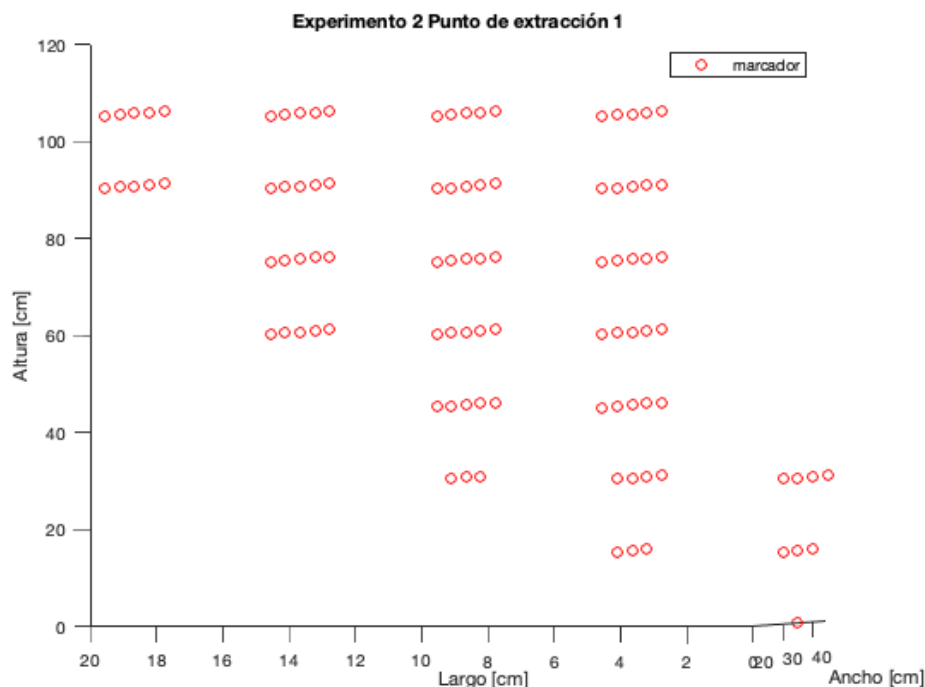


Ilustración 36: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

El experimento presenta la ilustración correspondiente al punto de extracción n°1, donde se observa claramente cómo varían las dimensiones de la elipsoide de extracción a medida que aumenta la cota (coordenada z). A partir de la cota 4 ($z=45$), se puede notar que la elipsoide alcanza su máxima anchura, que equivale a 5 marcadores, aproximadamente 24-30[m] de ancho en una escala real. Lo anterior se puede visualizar de mejor forma a través de la siguiente ilustración.

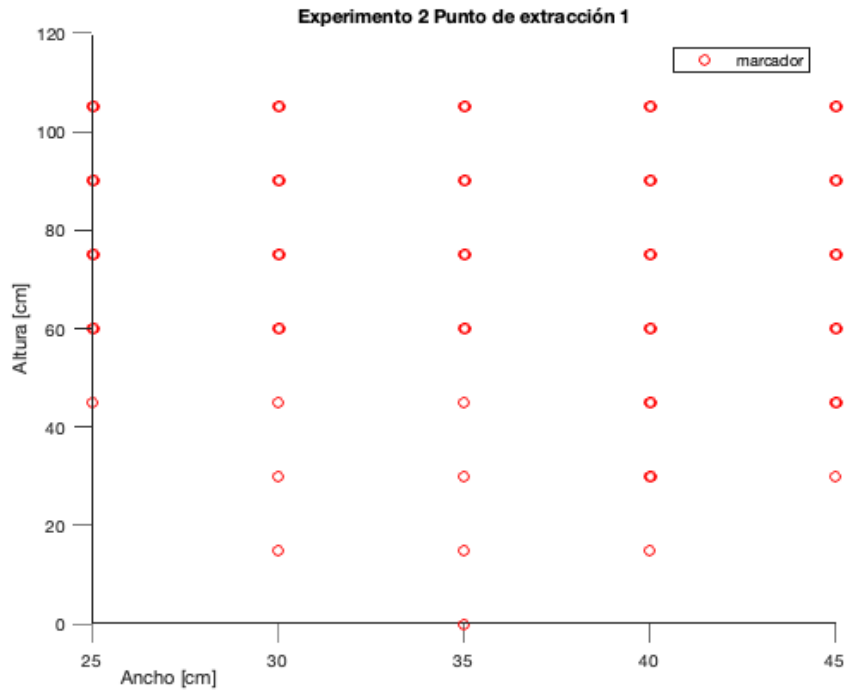


Ilustración 37: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

Además, se observa que hasta la cota 3, la longitud de la elipsoide aumenta en 5[cm] por cada incremento de cota. Después de la cota 3, el aumento en la longitud ocurre cada 2 cotas, aumentando en 5[cm] cada vez.

Este patrón detallado de crecimiento del elipsoide proporciona información crucial sobre la distribución espacial del material extraído en función de la profundidad y permite una evaluación precisa de cómo varían las dimensiones de la zona de extracción con respecto a la altura, lo cual se irá comprobando a medida que se realicen más pruebas de extracción a diferentes distancias.

Posteriormente, se observó el desplazamiento a través de los marcadores comenzando desde la cota 4. Durante el proceso de extracción, se determinó que el centro superficial de la elipsoide (en la cota n°8), es decir, el primer marcador extraído correspondiente a esta cota, fue el 8hC ubicado en las coordenadas (35, 10, 105). Este descubrimiento reveló que el desplazamiento del centro de la elipsoide en la superficie superior fue de 10-15 metros, considerando una escala real en relación con la pared perpendicular donde se encuentra el punto de extracción n°1.

Este análisis detallado del desplazamiento del centro del elipsoide proporciona una comprensión clara de cómo cambia la posición del material extraído a medida que se avanza en el proceso, siendo fundamental para evaluar la distribución y la dinámica del depósito mineral en el área estudiada.

Por otro lado, se tiene la siguiente distribución de marcadores en el sector del punto de extracción n°2.

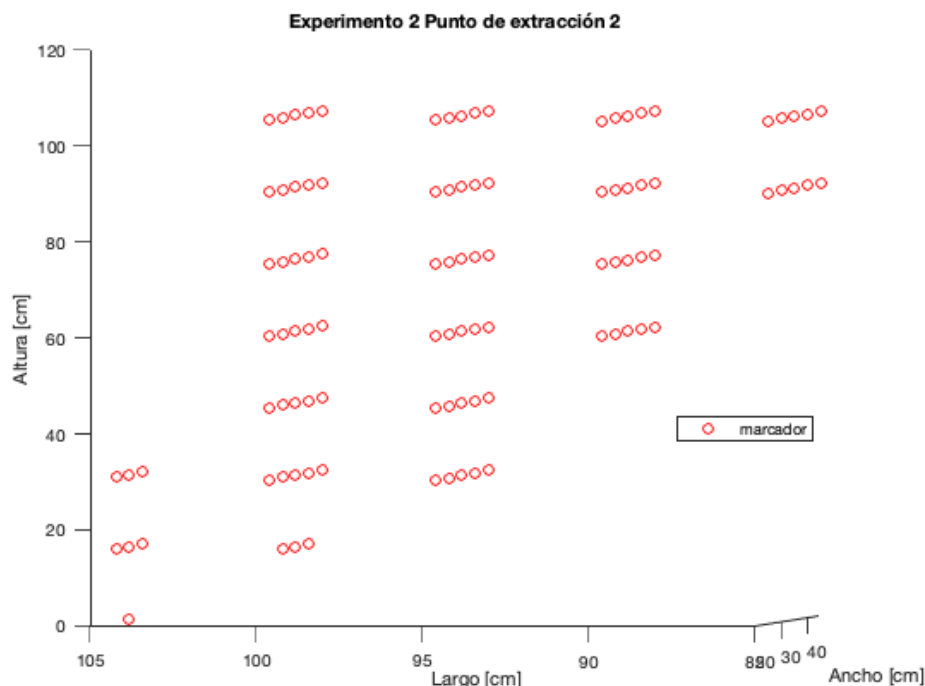


Ilustración 38: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

Como se puede visualizar en la anterior ilustración correspondiente al punto de extracción n°2, la distribución de los marcados que fueron extraídos por la forma de la columna de extracción es básicamente la misma con respecto a la que se formó en el punto de extracción n°1. En este caso, a diferencia del punto n°1 en la cota 3 se extrajo un marcador menos cuando $y=105$ pero uno más cuando $y=95$. A continuación se presenta otra vista de la extracción realizada en el punto de extracción n°2.

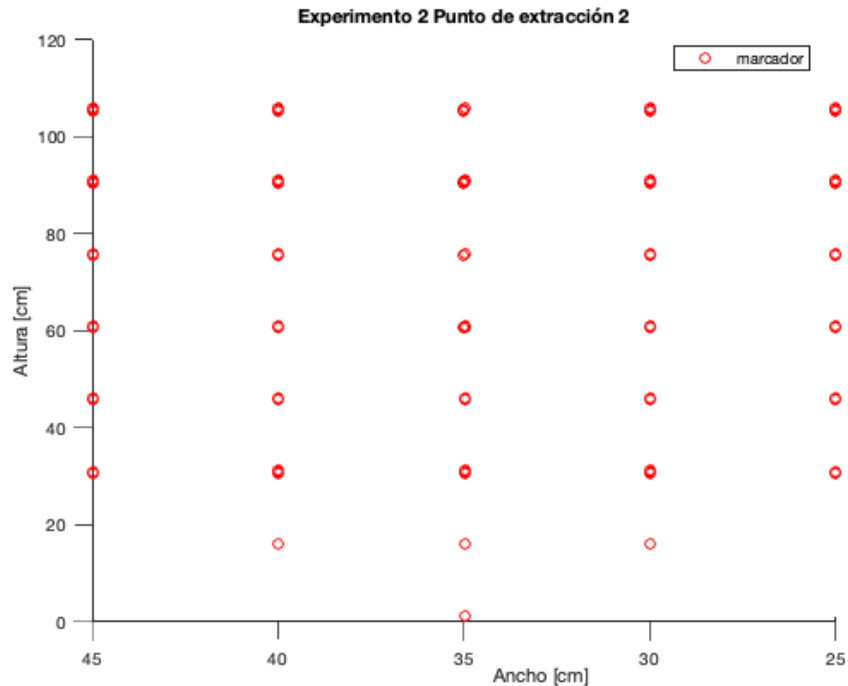


Ilustración 39: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

Como se puede observar en la ilustración, el ancho y forma del elipsoide de extracción es exactamente la misma que se formó en el punto de extracción n°1, donde el diámetro de la elipsoide fue de 24-30[m] en una escala real.

Ahora bien, abordando otro tema relevante, en cuanto a la masa que se extrajo tanto del punto de extracción n°1 y n°2 respectivamente fueron muy similares ya que para el primer caso la masa extraída después de las 100 extracciones realizadas en cada uno de los puntos de extracción fue de 47 628 [g] en el punto n°1 y de 47 610 [g] para el punto n°2, esto se puede visualizar en la tabla que está en Anexo B.

A continuación, se presenta un gráfico sobre el comportamiento que tuvieron a lo largo de la extracción de cada columna con su respectiva función que mejor describe dicho comportamiento.

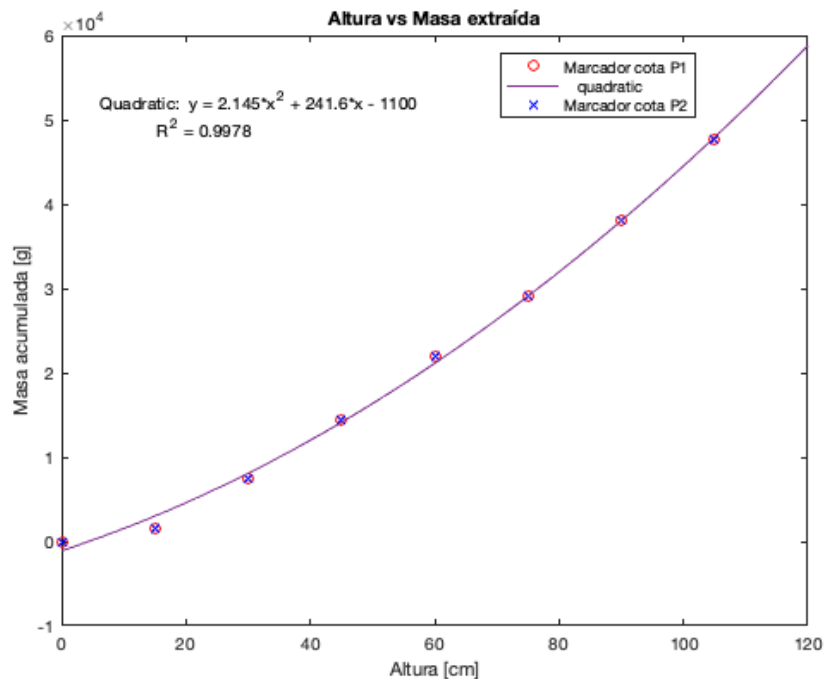


Ilustración 40: Masas acumuladas luego de las 100 extracciones realizadas por cada punto de extracción. Elaboración propia mediante Matlab.

Como se puede apreciar en la anterior ilustración, se tiene que el comportamiento y la masa extraída por cada punto es bastante similar y al ajustar una función que mejor describa a ambas extracciones, corresponde a una función cuadrática con un coeficiente R^2 igual a 0,9978.

Por último, se presentan 2 vistas de la extracción resultante de este experimento, en donde se muestran las disposición de los marcadores que fueron extraídos por los dos puntos de extracción con una técnica de extracción alternada.

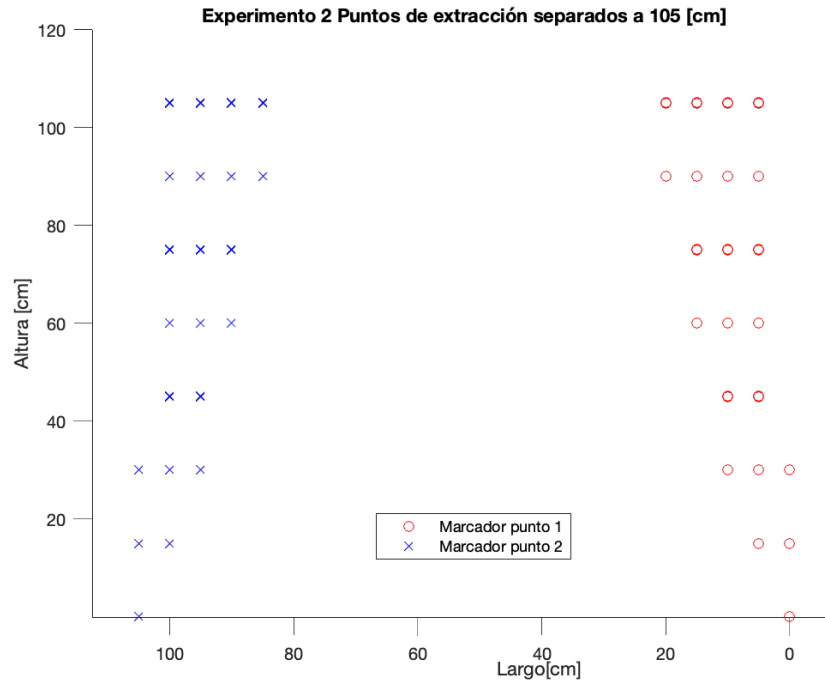


Ilustración 41: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

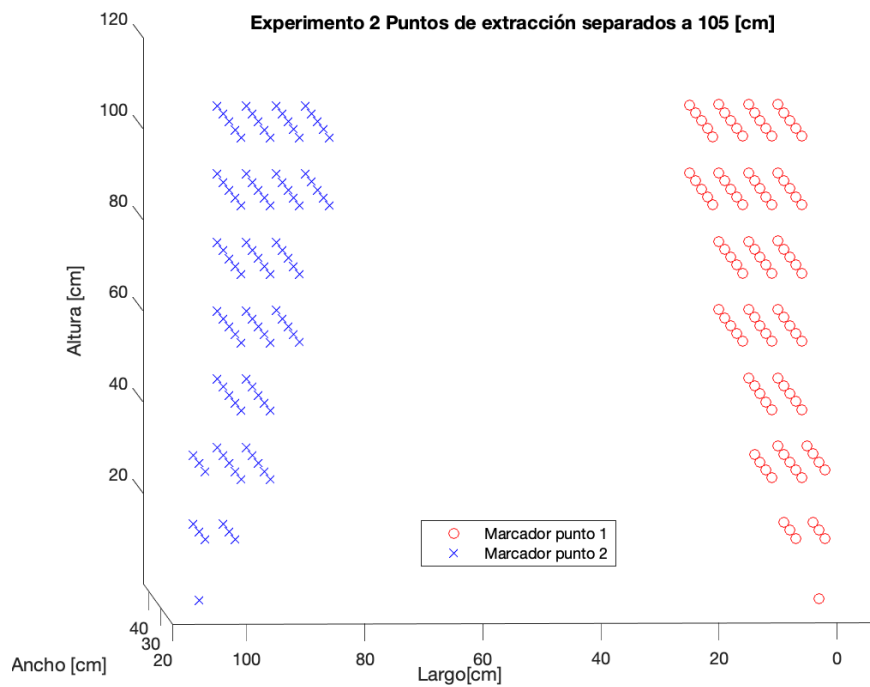


Ilustración 42: Vista Noreste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°2 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

Por último, en la ilustración 41 y 42 se visualiza que el desplazamiento de las dos columnas de extracción respecto a las dos paredes en los cuales se sitúan los puntos de extracción fue de 10-15[m] en escala real con respecto a su centro, lo anterior se visualiza desde la cota 4 lo que equivale a 45[m] de altura y se mantiene hasta llegar a la cota n°8.

5.3.3 Dos puntos de extracción distanciados a 90 [cm]

Una vez realizado el experimento anterior, se procede a la descarga total de la gravilla contenida en la batea (cajón) para posteriormente hacer el paso de la recolección completa de los 2.640 marcadores. Una vez realizado los pasos anteriores, se procede a correr la placa movable para fijarla a 90 [cm] de la pared fija en donde se sitúa el punto de extracción n°1. Dado lo anterior, ahora la pared movable, es decir, donde se sitúa el punto de extracción n°2 quedará con origen en $y=90$, o cuando $y=S$. De esta forma en una vez realizado el llenado y disposición de los marcadores en sus respectivas coordenadas, habrá un total de 2.280 marcadores dispuestos en la batea.

Una vez realizado la extracción de las dos columnas de forma alternada, se observaron los siguientes resultados presentes en la siguiente ilustración y registrados en modo resumen en el Anexo B respectivamente.

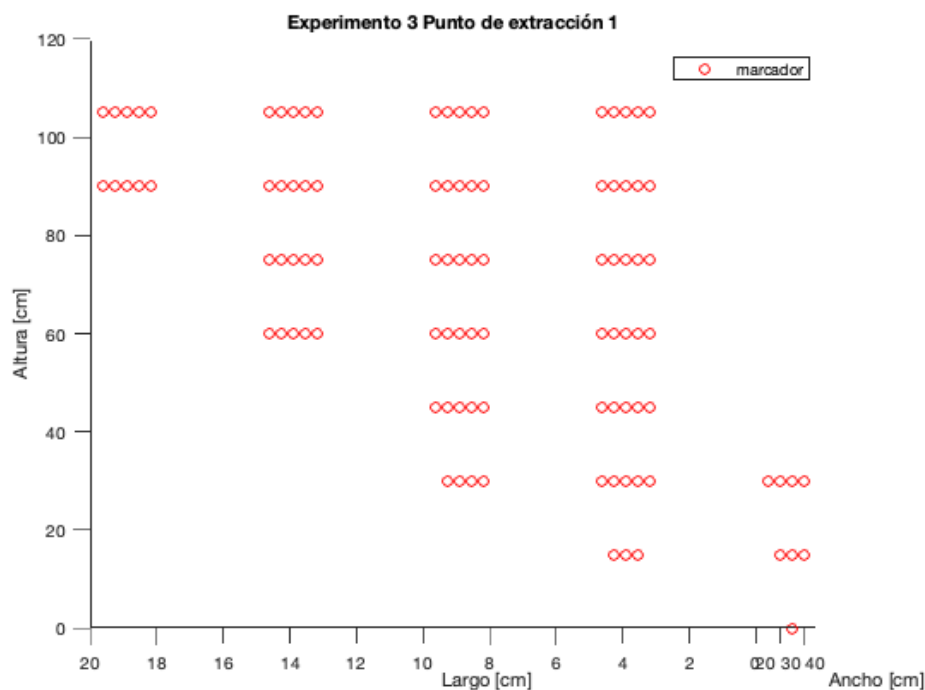


Ilustración 43: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

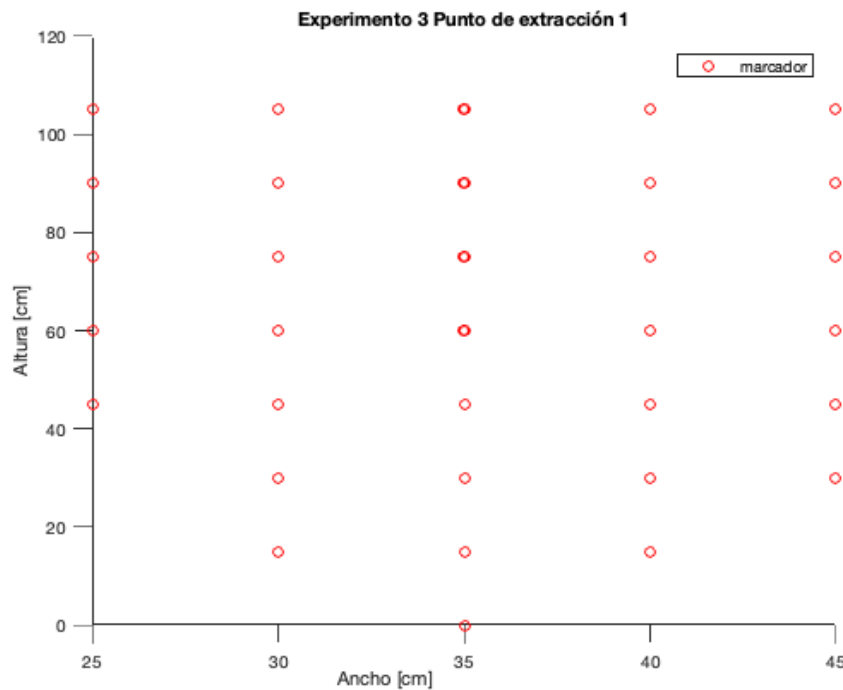


Ilustración 44: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

Como se puede apreciar en las ilustraciones 43 y 44, la forma y los marcadores que fueron extraídos por cada punto de extracción son muy semejantes, solo habiendo una pequeña variación inicial correspondiente a la cota 3, es decir, a una altura de 30 [m] reales hubo una variación en el eje Y donde se extrajo en Y=0 (4 marcadores), luego en Y=5 (5 marcadores) y en Y=10 (4 marcadores) para el punto de extracción N°1, luego en el punto de extracción fueron 3,5,5 marcadores respectivamente en sus valores de Y señalados.

En cuanto al diámetro de la elipsoide de la columna de extracción que se extrajo, esta posee la misma dimensión ya descrita en los experimento 1 y 2 respectivamente, la cual es de 20 [m] de ancho, en cuanto al centro de la elipsoide en la cota más alta (cota 8) el centro de esta fue la misma de igual forma que los experimentos ya realizados, es decir, el centro fue en las coordenadas (35,10,105) que corresponde al marcado 8hC.

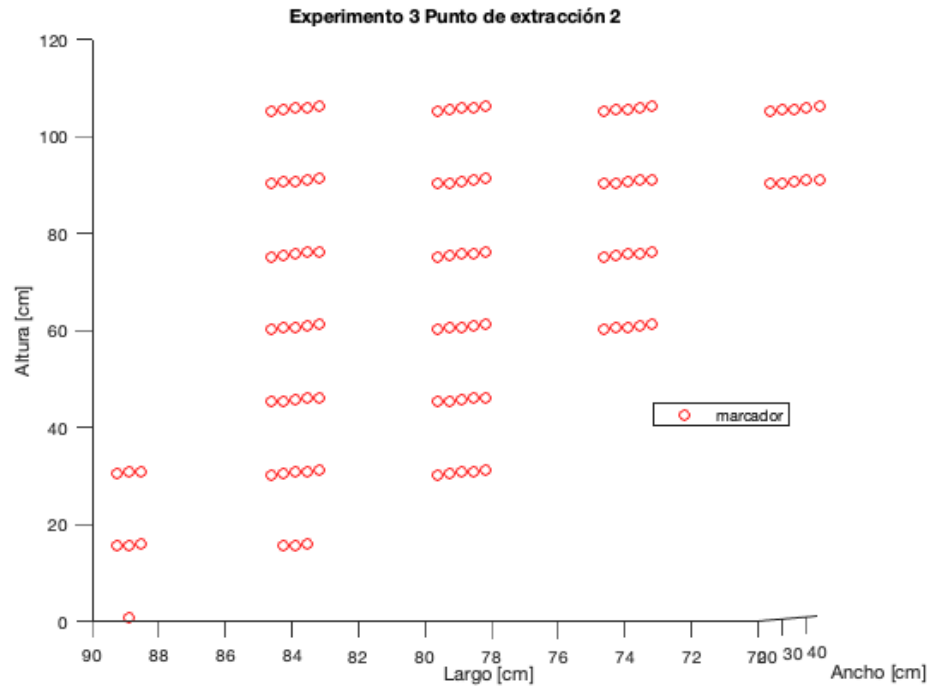


Ilustración 45: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

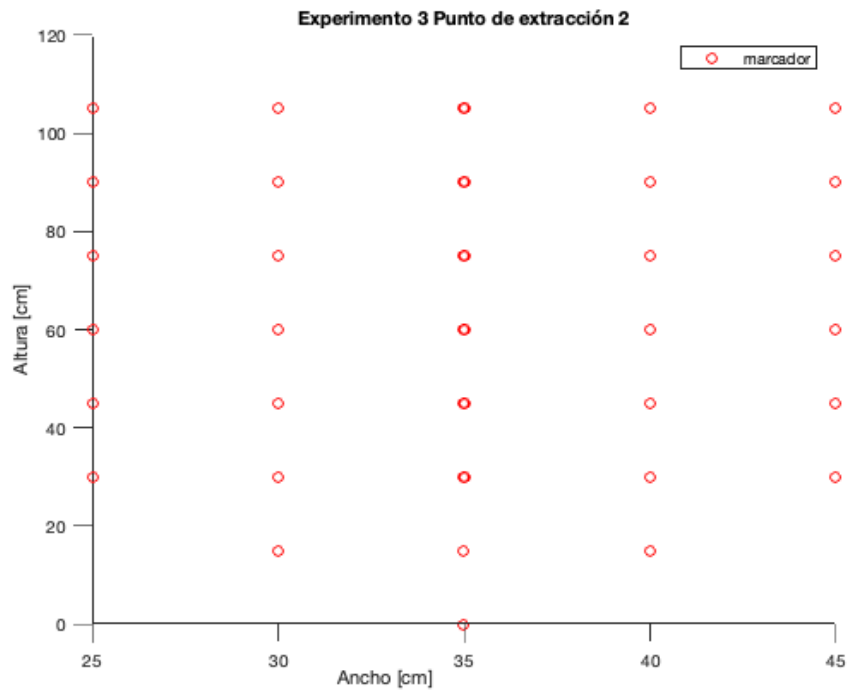


Ilustración 46: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

Para el caso del punto de extracción n°2, se observa lo mismo que para el punto de extracción n°1, donde el diámetro de la columna de extraída por el punto n°2 también es de 24-30[m] a escala real, dicho diámetro de igual forma se obtiene a partir de la cota n°3, sin embargo como se puede visualizar en la ilustración n°40, solo cuando $Y=85$ y 80 respectivamente se obtiene este diámetro, dado que para esos dos valores de Y se extrajeron 5 marcadores de dicha cota, en cambio, para $Y=90$ se extrajeron 3 marcadores. Luego para las cotas N°4 hasta la 8 respectivamente, el diámetro de 24-30[m] se visualizó para todos los valores de Y .

En cuanto al centro de la columna extraída, se verificó que es la misma con respecto a los experimento ya realizados, es decir, para este caso el centro de la columna en la cota más alta (cota 8) fue con un desplazamiento de 10[m] respecto a la pared en donde se encuentra el punto de extracción n°2, de esta forma, el primer marcador extraído de la cota 8 fue el 8hQ correspondiente a la coordenada (35,80,105), cabe recordar que en este escenario, el punto de extracción está situado en la coordenada (35,90,105).

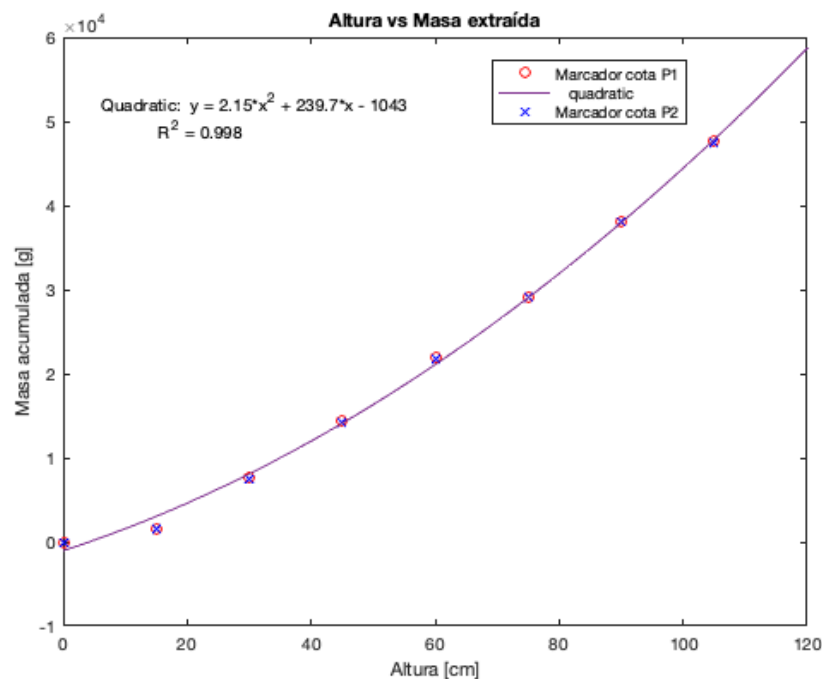


Ilustración 47: Masas acumuladas luego de las 100 extracciones realizadas por cada punto de extracción. Elaboración propia mediante Matlab.

Con respecto a las masas extraídas desde los puntos de extracción 1 y 2 respectivamente fueron de 47 567 [g] y 47 493[g] extraídos a partir de 100 extracciones por cada punto de extracción, lo que equivale a solo 74[g] de diferencia entre ambos punto de extracción. Por otro lado, se observa que la función que mejor describe el comportamiento de estas dos columnas extraídas es de tipo cuadrático con un coeficiente R^2 igual a 0,998.

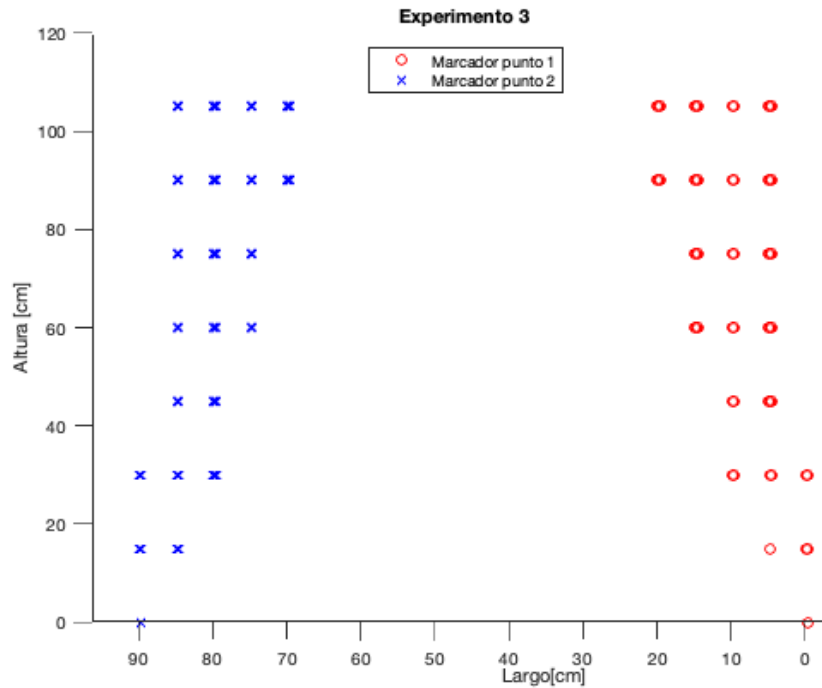


Ilustración 48: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

Por último, el desplazamiento respecto a cada pared en el cual se sitúa cada punto de extracción fue de 10-15[m], cabe señalar de igual forma que al igual que los experimentos ya se han realizado, el desplazamiento de la columna de extracción va siendo la misma para todos los casos.

5.3.4 Dos puntos de extracción distanciados a 75 [cm]

Para este escenario se procede a mover la pared movable y fijarle en $Y=75$ o en $Y=P$, con respecto a la otra pared que contiene el punto de extracción n°1 siempre va a permanecer fija, de este modo el centro del punto de extracción se mantiene en la coordenada (35,0,0) y el centro del punto de extracción n°2 se traslada a la coordenada (35,75,0). Una vez realizado el vaciado completo del cajón y volver a reubicar cada marcador en su respectiva coordenada con el correspondiente llenado con material, se tiene que para este caso la cantidad de marcadores dispuestos dentro de la batea es de 1 920 marcadores.

Una vez realizado la extracción de las 2 columnas con una extracción de forma alternada, se obtuvieron los siguientes resultados para cada punto de extracción.

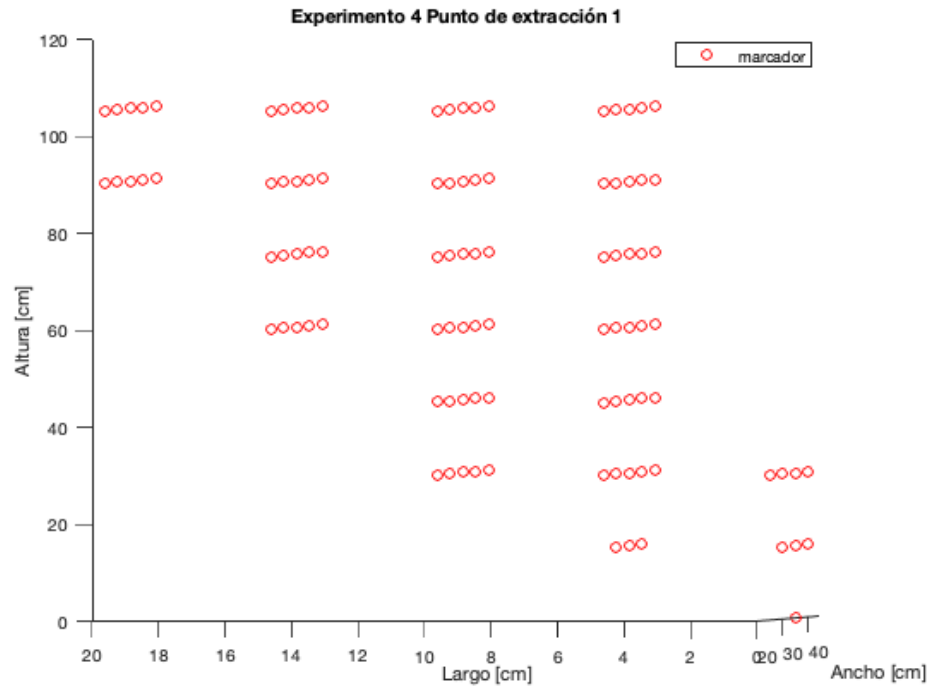


Ilustración 49: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

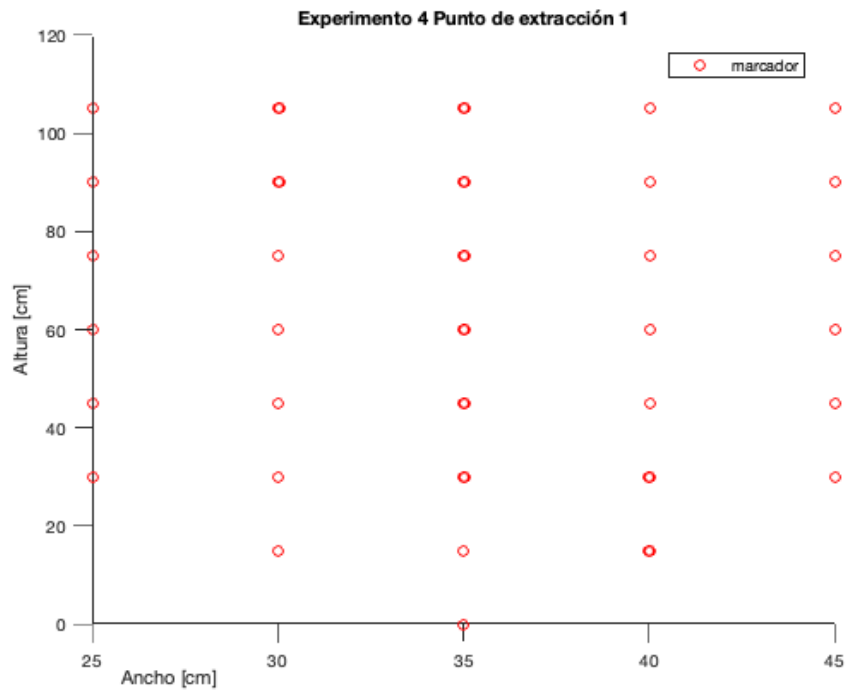


Ilustración 50: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

Al observar las anteriores ilustraciones se observa que para el caso del punto de extracción n°1 la cantidad de marcadores extraídos al realizar toda la extracción de la columna fue de 101 marcadores. Una pequeña variación respecto a las 100 extracciones que se habían realizado en los casos anteriormente planteados. Sin embargo, pese a esta pequeña diferencia la dimensión del diámetro de dicha columna es la misma ya observada en los casos anteriores, que es de 24-30 [m] de diámetro (D_{zea}). La diferencia radica que se extrajo un marcado más en la cota n°3 ($z=30[m]$), en cuanto a la forma de la elipsoide es la misma anteriormente descrita en los casos anteriores, donde el centro de la elipsoide extraída tuvo como centro superficial (cota n°8) el marcador 8hC correspondiente a la coordenada (35,10,105).

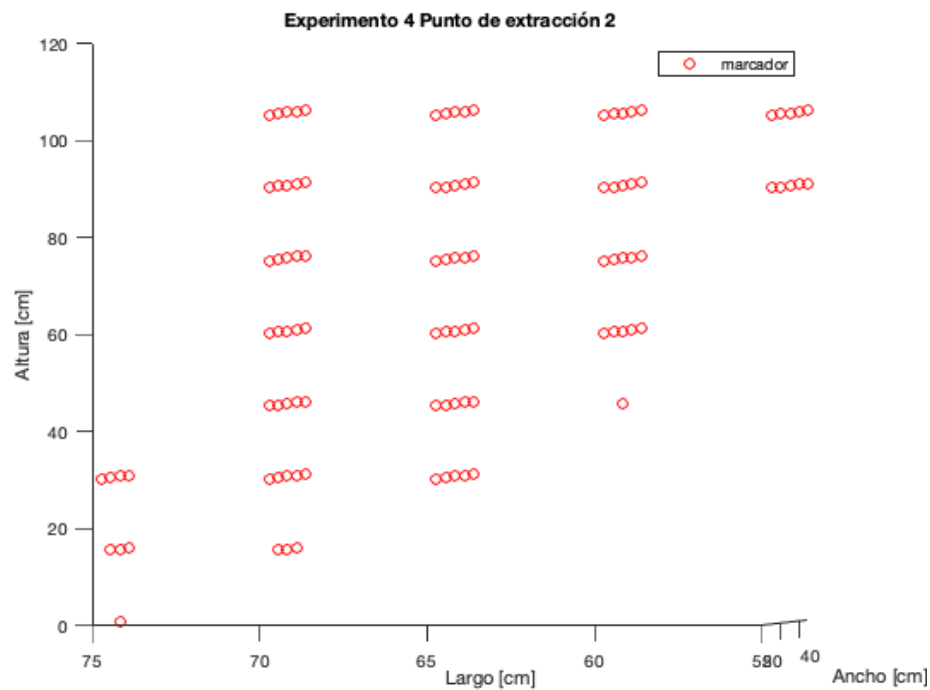


Ilustración 51. Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

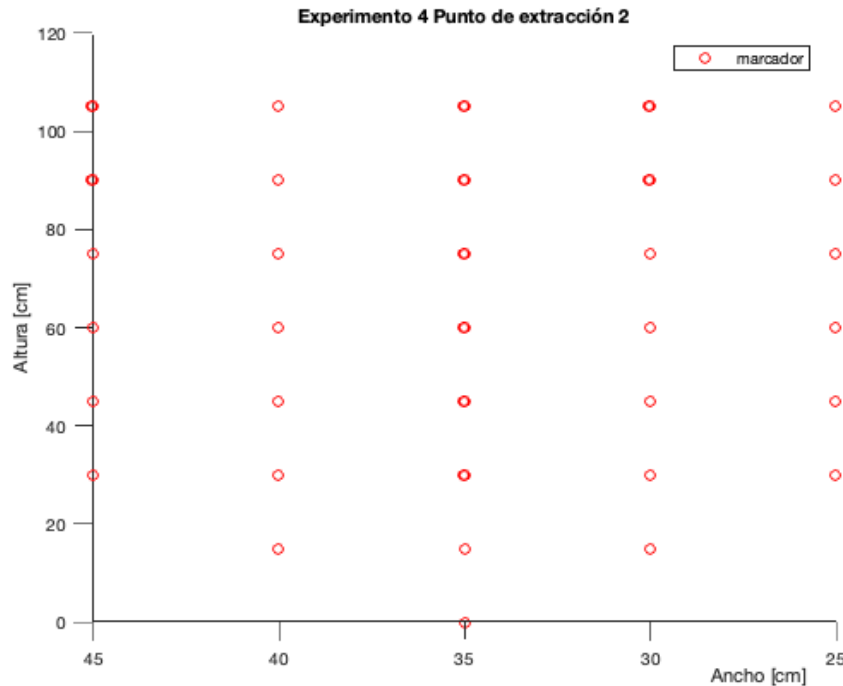


Ilustración 52: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°3 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

Para el caso del punto de extracción n°2, el caso fue similar al del punto de extracción n°1, con la diferencia que en este punto se realizaron 102 extracción, es decir, se extrajeron 102 marcadores al extraer dicha elipsoide formada en dicho punto. La diferencia con radica en que el cota n°4 ($z=45[m]$) donde se produjo la extracción de un solo marcador con coordenada $y=60$, es decir, a 15 metros de distancia de la pared fija en que se sitúa el punto de extracción n°2. Cabe señalar, que dicha extracción fue aislada, ya que para dicha coordenada z e y respectivamente no hubieron más marcadores extraídos, solo el de $x=35$, por lo cual no resulta significativa para la escala en que se está trabajando.

De la misma forma, se tiene que el diámetro de la elipsoide formada por dicha extracción resulta se la misma que en los casos anteriormente descritos, siendo de un valor de 24-30[m], dicho diámetro lo alcanza en la cota n°3.

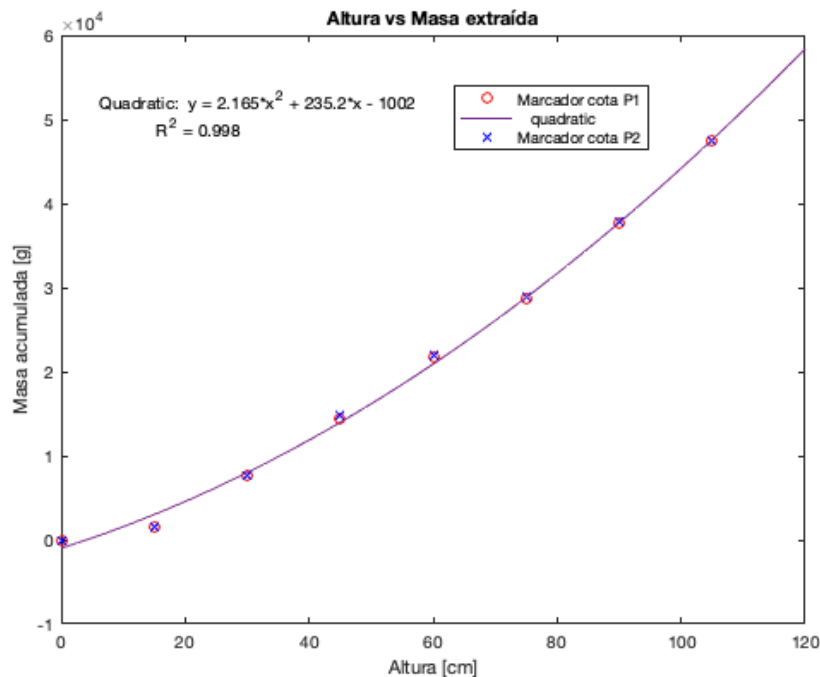


Ilustración 53: Masas acumuladas luego de las 101 y 102 extracciones realizadas por el punto de extracción N°1 y 2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

Después de haber extraído toda la elipsoide tanto del punto de extracción n°1 y 2 respectivamente, se realizaron un total de 101 extracciones para el punto n°1 y 102 extracciones para el punto n°2. Dado esta cantidad de extracciones se tiene que el total de mineral extraído por el punto n°1 es de 47 361[g] y para el punto n°2 47 458[g] los cuales se encuentra tabulados en detalle en el Anexo B respectivamente y resumidos por cota en la tabla.

Al comparar las dos masas de minerales extraídas por cada punto, se tiene que la diferencia es de tan solo 97[g] lo cual a la escala que se está trabajando y las masas que se extrajeron resultan ser muy semejantes, considerando que entre ambos puntos la diferencia de extracciones o marcadores extraídos es de uno. Por otro lado, la extracción se mantuvo similar en cuanto a la masa extraída, donde la diferencia más notoria se vio reflejada en la masa extraída en la cota 4 (45[m] de altura), dicha diferencia responde a un marcador más obtenido de la cota 4 por el punto de extracción n°2.

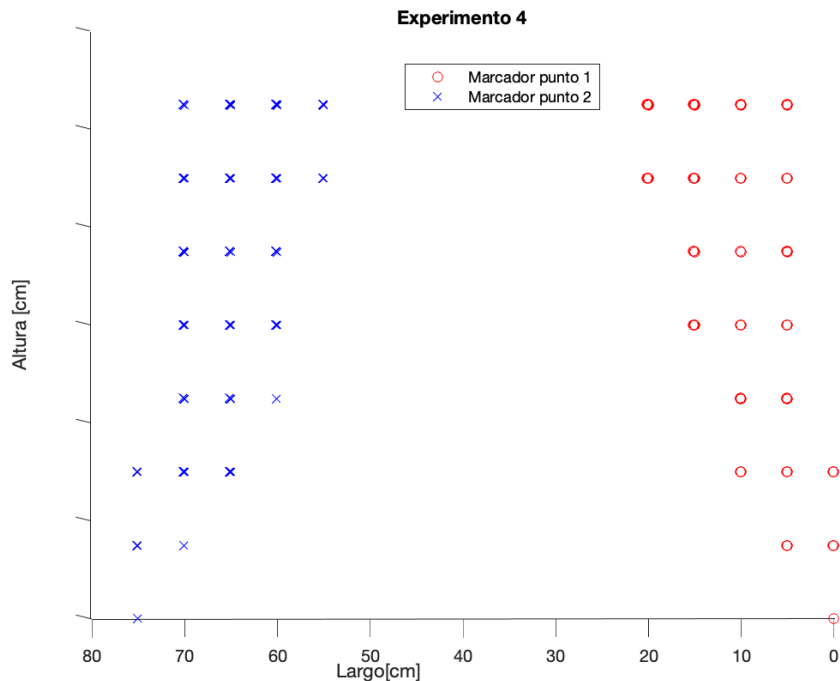


Ilustración 54: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°4 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

Por último, con respecto a la ilustración n°54, se tiene que el desplazamiento tanto de la elipsoide generada por el punto de extracción n°1 y 2 respectivamente resultan ser iguales y a la vez también igual que en los escenarios anteriormente estudiados, donde el desplazamiento es de 5[m] en escala real y de 10-15[m] respecto al centro que alcanza desde la cota 4-5 aproximadamente. Es importante recordar que estos desplazamiento son producidos debido a que el cuerpo minerales que se encuentra a izquierda del punto de extracción n°1 y a la derecha del punto de extracción n°2 no se encuentra fragmentado como si lo está el material contenido dentro de la batea.

5.3.5 Dos puntos de extracción distanciados a 60 [cm]

Para efectos de este caso a estudiar, la pared movable que contiene al punto de extracción n°2 se fijó en un valor de $y=60[m]$ distantes la pared que contiene en su parte inferior al punto de extracción n°1, es decir, para un $y=M$.

Cabe señalar, que una vez realizado el vaciado total de la batea y recolectado todos los marcadores que no fueron extraídos, se dispone al llenar y disposición de los marcadores en sus respectivas coordenada dentro de la batea, para este caso se tiene que se dispusieron un total de 1 560 marcadores.

Una vez realizado la extracción completa de cada columna formada en cada punto de extracción, se obtuvieron los siguientes resultados graficados en las ilustraciones presentadas a continuación.

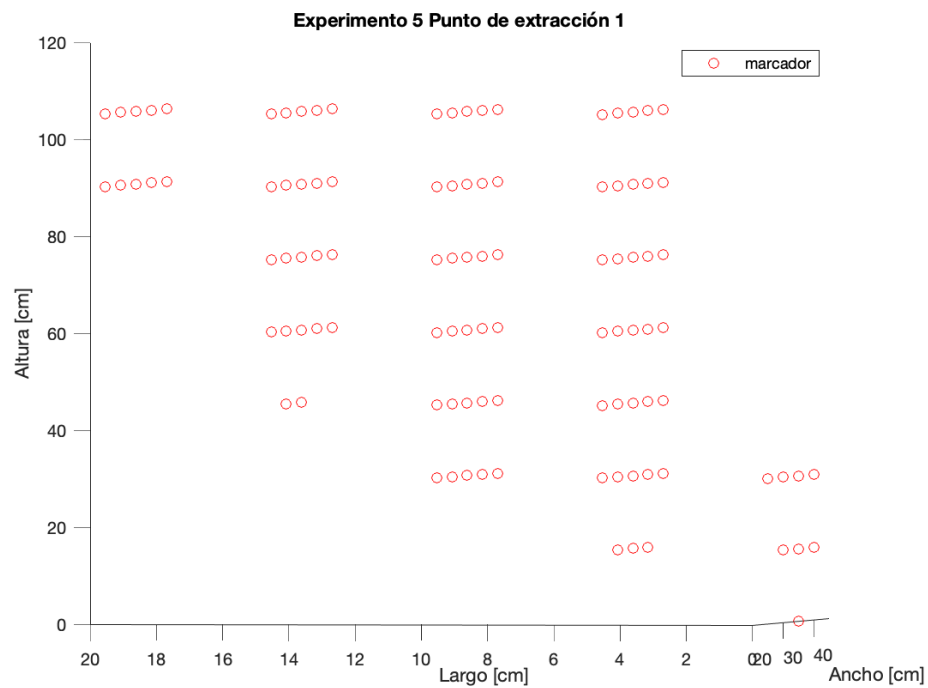


Ilustración 55: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°5 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

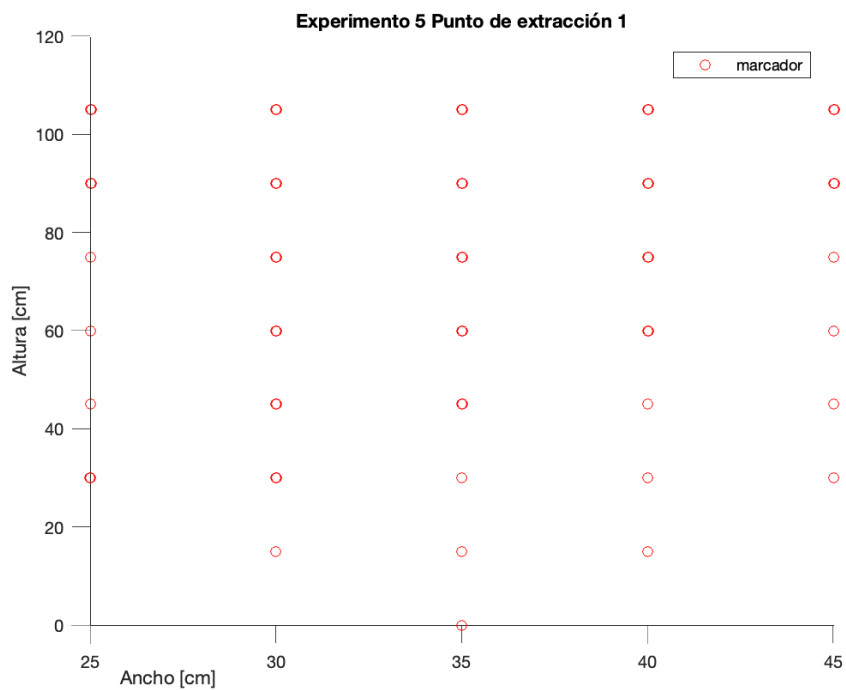


Ilustración 56: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°5 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

Para este caso se tiene que aumentó en 2 extracciones con respecto al caso anterior, en donde para este caso se tiene que se extrajeron 103 marcadores por el punto de extracción n°1. Sin embargo, al analizar la forma de la elipsoide extraída por dicho punto, se tiene prácticamente es la misma con relación a los anteriormente estudiados, donde para este caso, la diferencia radica principalmente que en la cota n°4, es decir, a una altura de 45[m] en la realidad, se extrajeron 2 marcadores nuevos de cuanto $y=15$, donde en uno de los marcadores se tiene que en la coordenada x se encuentran la línea en que sitúa el punto de extracción n°1 ($x=35$) y el otro marcador corresponde a su vecino cercano, es decir al marcador cuya coordenada es (30,15,45).

Por último, en este caso no se tiene una excepción con respecto a la dimensión del diámetro de la elipsoide extraída, la cual corresponde a 24-30[m] a escala real y en donde dicha dimensión la alcanza desde la cota n°3 lo que equivale a una altura de 30[m] desde el nivel de producción.

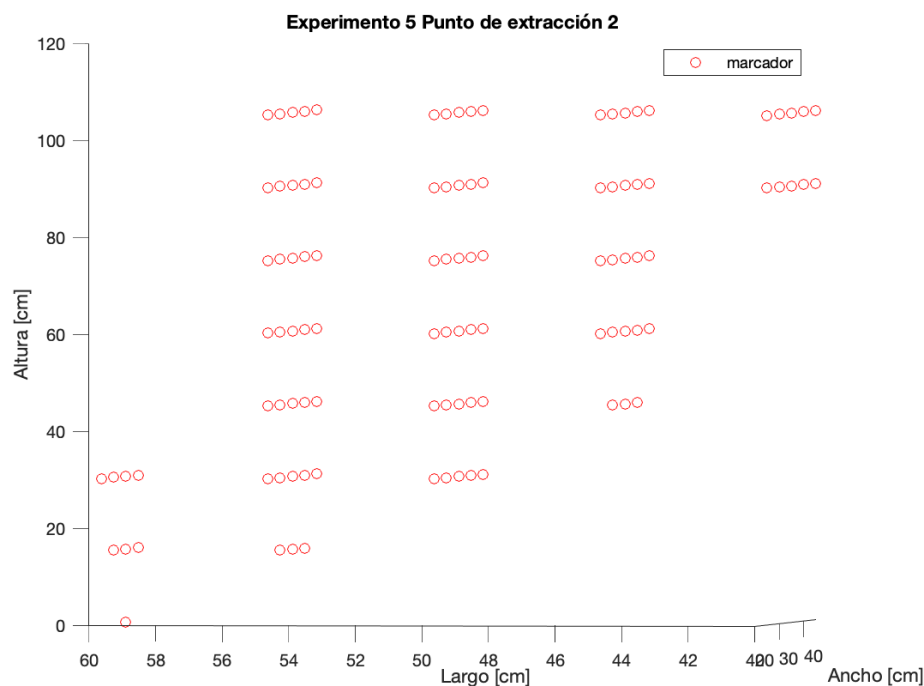


Ilustración 57: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°5 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

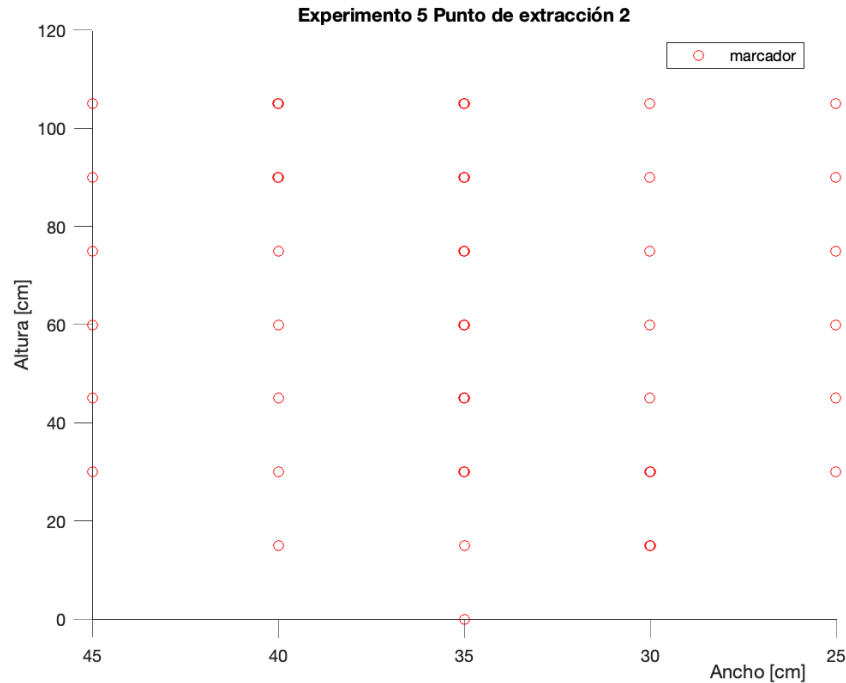


Ilustración 58: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°5 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

Con respecto a la extracción realizada en el punto de extracción n°2, se tiene un similar situación con respecto a lo que paso con el punto de extracción n°1, donde para este escenario se realizó un total de 104 extracción equivalentes a 104 marcadores extraídos por dicho punto.

En cuanto a la disposición de estos marcadores dentro de la batea fueron similares al experimento n°4, la diferencia radica de igual forma como lo que pasó en el punto de extracción n°1 en la cota n°4, es decir a 45[m] de cota se extrajeron en este caso 3 marcadores más de lo que se venía obteniendo en los casos anteriormente descritos. La disposición de los 3 marcadores se centra en la coordenada x donde se sitúa el punto de extracción, es decir, cuando $x=35[m]$ y los dos restantes marcadores estaban situados al lado izquierdo y derecho respectivamente, con valor de la coordenada igual a 15[m] a escala real.

Por otro lado, la dimensión del diámetro de la elipsoide extraída corresponde a la anteriormente obtenida en los casos anteriores, es decir, a 24-30[m] de diámetro donde dicha medida la alcanza a una cota igual a 30[m].

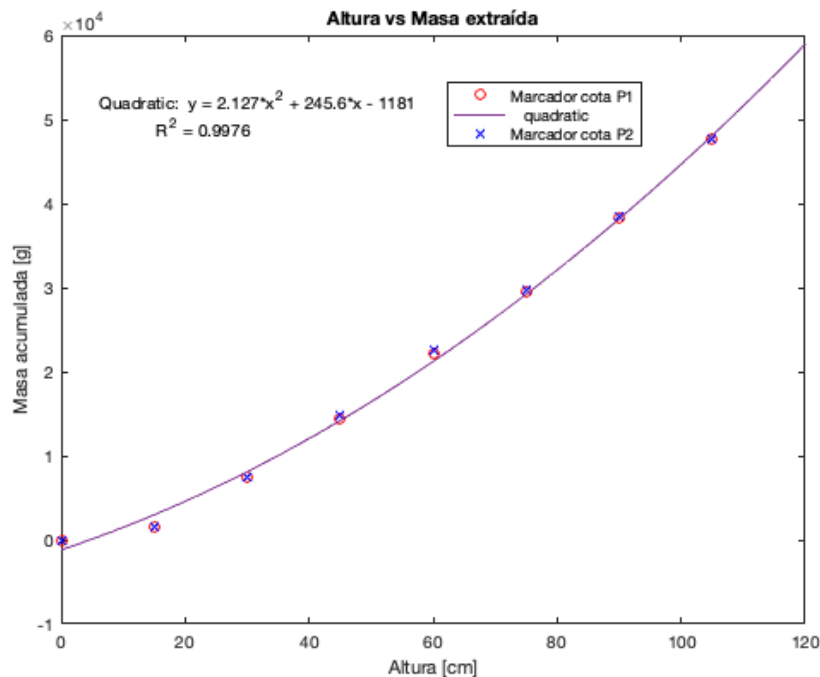


Ilustración 59: Masas acumuladas luego de las 103 y 104 extracciones realizadas por el punto de extracción N°1 y 2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

Dado la anterior ilustración, se tiene que para este caso se realizaron un total de 103 y 104 extracciones desde el punto de extracción n°1 y 2 respectivamente, donde se visualiza una similitud con respecto a la tasa de mineral extraída desde la batea. En cuanto a la mayor diferencia de esta tasa de extracción se puede visualizar en la cota 4 (45[m] de altura) lo que responde al marcador adicional que se extrajo en aquella cota en comparación a los extraídos por el punto de extracción n°1.

A diferencia de los casos anteriores desde el punto de extracción n°2 se tiene una mayor tasa de extracción con respecto a lo extraído por el punto n°1, lo que en masa total extraída es de 47 623 [g] y 47 709[g] correspondiente al punto de extracción n°1 y 2 respectivamente, habiendo un diferencia de 86[g] entre ambas extracciones, cuyo detalle de cada extracción se encuentra en el Anexo C.

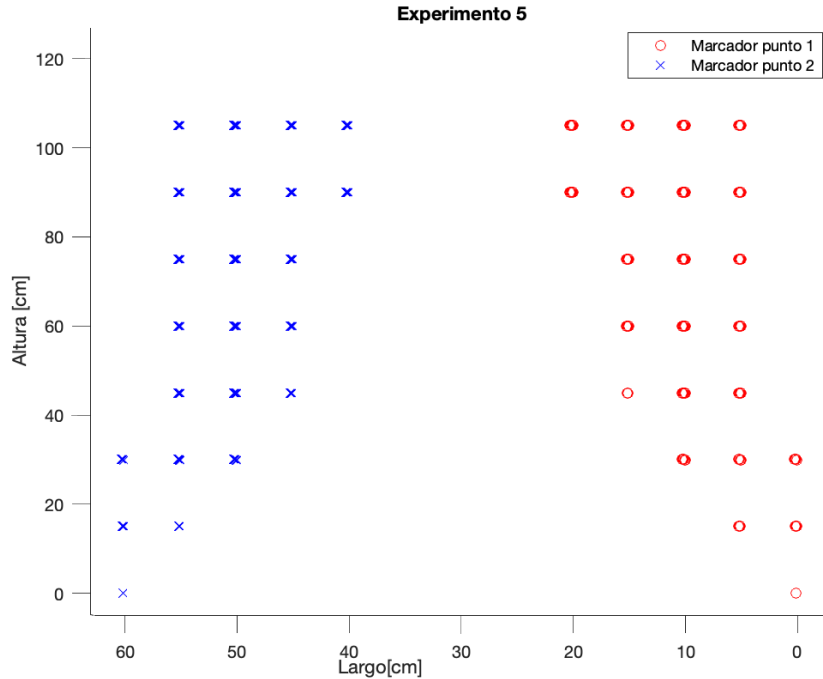


Ilustración 60: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°5 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

Por último, en cuanto a la anterior ilustración, si visualiza lo antes obtenido por cada caso experimentado, en donde el desplazamiento de la elipsoide es de 5[m] de la pared y de 10-15[m] del centro de dicha elipsoide, dado que el marcador obtenido de la cota más alta (cota n°8) fueron el 8hC y 8hJ correspondiente a las coordenadas (35,10,105) y (35,45,105) respectivamente, de la misma forma, el desplazamiento se empezó a visualizar desde la cota n°4 para ambas elipsoides extraídas.

5.3.6 Dos puntos de extracción distanciados a 45 [cm]

Para este caso, la pared movable que contiene al punto de extracción n°2 se fijó en un valor de $y=45$ [m] distantes la pared que contiene en su parte inferior al punto de extracción N°1, es decir, para un $y=J$, es decir, el distanciamiento entre ambos puntos es de aproximadamente $1,5D_{ZEA}$ correspondiente a lo que ya se viene obteniendo y repitiendo en los casos ya planteados.

De lo anterior se tiene que para este caso se dispusieron un total de 1.200 marcadores. Una vez realizado la extracción completa de cada columna formada en cada punto de extracción, se obtuvieron los siguientes resultados graficados en las ilustraciones presentadas a continuación.

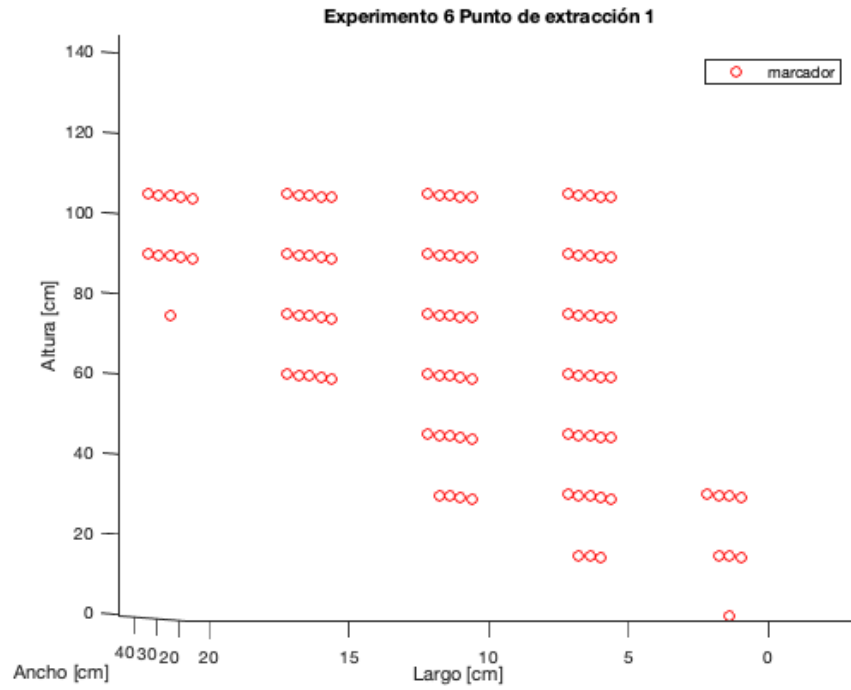


Ilustración 61: Vista Noroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°6 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

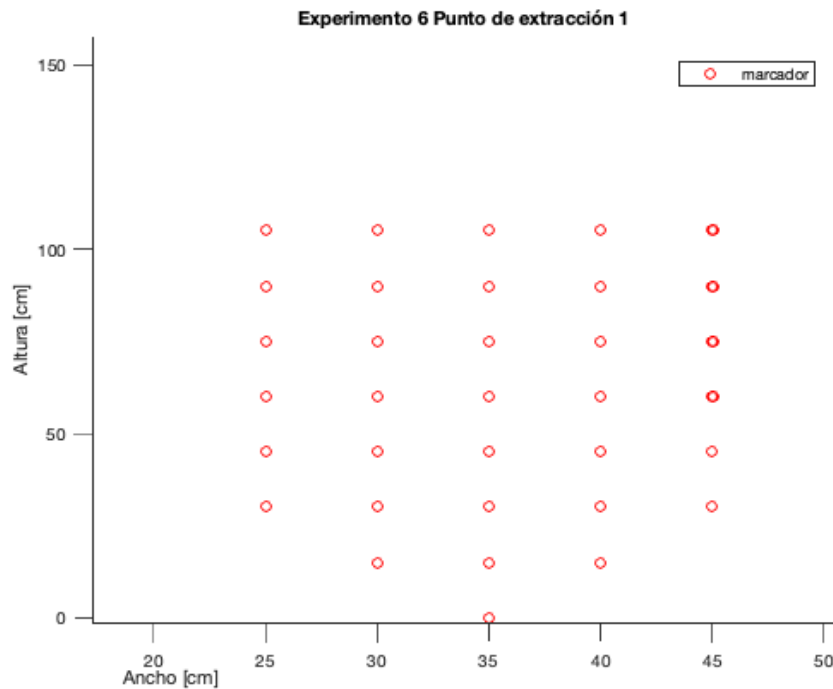


Ilustración 62: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°6 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

En las ilustraciones anteriormente presentadas, se puede visualizar que en el punto de extracción n°1 se realizaron un total de 101 extracciones equivalentes a 101 marcadores extraídos.

En cuanto a la disposición original de los marcadores dentro de la batea, se tiene que esta fue muy similar a lo que ya se viene obteniendo con respecto a los casos ya estudiados, donde la diferencia en este caso radica en que se obtuvo un marcador más en la cota n°6 correspondiente a una altura de 75[m], lo cual puede ser debido a una mínima interacción entre las dos elipsoides contenidas en la batea.

Por otro lado, se tiene que el diámetro de la elipsoide (D_{zca}) es de aproximadamente 24-30 [m], lo que responde al patrón que se viene obteniendo en los casos estudiados.

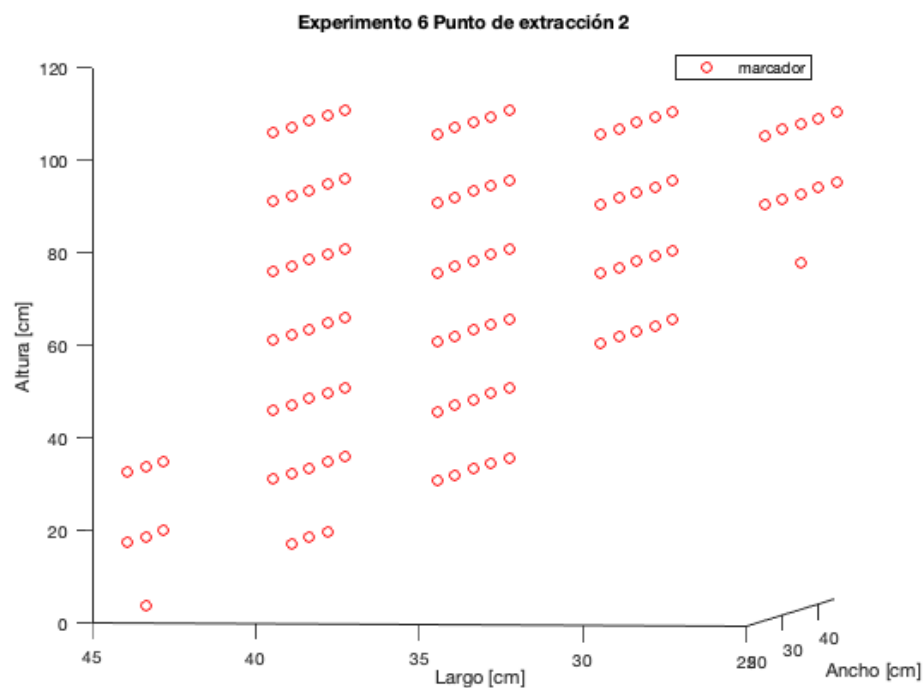


Ilustración 63: Vista Sur-Oeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°6 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

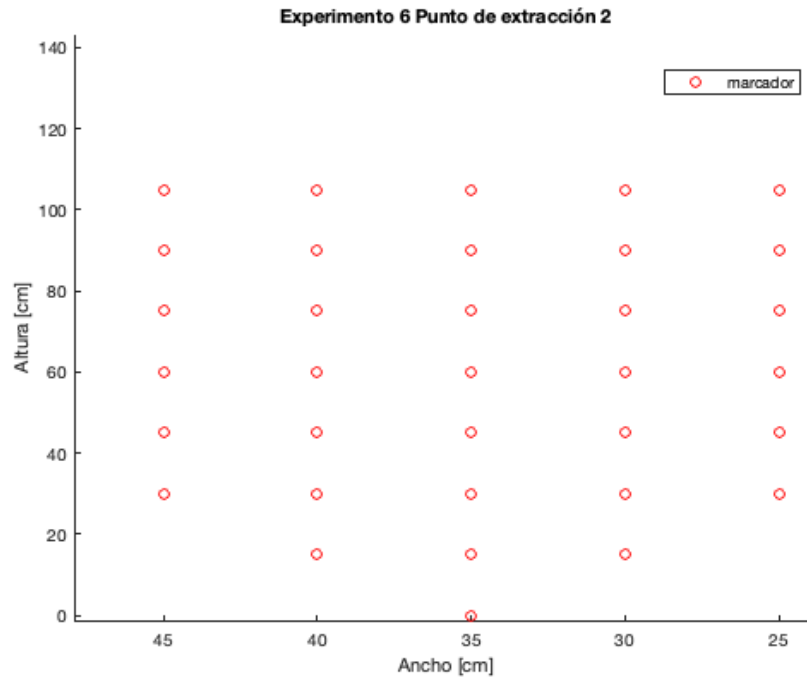


Ilustración 64: Vista Norte de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°6 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

En cuanto al punto de extracción n°2, se tiene una similar estructura de la disposición de los marcadores extraídos después de haber extraído 101 marcadores al igual que lo fue en el otro punto de extracción. Para este punto de extracción, se tiene que el marcadores diferente que se obtuvo con respecto a los otros casos ya estudiados corresponde a un marcador obtenido de la cota n°6, el cual podría responder a la mínima interacción de movimiento que puede causar la extracción de dicha elipsoide sobre la otra.

Por último, se tiene que el D_{zca} obtenido para este punto también se encuentra en el rango de 21-30[m], dicha dimensión se obtiene a una altura de la elipsoide igual a 30-45[m]el cual como se puede visualizar en la ilustración n°64.

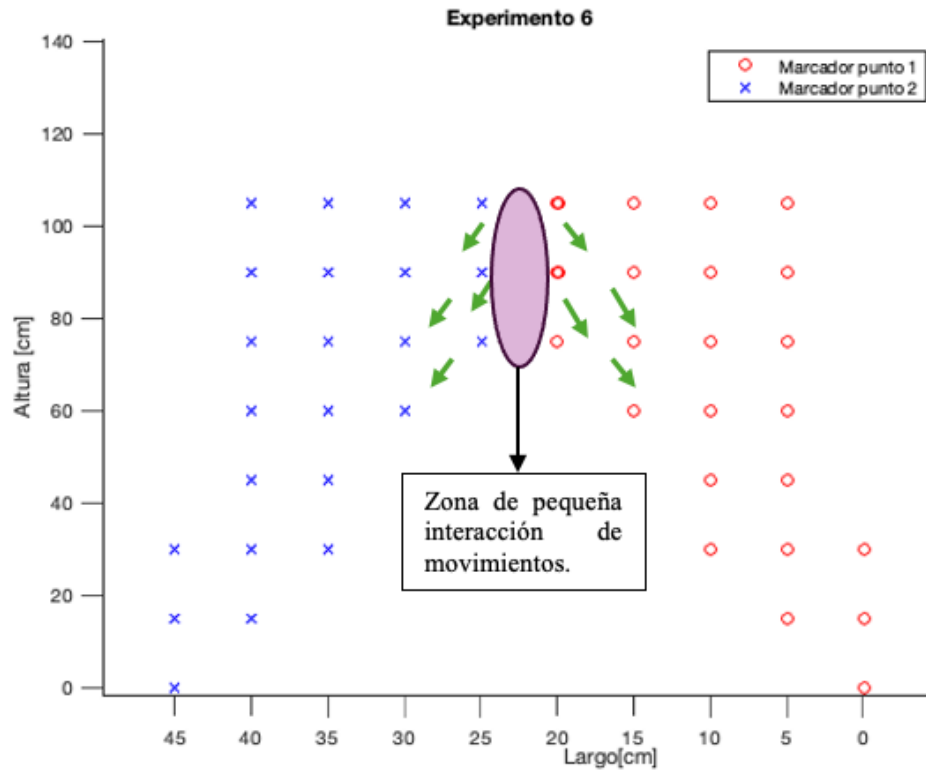


Ilustración 65: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°6 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

En la anterior ilustración, se puede visualizar la zona de pequeñas interacciones de movimientos provocadas por el acercamiento de ambas elipsoides, donde estas interacciones mínimas podrían haber causado la posterior extracción de los marcadores 6hE y 6hF correspondientes a la coordenada (35,20,75) y (35,25,75) respectivamente.

Por otro lado, se tiene que el desplazamiento tanto de la elipsoide generada por el punto de extracción n°1 y 2 respectivamente fue de 10-15[m] aproximadamente desde cada pared hasta el centro de dicha elipsoide.

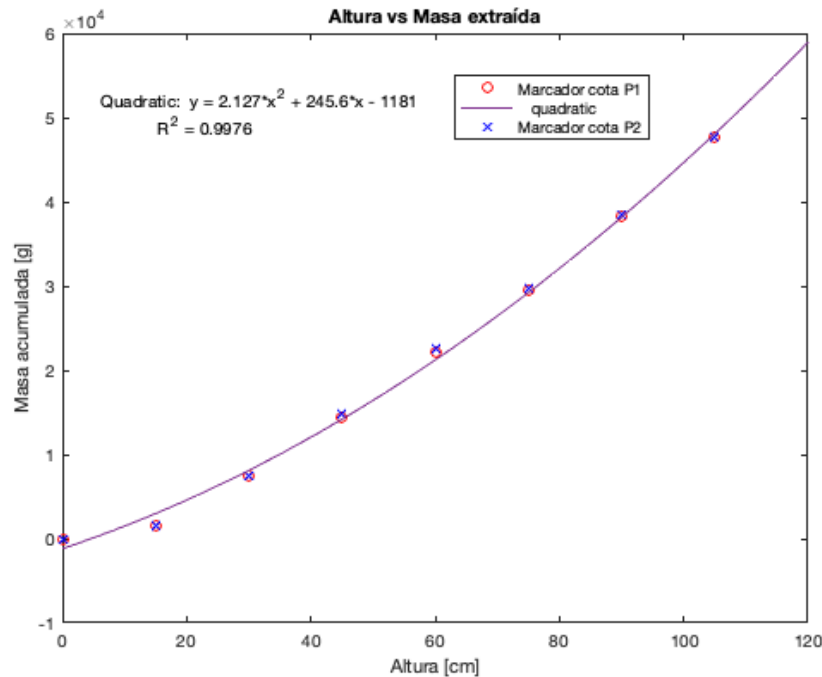


Ilustración 66: Masas acumuladas luego de las 101 extracciones realizadas por el punto de extracción N°1 y 2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

En la ilustración anterior, se tiene que después de haber realizados las 101 extracciones por cada punto de extracción de forma alternada y a una altura de batea aproximadamente de 110[m], las masas totales extraídas desde el punto de extracción n°1 y 2 fue de 47 604 y 47 552 [g] respectivamente, conllevando con ello a un similar comportamiento a lo largo de las extracciones con respecto a la masa extraída desde cada cota en donde el resultado final como se puede visualizar en el Anexo C se obtuvo una diferencia de 52[g] de material extraído por cada columna.

Luego de hacer la gráfica con la masa extraída desde cada cota y cada punto de extracción (Anexo C) respectivamente, se tiene que la función que mejor describe dichas extracciones es de tipo cuadrática con un coeficiente R^2 igual a 0,9976, también se visualiza que a una altura de 60-75 [m] hubo una extracción en dichas cotas un poco mayor con respecto a la curva de extracción descrita por la función cuadrática y que responde al esquema de la zona de pequeñas interacciones de movimientos provocadas por las 2 elipsoides extraídas.

5.3.7 Dos puntos de extracción distanciados a 40 [cm]

Para este caso, la pared movable que contiene al punto de extracción n°2 se fijó en un valor de $y=40$ [m] distantes la pared que contiene en su parte inferior al punto de extracción N°1, es decir, para un $y=I$, es decir, el distanciamiento entre ambos puntos es de aproximadamente $1,42D_{zca}$. El distanciamiento se disminuyó en 5[m] ya que para el caso anteriormente

estudiado (distanciamiento de 45[m]) se obtuvo una pequeña interacción entre ambas elipsoides.

De lo anterior se tiene que para este caso se dispusieron un total de 1.080 marcadores. Una vez realizado la extracción de cada columna, se obtuvieron los siguientes resultados graficados en las ilustraciones presentadas a continuación.

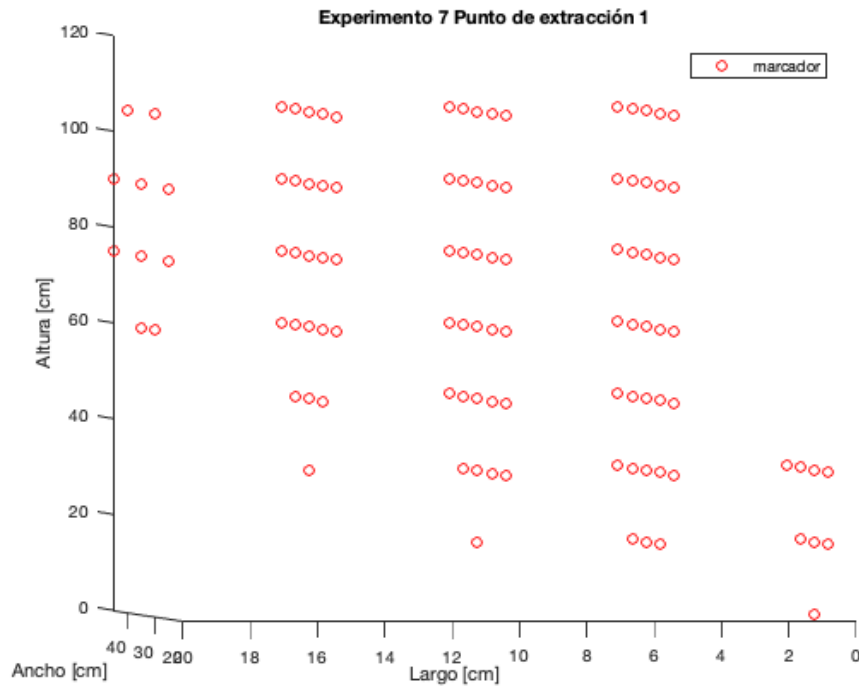


Ilustración 67: Vista Noroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°7 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

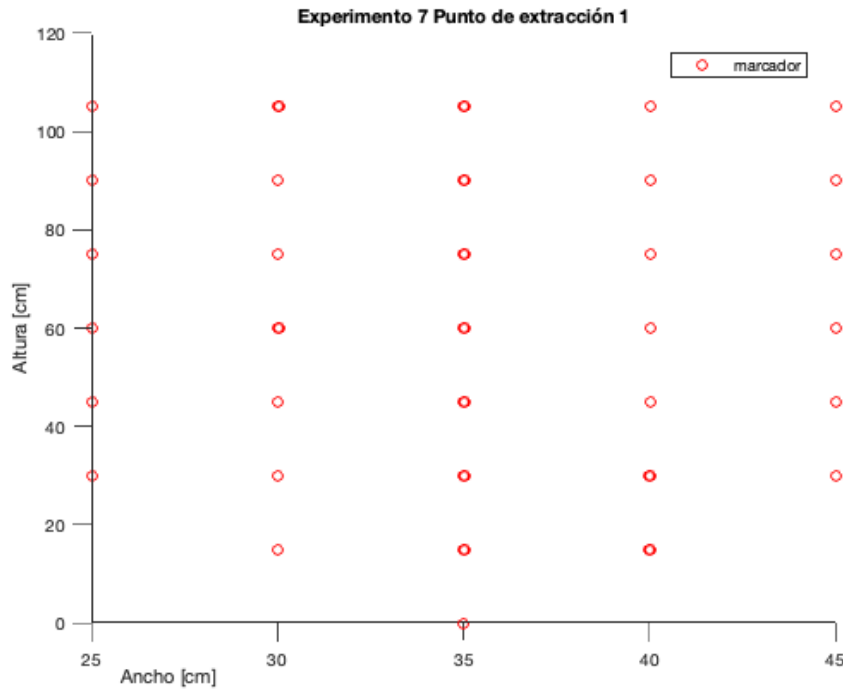


Ilustración 68: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°7 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

Con respecto a la extracción realizada en el punto n°1, se obtuvieron un total de 105 marcadores, los cuales se dispusieron en la forma graficada en las ilustraciones anteriores, en donde se puede visualizar que la forma y disposición de los marcadores corresponden a lo ya obtenido en los casos anteriores, con la diferencia que en $y=20[m]$ hubo una interacción entre los dos elipsoides, además se extrajeron 4 marcadores correspondientes a la cota 2, 3 y 4 respectivamente, lo cual puede responder a la interacción de los elipsoides.

Por otro lado se tiene que el D_{zca} de la elipsoide es de 24-30[m] respectivamente, la cual se logra desde una altura igual a 30[m] aproximadamente.

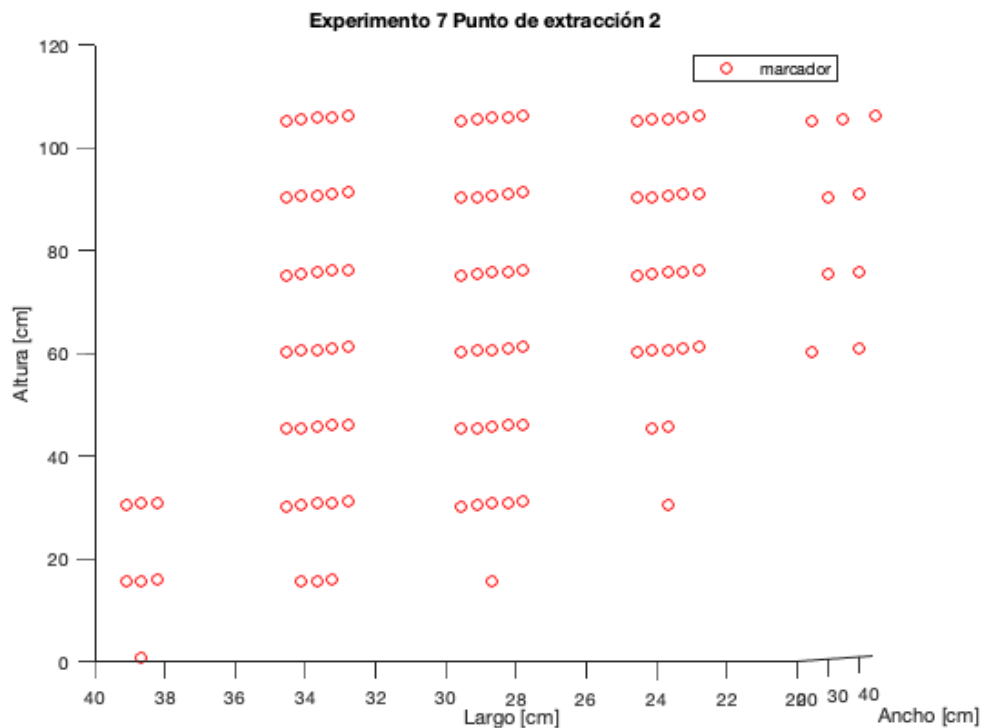


Ilustración 69: Vista Suroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°7 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

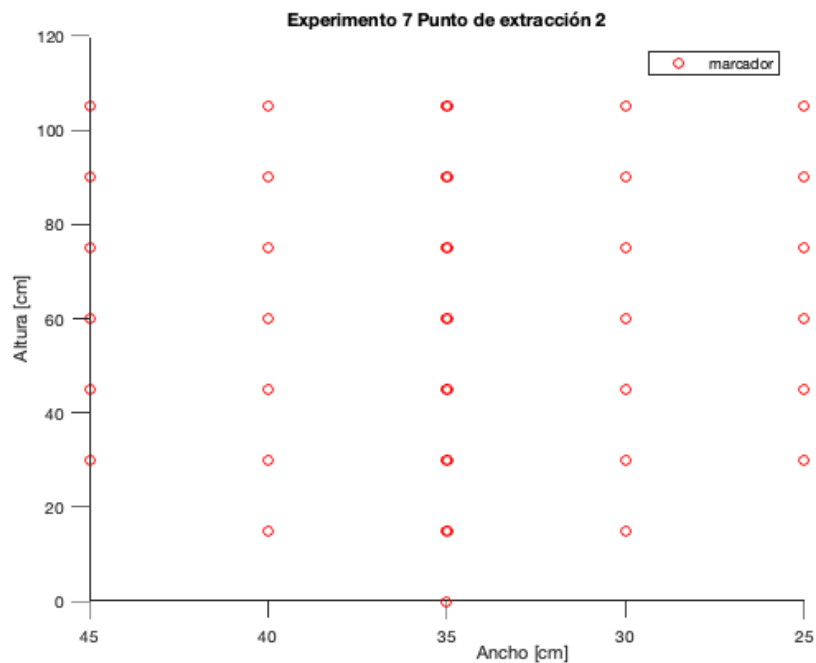


Ilustración 70 Vista Norte de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°7 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

Con respecto al punto de extracción n°2, se obtuvo un similar comportamiento con respecto a lo descrito por el punto de extracción n°1, con la diferencia que en este punto se obtuvieron

o se extrajeron un total de 103 marcadores y el D_{zea} correspondió al mismo rango ya obtenido (24-30 [m]).

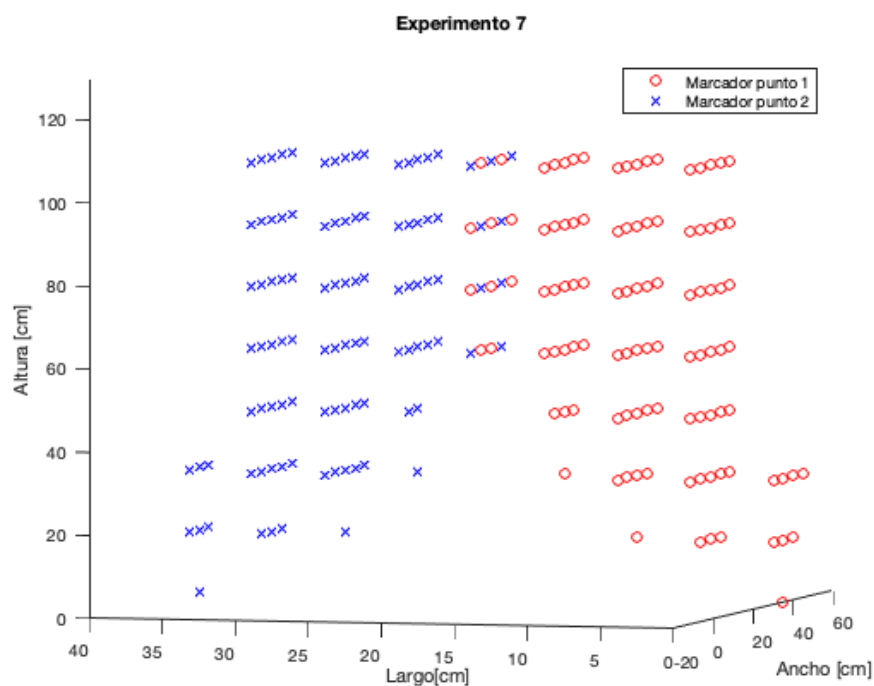


Ilustración 71: Vista Sureste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°7 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

Visualizando la ilustración anterior, se verifica el desplazamiento con respecto a cada pared de aproximadamente 5[m] de la elipsoide y de 5-10[m] respecto al centro de esta.

Por otro lado, se tiene que para este caso hubo una interacción entre las elipsoide, sin embargo, esta resultó ser positiva para efectos de obtener una mayor eficiencia en la recuperación de mineral sin que se vea afectado la masa extraída al terminar la extracción de dichas elipsoides formadas por cada punto. Lo anterior se respalda con la siguiente ilustración.

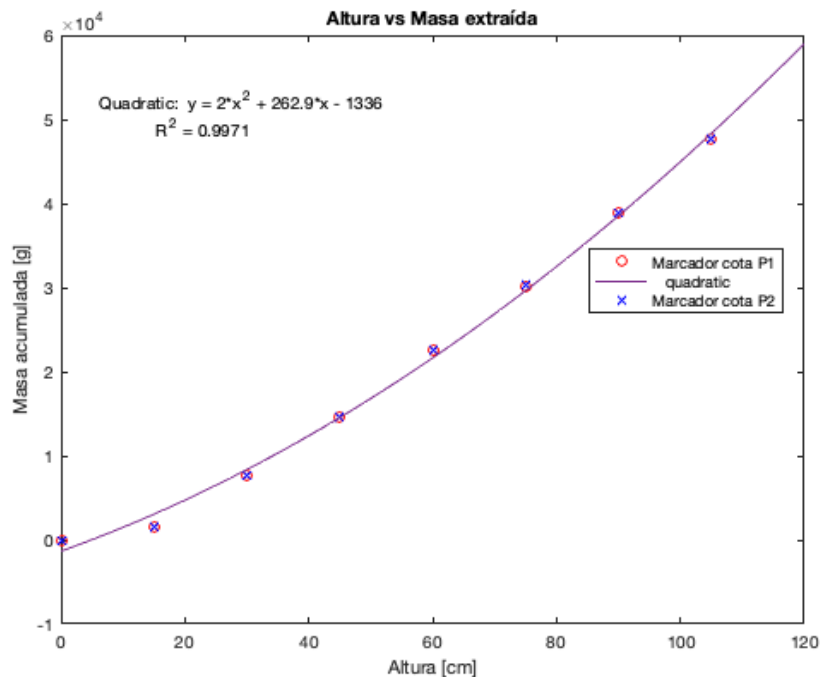


Ilustración 72: Masas acumuladas luego de las 105 y 103 extracciones realizadas por el punto de extracción N°1 y 2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

Dado la anterior ilustración se tiene que después de realizada las 2 extracciones de dichas columnas la masa total extraída por el punto n°1 y 2 fue de 47 641 y 47 595 [g] respectivamente que equivalente a la extracción de 105 y 103 marcadores. Dicho lo anterior, se tiene que si bien hubo interacción entre ambas elipsoides, esta no afectó de forma negativa a la masa extraída desde cada punto y el comportamiento que mejor se ajusta a las extracciones es un tipo de función cuadrática con un coeficiente R^2 igual a 0,9971.

5.3.8 Dos puntos de extracción distanciados a 30 [cm]

Para este caso, la pared movable que contiene al punto de extracción n°2 se fijó en un valor de $y=30[m]$ distantes la pared que contiene en su parte inferior al punto de extracción N°1, es decir, la pared movable se fijó en $y=G$.

De lo anterior se tiene que para este caso se dispusieron un total de 840 marcadores, es decir, 105 marcadores por cada cota.

Una vez realizado la extracción completa de cada columna formada en cada punto de extracción, se obtuvieron los siguientes resultados graficados en las ilustraciones presentadas a continuación.

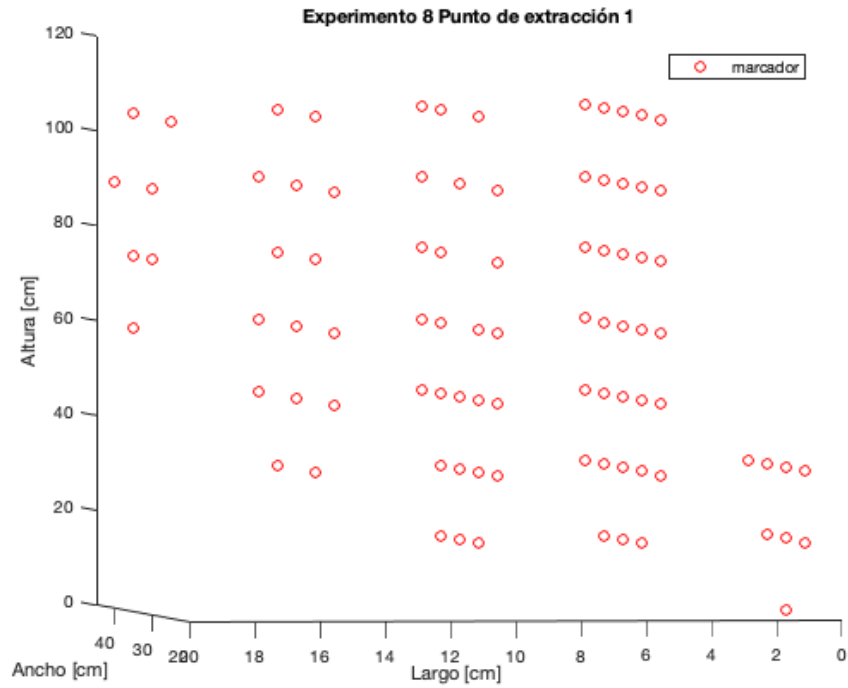


Ilustración 73: Vista Noroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°8 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

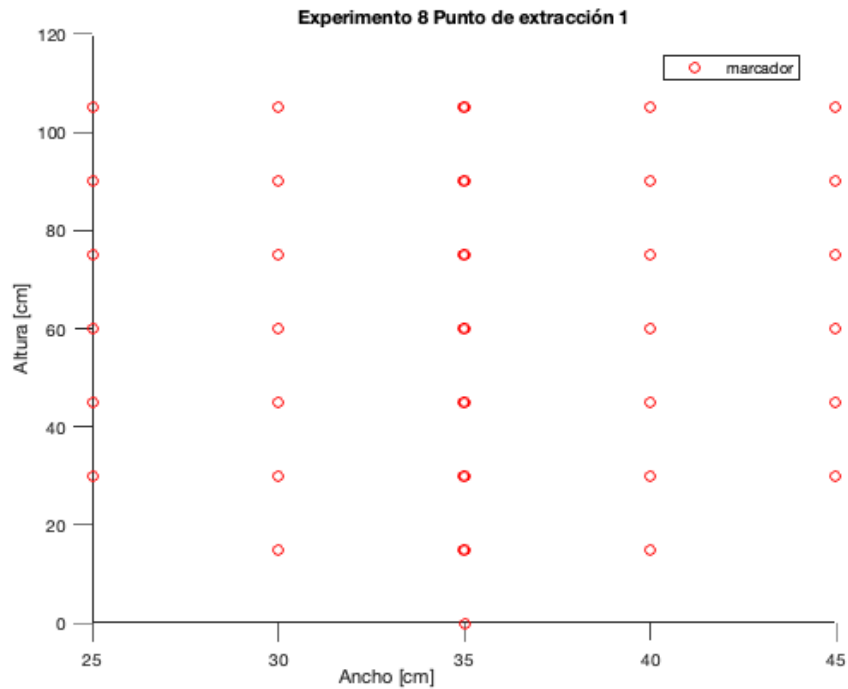


Ilustración 74: Vista Noroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°8 correspondiente al punto de extracción N°1. Elaboración propia mediante Matlab.

En las ilustraciones anteriormente presentadas, se puede visualizar que en el punto de extracción n°1 se realizaron un total de 88 extracciones equivalentes a 88 marcadores extraídos. En cuanto a la disposición original de los marcadores dentro de la batea, se tiene que para este caso, a una altura desde los 30[m] las elipsoide de extracción de cada punto se empezaron a fusionar, lo cual a medida en se avanza en la altura de la batea, este fenómeno se va visualizando de mayor forma produciéndose incluso que a una altura 60[m] en adelante las columnas se fusionaron casi por completo.

Por otro lado, se tiene que el diámetro de la elipsoide (D_{zea}) es de aproximadamente 24-30 [m], lo que responde al patrón que se viene obteniendo en los casos estudiados.

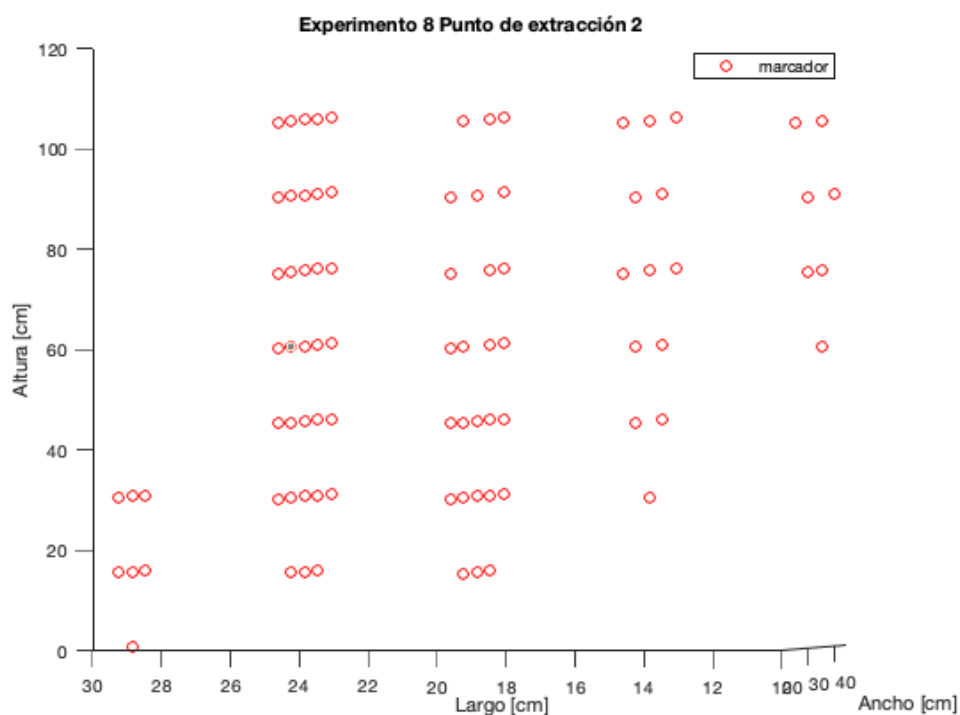


Ilustración 75: Vista Suroeste de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°8 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

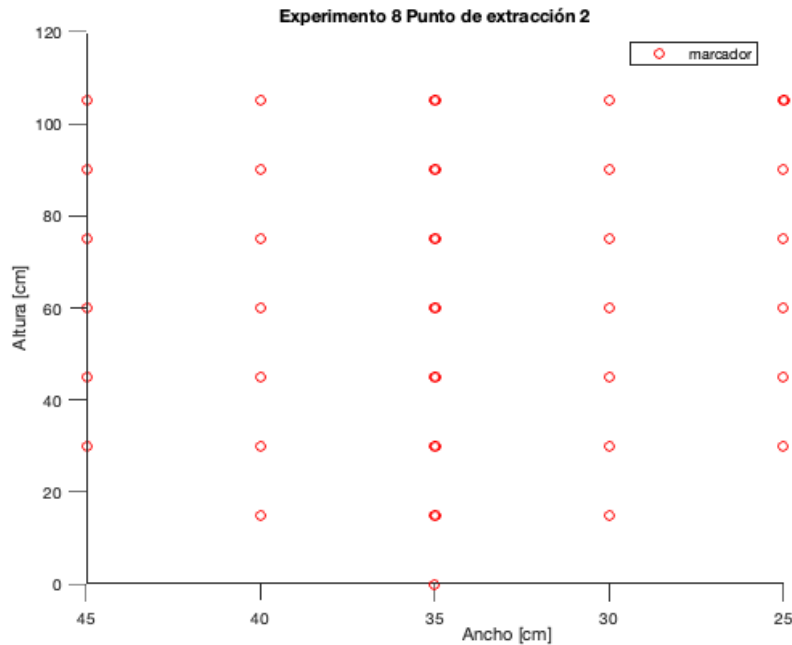


Ilustración 76: Vista Sur de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°8 correspondiente al punto de extracción N°2. Elaboración propia mediante Matlab.

Para este punto de extracción se tiene que se extrajeron un total de 86 marcadores, conllevando de esta forma una disminución de marcadores del 12% aproximadamente con respecto a lo que se venía observando en los casos ya realizados. Con respecto al D_{ZEA} se tiene que se mantuvo la dimensión de 24-30[m] la cual se visualiza desde una altura de 30[m] aproximadamente.

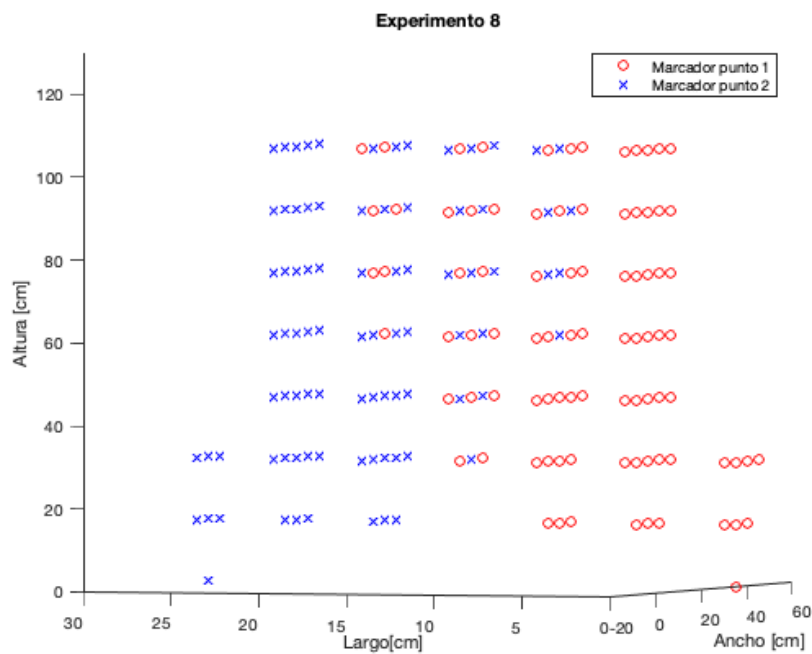


Ilustración 77: Vista Este de la distribución de los marcadores extraídos en el experimento N°8 correspondiente al punto de extracción N°1 y N°2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

Dado la ilustración anterior, se puede visualizar que para un distanciamiento entre puntos de extracción igual a $1D_{zca}$, es decir, a 30[m] de separación, se tiene que para este caso se produjo una fusión de las dos elipsoides de extracción, lo cual se visualiza desde los 30[m] de altura, en donde la eficiencia de recuperación llevada a escala de la industria minera es bastante baja ya que deja espacios entre medio de puntos dado el efecto de fusión de elipsoides, esto en la siguiente ilustración resultará negativo en temas de masas extraídas por cada punto.

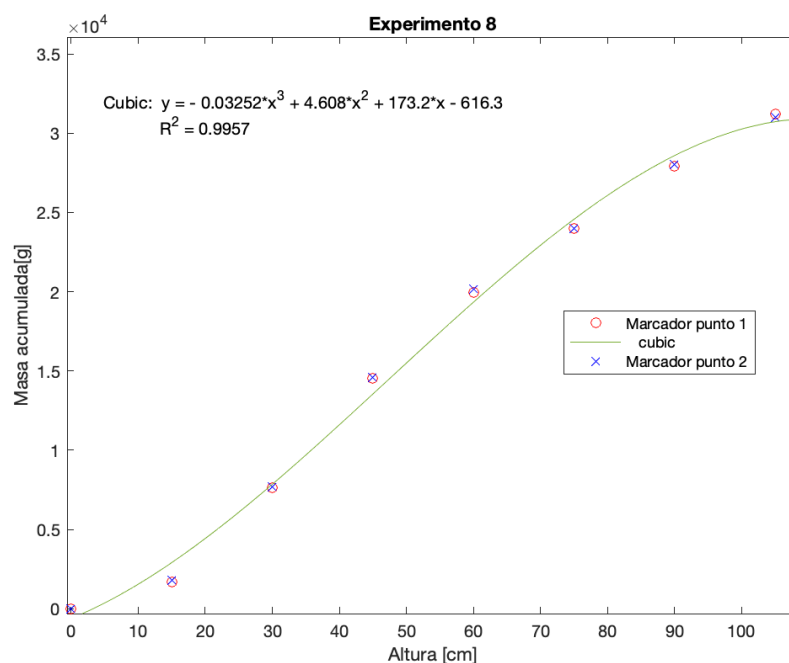


Ilustración 78: Masas acumuladas luego de las 88 y 86 extracciones realizadas por el punto de extracción N°1 y 2 respectivamente. Elaboración propia mediante Matlab.

Como se puede visualizar en la ilustración, la extracción en un principio hasta la altura de 30[m] aproximadamente tiene un comportamiento cuadrática o exponencial al igual como se venía visualizando en este tipo de gráficos en los diferentes casos anteriormente planteados, sin embargo, como ya se describió en la ilustración n°71, las elipsoides se empezaron a “fusionar” provocando que la eficiencia de recuperación del mineral disminuyera pero esta no fue capaz de algún modo equiparar la masa no extraída en los lugares en que las elipsoide se fusionar y empezaron a combatir por un misma columna de mineral, como fue lo que pasó desde la altura de los 30[m] aproximadamente y esto recalzó en una menor extracción de marcadores por el punto de extracción n°1 y 2, en los cuales se extrajeron 88 y 86 marcadores resultado en la extracción de 31 184 y 31 007 [g] por cada punto respectivamente.

Es de esta forma en que comparado con las tasas de extracción que se venían presentando en los otros casos ya realizados y que fue de alguna forma constante a lo largo de esto, se tiene que para este caso hubo una extracción del 35% menos de mineral con respecto a la tasa de extracción que se venía dando en todos los casos anteriores.

6 CONCLUSIONES

En el presente estudio se han llevado a cabo un conjunto de casos con sus respectivos análisis sobre el comportamiento de las elipsoide de extracción producidas por 2 puntos de extracción, los cuales fueron modificando su cercanía el uno del otro para analizar el comportamiento de dichas elipsoide con la presencia de otra en sus cercanías.

En primera instancia se estudió el comportamiento de una sola elipsoide activa, en donde se estudió las dimensiones de la elipsoide extraída en cada caso y de la misma forma se identificaron la creación de las zonas de extracción aislada (ZEA), la anterior identificación de dichas zonas se realizar una vez realizada la extracción completa de dicha elipsoide, en donde se estudió el orden que fueron saliendo por el punto de extracción cada marcador con su respectiva coordenada, dicho orden se estudió mediante el modelamiento de gráficos en 3D mediante el software *Matlab*, en el cual cuando ya se realizó toda la extracción de la elipsoide se procedió a la demarcación de la dichas zonas que se puede visualizar en la ilustración nº30 y 31 respectivamente.

De la misma forma, al realizar una serie de casos y estableciendo un distanciamiento entre puntos cada vez menor, se obtuvo en primera instancia que para todos los casos estudiados el desplazamiento de la elipsoide extraída con respecto a la pared fija fue de 10-15 [m] de desplazamiento desde el centro de dicha elipsoide con una altura de 105,7[m] llenado con material y un D_{ZEA} igual a 24-30 [m] a escala real. De la misma forma se obtuvo que a una distancia de 1,4 veces el diámetro de la elipsoide (D_{ZEA}) la eficiencia de recuperación entre las dos elipsoides fue la mejor, resultando una interacción mínima entre las dos elipsoides, es decir, no provocó fusión de estas como se puede visualizar a continuación.

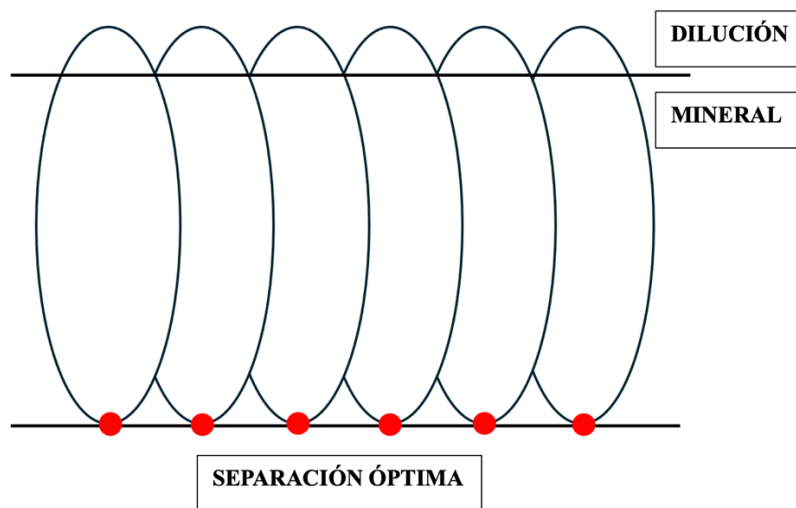


Ilustración 79: Representación de un distanciamiento optimo entre elipsoides. (Encina & Letelier).

Por otro lado, se obtuvo que a un distanciamiento menor a un D_{ZEA} se produce una interacción negativa, provocando con ello una reducción notoria del volumen extraído por las dos elipsoide dado la fusión de estas como se puede visualizar en la siguiente ilustración.

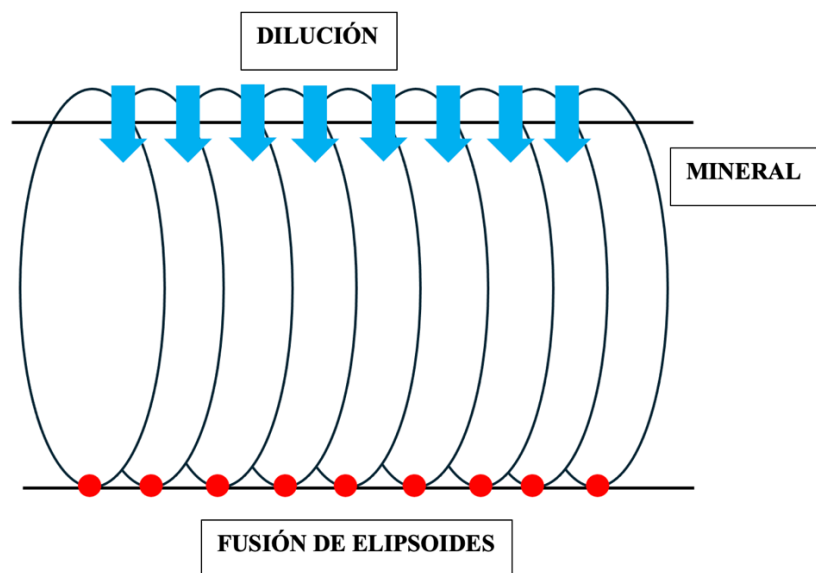


Ilustración 80: Fenómeno de fusión entre elipsoides. (Encina & Letelier).

Lo anteriormente descrito, también se puede visualizar en el siguiente gráfico, en el cual se grafica la masa extraída desde los 2 puntos de extracción tanto en el experimento 7, el cual es considerado como el que contiene un distanciamiento entre puntos de extracción óptimo versus el experimento 8 en el cual el distanciamiento entre puntos es igual a $1D_{ZEA}$ entregando resultados no óptimos a niveles de extracción subterránea, lo que resultó en una disminución del 35% con respecto a la tasa de extracción presente en el experimento 7, lo que conlleva en una disminución de la eficiencia en la recuperación del mineral fracturado, dado que extraer una cierta cantidad de volumen de mineral se necesitan una mayor cantidad de puntos de extracción como lo es en el distanciamiento del experimento 8, lo que conlleva un aumento en los costos de extracción debido a un aumento de los puntos de extracción para ese volumen de mineral, por otro lado, en el experimento 7 el distanciamiento es el óptimo dado que la eficiencia de la recuperación del mismo volumen de mineral, involucra tener una menor cantidad de puntos de extracción con respecto al experimento 8.

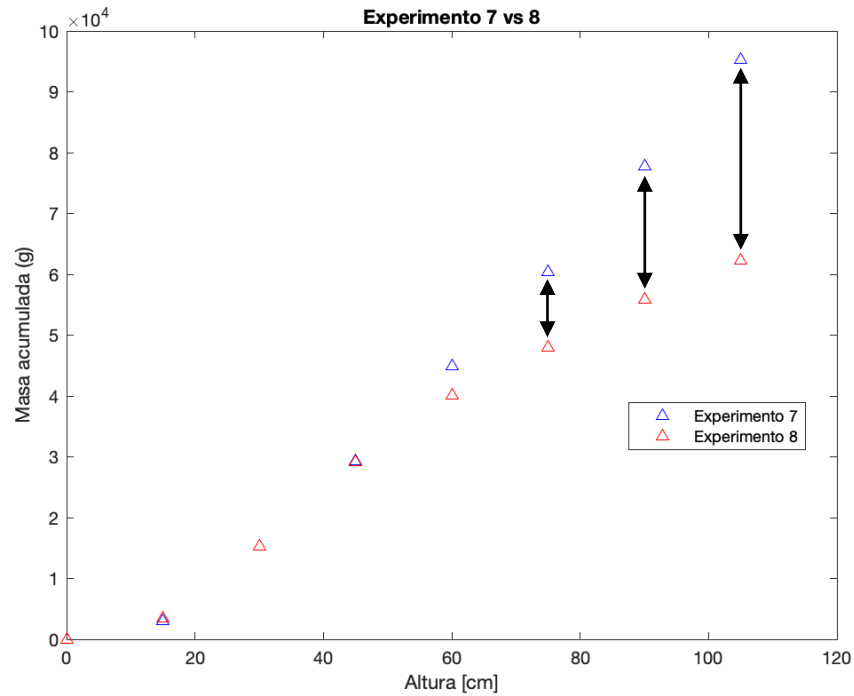


Ilustración 81: Extracción de mineral del experimento 7 versus el experimento 8. Elaboración propia mediante Matlab.

El anterior gráfico se obtiene dado el Anexo D, en donde se puede observar que desde una altura mayor a 45[m], se empieza a observar el fenómeno de la fusión de elipsoides que se produce en el experimento 8, el cual provoca una menor extracción de mineral dado 2 puntos de extracción, esto es debido como ya se detalló por la lucha de extraer una misma columna de mineral dado dos puntos de extracción lo cual se puede visualizar en la ilustración n°77, en la cual se observa que desde una altura mayor a 45[m] o bien desde la cota n°4 las elipsoides empiezan a fusionarse. Lo anterior, provoca que cuando se produce una fusión de elipsoides de extracción se llegue a cierta altura de forma más rápida con respecto a cuando este fenómeno no ocurre, por ende, al llegar más rápido a cierta altura resulta ser negativo en la minería subterránea, ya que la dilución baja de forma más rápido por el centro de las elipsoides, donde la dilución resulta ser negativa para la minería dado que los costos operativos están directamente relacionados con el aumento de la dilución.

Por último, al caracterizar la forma en que se dispusieron los marcadores extraídos dentro de la batea, se observó que dicha forma es de tipo elipsoidal, para comprobar lo anterior, se realizó la comparativa entre el volumen teórico y el volumen experimental de la elipsoide extraída, donde se verificó que dichos resultados equidistaban de tan solo 10 [cm³]. Por otra parte, se observó que las elipsoides formadas por cada punto de extracción al tener una pared fija en su cercanías, le provoca una deformación a la zona de extracción aislada (ZEA), resultando que la forma de esta pase de ser circular a elíptica, con el eje mayor dispuesto de forma paralela a la pared fija y con un dimensión de un 12% aproximadamente más largo que el eje menor.

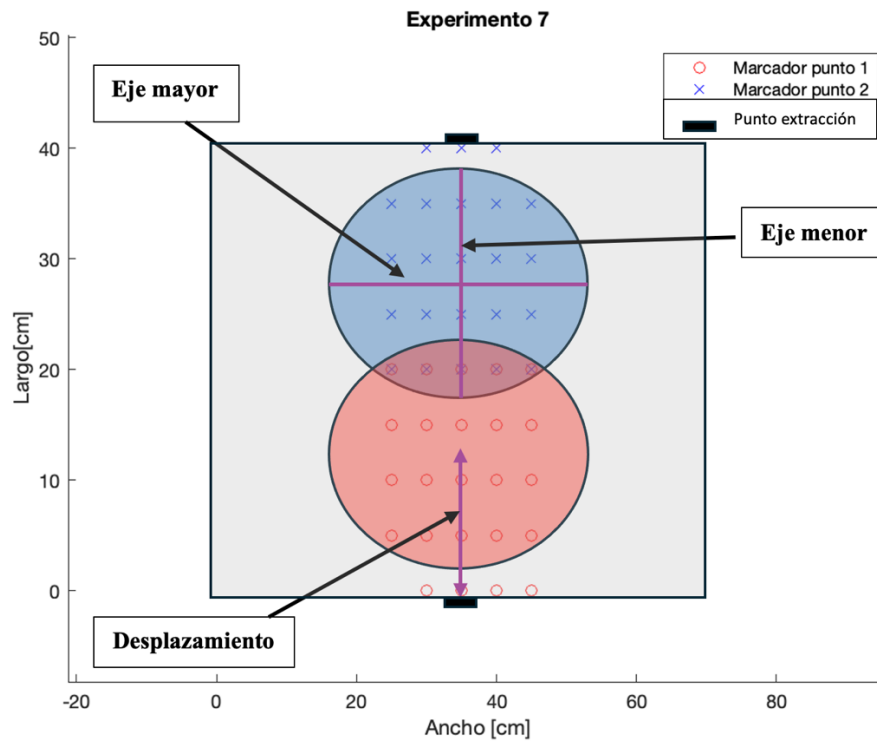


Ilustración 82: Vista superior de la elipsoide extraída. Elaboración propia.

Una vez realizado el estudio de todos los casos, se obtuvo que la función que mejor describe las extracciones de las elipsoides fue de tipo cuadrática con un coeficiente $R^2 > 0,99$, cabe señalar que la humedad también es un factor que afecta en la masa extraída por cada punto de extracción.

REFERENCIAS

- Minería chilllena. (s.f.). *Minería chilena*. Obtenido de <https://www.mch.cl/negocios-industria/mineria-subterranea-en-la-busqueda-de-mayor-produccion/>
- Consejo minero. (s.f.). *Consejo minero*. Obtenido de <https://consejominero.cl/mineria-en-chile/mineria-en-numeros/>
- Consejo minero. (2023). *Mercado mundial de minerales*.
- Freeport. (2020). *Block Cave Underground Mine*.
- ELPHOS Mine Planning Laboratory. (s.f.). Obtenido de <https://delphoslab.cl/index.php/54-dec/pde-2/281-metodos-de-explotacion>
- Universidad Politécnica de Madrid. (2019). *Introducción a la minería subterránea volumen I*. Madrid.
- Cavieres, F. (2013). *Modelo de habilitación de puntos de extracción de minas subterráneas en un sistema de optimización de planes mineros a largo plazo*. Santiago: Universidad de Chile.
- Cavieres, P., Contreras, E., & Arce, J. (2019). *Dimensionamiento de mallas de extracción, bateas recolectoras y pilar corona para método Panel Caving en roca primaria, Mina El Teniente*.
- Andreotti, B. (2013). *Granular media between fluid and solid*.
- Sturla, M., Vivanco, F., & Palma, S. (2022). *Influencia de parámetros físicos del material granular y del diseño de bateas de extracción en el flujo gravitacional en minería Block Caving*. Santiago: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Castro, R. (2006). *Study of the mechanisms of gravity flow for block caving*. Australia: University of Queensland.
- Morales, P., & Salvador, P. (2012). *Mecanismos de entrada de dilución en minas de Block/Panel Caving*. Universidad de Chile.
- Vergara, P. (2016). *Estudio experimental de flujo gravitacional en minería de Panel Caving*. Santiago: Universidad de Chile.
- Pereira, M. (2020). *Simulación de alturas de interacción entre puntos de extracción a través de automatizados celulares*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Langhaar, H. (1980). *Dimensional analysis and theory of models*. Krieger.
- Kvapil, R. (1982). *La mecánica y el diseño de sistemas de hundimiento de subniveles*. Nueva York.
- Kvapil, R. (1992). *Espeleología de subniveles. Manual de ingeniería para PYME*. Colorado.
- Marklund, I., & Hustrulid, W. (1995). *Minería subterránea a gran escala, nuevos equipos y un mejor entorno subterráneo: resultado de la investigación y el desarrollo en LKAB*. Institución de Minería y Metalurgia.
- Kvapil, R. (1992). *Sublevel Caving*. Colorado.
- Castro. (2006). *Study of the mechanisms of gravity flow for block caving*. Brisbane: University of Queensland.
- Laubscher, D. (2000). *Block Cave Manual*. Brisbane.

- Susaeta, A. (2004). *Theory of Gravity Flow*. Santiago .
- Kvapil, R. (2008). *Espeleología de subniveles: pasado y futuro*. Universidad William Hustrulid de Utah.
- Agromarc. (s.f.). *Pesos específicos*. Obtenido de <https://www.agromarc.com.ar/wp-content/uploads/tabla-pesos-especificos.pdf>
- Sánchez, V., Castro, R., & Palma, S. (2019). *Gravity flow characterization of fine granular material for Block Caving*.
- Encina, V., & Letelier, P. (s.f.). *Diseño de puntos de extracción con base en observaciones experimentales de flujo gravitacional de material granulado*.
- Kvapil, & Janelid. (1966). *Sublevel caving*. 53-129. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*.

7 ANEXOS

Anexo A: Detallado de las extracciones realizadas en el experimento n°1 en el punto de extracción n°1. Elaboración propia.

x	y	z	Masa [g]	Evento	Masa acumulada [g]
35	0	0	0	1	0
35	0	15	125	2	125
30	5	15	156	3	281
35	5	15	178	4	459
40	5	15	186	5	645
30	5	30	403	6	1048
40	5	30	800	7	1848
35	5	30	1123	8	2971
35	0	30	608	9	3579
35	10	45	389	10	3968
35	10	30	357	11	4325
40	0	15	243	12	4568
40	0	30	97	13	4665
30	0	15	603	14	5268
40	5	45	634	15	5902
45	0	30	568	16	6470
30	0	30	178	17	6648
30	5	45	1064	18	7712
40	10	30	127	19	7839
35	5	45	886	20	8725
30	10	30	714	21	9439
25	10	45	1214	22	10653
35	10	60	221	23	11574
35	5	60	332	24	12406
40	5	60	236	25	12642
40	10	45	364	26	13006
40	15	60	446	27	13852
25	15	60	363	28	14615
30	5	60	523	29	15138
35	15	60	671	30	15809

45	5	45	587	31	16396
30	10	45	1104	32	17500
40	5	75	93	33	17593
40	10	75	783	34	18376
35	5	75	1237	35	19613
45	10	60	612	36	20225
45	15	60	697	37	20922
30	5	75	256	38	21178
45	10	45	259	39	21437
25	5	60	891	40	22328
40	10	60	479	41	22807
35	10	75	563	42	23370
25	5	45	438	43	23808
30	15	75	213	44	24021
45	5	75	582	45	24603
45	5	60	491	46	25094
35	15	75	386	47	25480
45	10	75	567	48	26047
35	10	90	109	49	26156
25	5	75	380	50	26536
30	15	60	387	51	26923
30	10	60	1166	52	28089
25	10	60	207	53	28296
35	5	90	139	54	28435
30	5	90	191	55	28626
40	5	90	1158	56	29784
35	15	90	406	57	30190
45	15	75	183	58	30373
25	10	90	175	59	30548
40	10	90	172	60	30720
25	5	90	187	61	30907
40	15	75	479	62	31386
25	10	75	107	63	31493
30	10	75	325	64	31818
45	5	30	261	65	32079
45	10	90	490	66	32569

25	5	30	537	67	33106
40	15	90	409	68	33515
25	15	90	1009	69	34524
30	20	90	897	70	35421
25	10	30	256	71	35677
45	5	90	398	72	36075
45	15	90	763	73	36838
25	15	75	861	74	37699
30	15	90	405	75	38104
30	10	90	605	76	38709
35	10	105	1091	77	39800
40	20	90	305	78	40105
25	20	90	291	79	40396
35	20	90	568	80	40964
25	5	105	1134	81	42098
40	5	105	702	82	42800
30	5	105	675	83	43475
40	10	105	989	84	43664
45	5	105	908	85	43772
45	20	90	298	86	44070
30	20	105	600	87	44280
40	15	105	171	88	44451
35	20	105	193	89	44644
30	10	105	143	90	44787
25	20	105	173	91	44960
35	5	105	136	92	45096
30	15	105	148	93	45244
45	20	105	297	94	45541
40	20	105	243	95	45784
25	15	105	288	96	46072
35	15	105	400	97	46472
25	10	105	395	98	46867
45	10	105	472	99	47339
45	15	105	305	100	47644

Anexo B: Detallado de masa extraída por cada punto de extracción y por cada cota en los experimentos 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Elaboración propia.

Parámetro	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3		Experimento 4	
	Punto 1	Punto 2	Punto 1	Punto 2	Punto 1	Punto 2	Punto 1	Punto 2
Cota 1	0	-	0	0	0	0	0	0
Cota 2	1491	-	1543	1528	1604	1490	1581	1556
Cota 3	6029	-	5982	5973	6009	5924	6033	6101
Cota 4	6949	-	6877	6910	6792	6802	6696	7142
Cota 5	7722	-	7598	7617	7491	7588	7410	7180
Cota 6	7015	-	7103	7138	7086	7193	6947	6903
Cota 7	8975	-	8921	8954	8998	9108	9054	9019
Cota 8	9463	-	9604	9490	9587	9488	9640	9557
Masa total extraída [g]	47644	0	47628	47610	47567	47593	47361	47458

Anexo C: Detallado de masa extraída por cada punto de extracción y por cada cota en los experimentos 5, 6, 7 y 8 respectivamente. Elaboración propia.

Parámetro	Experimento 5		Experimento 6		Experimento 7		Experimento 8	
	Punto 1	Punto 2	Punto 1	Punto 2	Punto 1	Punto 2	Punto 1	Punto 2
Cota 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cota 2	1527	1493	1495	1461	1487	1459	1709	1786
Cota 3	5893	5914	6137	5893	6126	6201	5927	5893
Cota 4	6905	7429	6684	6927	6911	7015	6894	6927
Cota 5	7817	7632	7784	7701	7937	7810	5437	5548
Cota 6	7248	7136	7442	7512	7690	7724	4016	3823
Cota 7	8901	8815	8863	8837	8692	8641	3928	4020
Cota 8	9332	9290	9199	9221	8798	8745	3273	3010
Masa total extraída [g]	47623	47709	47604	47552	47641	47595	31184	31007

Anexo D: Extracción de mineral dado los 2 puntos de extracción en el experimento 7 y 8 respectivamente. Elaboración propia.

Cota	Altura [m]	Masa extraída Experimento 7 (g)	Masa extraída acumulada(g)	Masa extraída Experimento 8 (g)	Masa extraída acumulada (g)
1	0	0	0	0	0
2	15	2946	2946	3495	3495
3	30	12327	15273	11820	15315
4	45	13926	29199	13821	29136
5	60	15747	44946	13985	43121
6	75	15414	60360	10839	53960
7	90	17333	77693	11448	65408
8	105	17543	95236	10783	76191