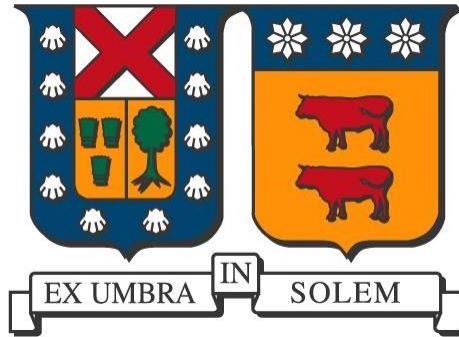


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS METALURGIA Y DE
MATERIALES



MODELACIÓN FÍSICA DE LA DILUCIÓN LATERAL EN HUNDIMIENTO
POR BLOQUES.

Ignacio Antonio Maturana Villegas

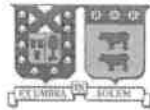
Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía

Víctor Raúl Encina Montenegro

Junio 2025

Santiago, Chile



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Modelación Física de la dilución lateral en hundimiento por bloques

Nombre del candidato(a): Ignacio Antonio Maturana Villegas

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas

Campus: Santiago San Joaquin ; Departamento: Ingeniería de Minas, Metalurgia y Materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Raúl Encina Montenegro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26/06/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/06/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

La presente memoria tiene como objetivo principal estudiar el fenómeno de la dilución lateral en el método de hundimiento por bloques, mediante una simulación física en un equipo especialmente diseñado para representar, a escala 1:150, las condiciones reales de extracción en minería subterránea. El hundimiento por bloques, ampliamente utilizado para la explotación de yacimientos de gran escala, presenta múltiples ventajas en términos de eficiencia operativa, sin embargo, uno de sus principales desafíos es la dilución, entendida como la mezcla involuntaria de material estéril con el mineral útil. Esta situación disminuye la ley del mineral extraído y, en consecuencia, afecta la rentabilidad y sostenibilidad de la operación.

Para abordar este problema, se desarrollaron dos experimentos replicables en un entorno controlado. El equipo experimental utilizó una combinación de gravilla (representando el mineral) y arena (representando el material estéril), distribuidos en capas horizontales, acompañados por una matriz de 69 marcadores por nivel dispuestos en 15 pisos. Estos marcadores fueron clave para monitorear con alta resolución espacial la trayectoria del flujo del material durante cada ciclo de extracción. A través de un riguroso procesamiento de datos, se cuantificó la aparición de los distintos tipos de marcadores y se calculó la dilución por ciclo y de forma acumulada, correlacionándola con el porcentaje de mineral extraído y los patrones de comportamiento del flujo.

El análisis reveló un comportamiento no lineal de la dilución acumulada en función del mineral extraído, con tres zonas claramente diferenciables: una inicial de bajo impacto, una intermedia donde la dilución se incrementa rápidamente por la incorporación de material lateral, y una final con alto contenido de sobrecarga. La curva ajustada obtenida permitió segmentar el proceso en cuatro zonas funcionales, asociadas a la aparición progresiva de marcadores de frontera, laterales y de sobrecarga, estableciendo una relación directa entre la geometría del flujo y los niveles de dilución.

Las visualizaciones tridimensionales en MATLAB permitieron representar gráficamente las trayectorias de los marcadores, zonas de acumulación, y áreas de baja recuperación, aportando una comprensión visual complementaria al análisis numérico. Se concluye que la modelación física es una herramienta válida y eficaz para comprender los mecanismos de dilución en métodos de hundimiento por bloques, proporcionando criterios técnicos valiosos para el diseño de estrategias de control y planificación en minería subterránea, con miras a reducir el ingreso de material estéril y mejorar la eficiencia global del proceso extractivo.

Abstract

This thesis aims to study the phenomenon of lateral dilution in block caving mining through a physical modeling approach using a custom-designed apparatus that replicates the gravitational flow conditions typical of large-scale underground mining operations. Block caving is a cost-effective and widely used mining method for massive ore bodies; however, one of its major technical challenges is dilution—defined as the unintentional mixing of waste material with valuable ore—which results in reduced ore grade and lower economic returns.

To investigate this issue, two controlled experiments were conducted using a vertical simulation column built at 1:150 scale. The experimental setup included layers of gravel (ore) and sand (waste) along with a detailed placement of 69 markers per level over 15 horizontal planes. These markers were used to track the spatial flow of material across multiple extraction cycles. Data collected from marker recovery and weight measurements were processed to calculate per-cycle and cumulative dilution, identifying key stages in the incorporation of waste material and its correlation with the amount of extracted ore.

The results demonstrate a non-linear behavior of cumulative dilution relative to the mass of extracted ore, delineating three primary phases: an initial phase with minimal dilution, a middle phase characterized by rapid increase due to lateral incorporation of waste, and a final stage with significant dilution resulting from overhead material (overload). The adjusted dilution curve allowed for the segmentation of the process into four functional zones, each associated with the appearance of specific marker types (boundary, lateral, and overload), revealing critical thresholds in the dilution process.

Three-dimensional visualizations developed in MATLAB were instrumental in mapping the trajectory and concentration of markers, identifying zones of inefficiency, and validating the consistency of the extraction pattern. This study concludes that physical modeling provides a powerful and accurate method for analyzing dilution mechanisms in block caving, offering practical insights for operational planning and dilution control in real mining environments. The findings have potential application in the development of monitoring strategies, extraction sequence optimization, and decision-making processes aimed at minimizing waste and maximizing ore recovery.

Tabla de contenido

Resumen	2
Abstract	3
1. Introducción	6
1.1 Planteamiento del Problema.....	7
1.2 Objetivos	7
1.3 Motivación	7
2. Marco Teórico.....	8
2.1 Descripción del Método de Hundimiento por Bloques.....	8
2.2 Concepto de Dilución en Minería Subterránea	9
2.3 Modelo de Fragmentación de Hoek y Brown.....	9
2.4 Modelo de Dilución de Lunder	10
2.5 Estudios Previos sobre Dilución en el Hundimiento por Bloques	10
2.5.1 Modelos y Estudios Numéricos	10
2.5.2 Estudios Experimentales	11
2.5.3 Impacto de la Dilución en la Rentabilidad.....	11
2.5.3.1 Aumento de los Costos Operacionales.....	12
2.5.3.2 Reducción de la Recuperación del Mineral Valioso.....	12
2.5.3.3 Impacto en la Vida Útil de la Mina	13
2.5.3.4 Impacto Ambiental	13
2.5.4 Herramientas y Tecnologías para Controlar la Dilución	14
3. Metodología	14
3.1 Descripción del Equipo de Simulación	14
3.2 Marcadores	15
3.3 Material Granular	16
3.4 Alcances Experimentales	16
3.5 Cargado y Colocación de Material.....	17
3.6 Colocación de Marcadores	18
3.7 Metodología de Extracción y Procesamiento del Material	19
3.8 Método de Procesamiento de Datos de Marcadores	19
3.8.1 Clasificación de General de Marcadores	19
3.8.2 Modelación de los Marcadores	20
3.8.3 División del Mineral en Función de los Puntos de Extracción	20

3.8.4 Clasificación de Marcadores Cercanos a los Puntos de Extracción	21
3.9 Método de cálculo de dilución.....	21
3.10 Gráficos y Tablas	22
4. Resultados	23
4.1 Peso Observado	23
4.2 Dilución Observada	24
4.3 Datos procesados de marcadores	24
4.4 Resumen de Resultados Clave de experimentos.	25
4.5 Gráficos	26
4.6 Visualización 3D de marcadores	29
4.6.2 Visualización Extracción sobrante	31
5. Análisis.....	32
5.1 Análisis de regularidad del tiraje	32
5.2 Análisis de comportamiento de los marcadores en mineral	33
5.3 Análisis del Fenómeno de Dilución.....	34
5.4 Interpretación de la Curva Ajustada y su Función.....	34
5.5 Análisis por Zonas	35
5.6 Apoyo del Modelamiento 3D.....	35
6. Conclusiones.....	35
7. Referencias Bibliográficas	37
8. Anexos.....	39

1. Introducción

El presente estudio aborda la evaluación de la dilución generada en el método de hundimiento por bloques, mediante una simulación física a escala del proceso de extracción. El hundimiento por bloques es una técnica ampliamente utilizada en minería subterránea para la explotación de yacimientos de gran volumen, donde el colapso inducido del macizo rocoso permite el desplazamiento gravitacional del mineral fragmentado hacia puntos de extracción localizados en la base del yacimiento.

Este proceso se basa en el flujo gravitacional del material fragmentado, que desciende naturalmente por efecto de la gravedad desde las zonas superiores del yacimiento hasta los puntos de extracción ubicados en la base. Aunque este mecanismo permite una operación continua y de bajo costo, también implica desafíos importantes en cuanto al control del movimiento del material y la posible incorporación de material no deseado. En particular, uno de los principales problemas es la dilución, entendida como la mezcla de material estéril con mineral útil, lo cual disminuye la ley del mineral recuperado y reduce la eficiencia económica del proceso.

Dentro de las diferentes formas de dilución que se pueden presentar en este método, la dilución lateral juega un rol crítico: esta ocurre cuando material estéril ubicado en los bordes del yacimiento (como arenas simuladas en este experimento) se incorpora al flujo principal del mineral útil, disminuyendo la ley del mineral extraído y afectando directamente la rentabilidad de la operación.

Dada la dificultad de observar estos fenómenos en condiciones reales de mina, se desarrolló un modelo físico que simula con alta fidelidad las condiciones de hundimiento y permite monitorear en detalle el comportamiento del material y la evolución de la dilución a lo largo de múltiples ciclos de extracción. Este enfoque experimental proporciona una plataforma para comprender de forma más precisa el impacto de la geometría del yacimiento, la disposición del material y las trayectorias del flujo sobre la dilución, especialmente aquella proveniente de zonas laterales.

Con este trabajo, se busca no solo cuantificar la dilución lateral dentro de un entorno controlado, sino también establecer patrones de comportamiento del material durante el hundimiento por bloques, contribuyendo así al desarrollo de estrategias que minimicen la incorporación de material estéril en las operaciones reales de minería subterránea.

1.1 Planteamiento del Problema

Uno de los problemas más críticos en el método de hundimiento por bloques es la dilución. El colapso masivo y descontrolado del macizo rocoso genera una fragmentación en la que el material estéril puede fácilmente mezclarse con el mineral de valor económico, lo que afecta tanto la rentabilidad como la eficiencia operativa (Carter, 2018). Aunque el hundimiento por bloques es un proceso altamente eficiente en términos de costos de extracción, la dilución reduce significativamente la calidad del mineral extraído, lo que incrementa los costos operacionales y disminuye la recuperación de mineral valioso.

La dilución no solo representa un desafío desde el punto de vista económico, sino que también plantea un problema técnico, ya que el control sobre la fragmentación y el colapso del macizo rocoso es limitado. Existen varios factores que inciden en el grado de dilución generada durante el proceso de hundimiento, tales como la calidad del macizo rocoso, el diseño de la voladura y la geometría del yacimiento, entre otros (Laubscher, 1994). Sin embargo, estos factores son a menudo difíciles de controlar en el contexto del hundimiento por bloques, lo que hace necesario desarrollar enfoques más controlados para gestionar la dilución.

En la actualidad, existe una falta de investigaciones experimentales que analicen la dilución en el hundimiento por bloques bajo condiciones controladas, lo que limita el conocimiento sobre cómo se puede minimizar este fenómeno y optimizar las operaciones mineras. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo evaluar de manera sistemática y empírica cómo se genera la dilución en el hundimiento por bloques y cómo se puede controlar este fenómeno para mejorar la eficiencia del proceso de extracción.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es cuantificar la dilución lateral generada en el modelo físico de flujo gravitacional por el método de hundimiento por bloques.

Objetivos Específicos

1. Registrar las cantidades de mineral y material diluyente extraídas en los ciclos.
2. Registrar las trayectorias de los marcadores

1.3 Motivación

En los estudios técnicos y publicaciones académicas sobre dilución en minería subterránea, el foco ha estado tradicionalmente orientado hacia la dilución por sobrecarga. Esta se asocia a la incorporación de material estéril desde la parte superior del caserón, especialmente en etapas avanzadas del hundimiento, y ha sido ampliamente descrita en contextos reales y simulaciones numéricas. En contraste, la dilución lateral que ocurre por contacto entre el flujo gravitacional y las paredes del caserón ha recibido menor atención en la literatura especializada.

A pesar de esta brecha investigativa, en el ámbito operativo existe una regla empírica ampliamente aceptada en faenas de hundimiento por bloques: se estima que la dilución lateral puede variar entre un 10% y un 15% por cada cara del caserón en contacto con material estéril. Esta “regla no escrita” surge de la experiencia acumulada en operaciones reales, pero no ha sido formalmente validada mediante experimentos controlados o modelaciones físicas detalladas.

La falta de estudios dedicados a la cuantificación precisa de la dilución lateral, sumada al uso de estimaciones empíricas no verificadas, plantea una limitación importante al momento de diseñar o ajustar parámetros operacionales en minas que utilizan el método de hundimiento por bloques. En ese sentido, trabajos de modelación física como el desarrollado en esta investigación resultan fundamentales para dar respaldo cuantitativo a lo que hasta ahora ha sido considerado solo como experiencia práctica, permitiendo avanzar hacia una comprensión más completa y rigurosa del fenómeno.”

2. Marco Teórico

2.1 Descripción del Método de Hundimiento por Bloques

El hundimiento por bloques es un método masivo utilizado en minería subterránea para la extracción de minerales de yacimientos de gran tamaño. Este proceso implica la creación de cavidades subterráneas mediante la extracción de mineral de la base del yacimiento, lo que debilita el macizo rocoso y provoca su colapso bajo la influencia de la gravedad. El material fragmentado que resulta del colapso es recuperado por sistemas de transporte, como tolvas y cintas transportadoras (Bullock & Hustrulid, 2001).

El hundimiento por bloques es particularmente eficiente en términos de costo por tonelada extraída, ya que permite manejar grandes volúmenes de material con una intervención mínima después de iniciar el proceso de colapso. Este método es adecuado para yacimientos con una geometría simple y geomecánicamente homogénea. Sin embargo, el control de la fragmentación y la dilución son problemas significativos debido a la falta de control sobre el colapso masivo y la fragmentación de la roca (Carter, 2018).

Características Principales del Método de Hundimiento por Bloques:

- ***Extracción masiva:*** Permite la extracción de grandes volúmenes de mineral rápidamente y con un bajo costo operativo.
- ***Fragmentación rápida:*** El colapso del macizo rocoso genera una fragmentación extensa y a menudo descontrolada.
- ***Requiere menos infraestructura:*** Comparado con otros métodos subterráneos, el hundimiento por bloques requiere menos infraestructura debido a la automatización del proceso de extracción (Bullock & Hustrulid, 2001).

- **Control limitado de la fragmentación:** La fragmentación es más difícil de predecir, lo que puede generar una mayor dilución.

2.2 Concepto de Dilución en Minería Subterránea

La dilución en minería subterránea se refiere a la mezcla de material estéril o de baja ley con el mineral útil durante el proceso de extracción. Este fenómeno afecta directamente la rentabilidad de las operaciones mineras, ya que incrementa el volumen de material que debe ser procesado sin generar ingresos adicionales, lo que aumenta los costos operacionales y reduce la eficiencia económica del proceso (Laubscher, 1994).

En el contexto del hundimiento por bloques, la dilución es particularmente desafiante debido al colapso masivo del macizo rocoso. Este colapso provoca una fragmentación descontrolada que puede incluir material estéril o de baja ley dentro del flujo de material útil, lo que reduce la calidad del mineral recuperado (Carter, 2018). La dilución no solo afecta la rentabilidad, sino también la calidad del material extraído, lo que impacta el procesamiento y la recuperación del mineral valioso.

Existen dos tipos de dilución que pueden generarse en el hundimiento por bloques:

- **Dilución Externa:** Ocurre cuando el material estéril fuera del cuerpo mineralizado se incorpora al flujo de material extraído, lo que es común en el hundimiento por bloques debido a la extensión del área de colapso (Laubscher, 1994).
- **Dilución Interna:** Se da cuando material de baja ley dentro del propio cuerpo mineralizado es extraído junto con el mineral de alta ley. Esta dilución es más difícil de controlar y puede reducir la eficiencia de la operación (Chitombo & Bullock, 2013).

2.3 Modelo de Fragmentación de Hoek y Brown

El modelo de Hoek y Brown es ampliamente utilizado para describir la fragmentación del macizo rocoso en minería subterránea. Este modelo establece una relación entre las propiedades geomecánicas de la roca (como la resistencia a la compresión, la fracturabilidad y la elasticidad) y el tamaño de los fragmentos generados durante el proceso de colapso (Hoek & Brown, 1981). La fragmentación resultante tiene un impacto directo en los niveles de dilución observados en el proceso de hundimiento por bloques, ya que una mayor fragmentación implica una mayor probabilidad de que material estéril se mezcle con el mineral útil.

El modelo de Hoek y Brown es útil para predecir el comportamiento de la roca durante el proceso de colapso y para ajustar las prácticas de voladura para minimizar la dilución (Hoek & Brown, 1981). Sin embargo, este modelo no tiene en cuenta todas las variaciones geológicas que pueden ocurrir en un yacimiento real, lo que limita su aplicabilidad en todas las situaciones.

2.4 Modelo de Dilución de Lunder

El modelo de dilución de Lunder propone que la dilución es inversamente proporcional al tamaño de los bloques de extracción. Según este modelo, cuando los bloques son más pequeños, el control sobre la fragmentación aumenta y, por lo tanto, la dilución disminuye. Este modelo ha sido fundamental para comprender cómo el diseño del proceso de hundimiento por bloques puede influir en los niveles de dilución (Lunder & Pakalnis, 1997).

El modelo de Lunder sugiere que el diseño de los bloques debe estar optimizado para equilibrar la eficiencia operativa y el control sobre la fragmentación, lo que permite reducir la cantidad de material estéril extraído junto con el mineral valioso. En general, los bloques más pequeños permiten un mejor control y, por lo tanto, una menor dilución, pero también requieren un mayor esfuerzo operativo y mayores costos de extracción (Lunder & Pakalnis, 1997).

2.5 Estudios Previos sobre Dilución en el Hundimiento por Bloques

La dilución es uno de los problemas más críticos en la minería subterránea, especialmente en métodos masivos como el hundimiento por bloques, debido a la fragmentación del macizo rocoso y al colapso masivo que no siempre puede ser controlado de manera precisa. A lo largo de las últimas décadas, varios estudios han abordado cómo la dilución impacta las operaciones de minería subterránea, con un enfoque particular en los métodos de hundimiento por bloques. Estos estudios han proporcionado una comprensión más profunda sobre los factores que influyen en la dilución, las consecuencias económicas de este fenómeno y las estrategias para reducir su impacto.

2.5.1 Modelos y Estudios Numéricos

Uno de los enfoques más comunes para estudiar la dilución en el hundimiento por bloques ha sido a través de modelos numéricos que simulan los procesos de fragmentación y colapso del macizo rocoso. Estos modelos permiten predecir cómo las características geomecánicas del yacimiento, la geometría del macizo y las condiciones operativas pueden influir en los niveles de dilución observados.

- **Brown et al. (2015)** realizaron simulaciones numéricas utilizando el modelo de elementos finitos para evaluar el impacto de la geometría del área de hundimiento en los niveles de dilución. Su estudio concluyó que áreas de hundimiento más grandes y con geometría más compleja tienden a generar una mayor fragmentación, lo que resulta en una mayor incorporación de material estéril en el flujo de mineral extraído. Este estudio subraya la importancia de optimizar la geometría del yacimiento para reducir la dilución en el hundimiento por bloques.
- **Martínez y Pérez (2018)** llevaron a cabo simulaciones utilizando modelos geomecánicos para estudiar la dilución en el hundimiento por bloques bajo diferentes condiciones de resistencia de la roca. Sus resultados indicaron que en yacimientos con rocas de baja resistencia y alta fracturabilidad, los niveles de dilución eran significativamente más altos. En contraste, yacimientos con rocas más resistentes y

menos fracturables presentaron menos dilución, debido a un mayor control sobre la fragmentación de la roca.

- **Carter (2018)** también utilizó simulaciones para estudiar los efectos de las voladuras y el tamaño de los bloques sobre la dilución. Su investigación mostró que la selección adecuada de parámetros de voladura, como la cantidad y distribución de explosivos, podría reducir los niveles de dilución, ya que una fragmentación más controlada ayuda a evitar la incorporación de material estéril en el flujo de mineral.

2.5.2 Estudios Experimentales

Los estudios experimentales han sido fundamentales para entender cómo los métodos de hundimiento por bloques generan dilución, especialmente mediante la modelación física. Los experimentos físicos permiten observar de manera directa cómo se comporta el material durante el proceso de colapso y cómo se genera la dilución bajo condiciones controladas. Estos estudios han proporcionado información valiosa sobre la dinámica de los procesos de fragmentación y la incorporación de material estéril.

- **Chitombo y Bullock (2013)** realizaron experimentos utilizando maquetas a escala de yacimientos mineralizados. Su investigación mostró que el hundimiento por bloques genera una dilución más alta en comparación con otros métodos debido a la falta de control sobre la fragmentación de la roca. En su estudio, observaron que la dilución era mayor en los ciclos de extracción iniciales, cuando el macizo rocoso aún no había alcanzado un estado de equilibrio, lo que facilitaba la incorporación de material estéril. Sin embargo, también encontraron que si se controlaban factores como el tamaño de los bloques y las condiciones de voladura, se podía reducir significativamente la dilución.
- **Laubscher (1994)** revisó el estado del arte en la minería subterránea y destacó la falta de estudios comparativos directos sobre la dilución en el hundimiento por bloques en yacimientos con diferentes condiciones geomecánicas. Sin embargo, su trabajo señaló que la dilución es uno de los principales problemas operativos en el hundimiento por bloques y sugirió que una mayor comprensión de los procesos de fragmentación podría ayudar a optimizar los métodos de hundimiento y reducir la dilución.

2.5.3 Impacto de la Dilución en la Rentabilidad

Los estudios previos también han analizado cómo la dilución afecta la rentabilidad de las operaciones mineras, especialmente en términos de costos de procesamiento y la eficiencia de la recuperación del mineral. La dilución aumenta los costos de procesamiento, ya que el material estéril debe ser transportado y tratado junto con el mineral útil, lo que reduce la concentración del mineral y aumenta los costos operacionales.

- **Laubscher (1994)** subrayó que uno de los principales desafíos en el hundimiento por bloques es la baja recuperación de mineral debido a la dilución. Según su estudio, la dilución puede aumentar significativamente los costos de procesamiento y reducir la

rentabilidad de las operaciones mineras, especialmente cuando el material estéril no puede ser separado eficazmente del mineral útil durante el proceso de extracción.

- ***Chitombo & Bullock (2013)*** también concluyeron que, aunque el hundimiento por bloques es un método eficiente en términos de costos de extracción, la dilución puede reducir la rentabilidad del proyecto si no se controlan adecuadamente los parámetros de voladura y fragmentación. Sugirieron que el uso de simulaciones y modelaciones experimentales puede ayudar a optimizar el proceso de extracción y reducir la dilución, lo que a su vez mejora la rentabilidad del proyecto.

2.5.3.1 Aumento de los Costos Operacionales

Uno de los efectos más inmediatos y evidentes de la dilución es el aumento en los costos operacionales. Cuando el material estéril se mezcla con el mineral útil, se requiere procesar una mayor cantidad de material para extraer la misma cantidad de mineral valioso. Esto se debe a que el material estéril debe ser transportado, procesado y tratado, lo que implica un uso más intensivo de recursos, energía y tiempo. En el caso del hundimiento por bloques, la dilución puede llegar a ser significativa debido a la falta de control sobre la fragmentación del macizo rocoso, lo que puede aumentar considerablemente los costos de procesamiento.

Costo Adicional de Tratamiento

El procesamiento de material diluido no solo representa un incremento en los costos de tratamiento, sino que también puede afectar la eficiencia de las plantas de procesamiento. A medida que se procesan más toneladas de material, la planta puede enfrentar problemas como:

- ***Sobrecarga de los sistemas de molienda:*** La inclusión de material estéril puede exigir una mayor capacidad de molienda para alcanzar el tamaño de partícula deseado para la flotación o el lixiviado, lo que implica un mayor consumo de energía y una mayor tasa de desgaste de los equipos.
- ***Aumento en los costos de energía:*** El proceso de molienda es uno de los más costosos en términos de energía en la minería, por lo que un aumento en la cantidad de material a procesar debido a la dilución lleva a un aumento directo en los costos energéticos.
- ***Incremento en los costos de transporte y manejo:*** El material estéril debe ser transportado y almacenado, lo que implica mayores costos logísticos y de operación.

Este incremento en los costos operacionales reduce los márgenes de beneficio de la operación minera y puede poner en riesgo la viabilidad económica de los proyectos.

2.5.3.2 Reducción de la Recuperación del Mineral Valioso

La recuperación del mineral se refiere a la cantidad de mineral útil que se extrae en relación con el total de mineral presente en el yacimiento. La dilución impacta directamente esta recuperación, ya que la mezcla de material estéril con el mineral valioso disminuye la concentración del mineral en el material extraído, lo que reduce la cantidad de mineral útil que se puede recuperar.

Efecto sobre la Ley del Mineral

La ley del mineral se refiere al porcentaje de mineral valioso contenido en el material extraído. Un aumento en la dilución provoca una disminución de la ley del material extraído, ya que se mezcla el mineral valioso con material estéril o de baja ley. Esta disminución en la ley afecta directamente la eficiencia de la planta de procesamiento, ya que se requieren mayores cantidades de material para obtener una cantidad equivalente de mineral útil. Como resultado, la eficiencia de la operación se ve reducida, lo que también afecta la rentabilidad.

Consecuencias para la Planificación de la Mina

La planificación de la mina debe tener en cuenta la dilución para optimizar el diseño del yacimiento y los métodos de extracción. Si la dilución es alta, los resultados de la minería pueden no ser rentables incluso si el costo por tonelada extraída es bajo. Por lo tanto, una adecuada gestión de la dilución es crucial para maximizar la recuperación de mineral y minimizar los costos de procesamiento.

2.5.3.3 Impacto en la Vida Útil de la Mina

La dilución también puede tener un impacto en la vida útil de la mina. Cuando se maneja material diluido, la cantidad de mineral útil que se puede extraer en cada ciclo de extracción disminuye. Esto puede afectar los planes de explotación a largo plazo, ya que la mina podría no ser capaz de recuperar suficiente mineral de calidad para justificar la operación a largo plazo.

Planificación a Largo Plazo

En un proyecto de minería subterránea a gran escala, la vida útil de la mina es un factor crítico a la hora de planificar inversiones y estimar los flujos de caja futuros. La alta dilución puede reducir la vida útil de la mina, ya que el material estéril puede llegar a representar un porcentaje significativo del material extraído, haciendo que la operación no sea rentable a largo plazo. Esto puede llevar a una reducción de la vida útil de la mina y afectar la sostenibilidad económica de la operación.

2.5.3.4 Impacto Ambiental

La dilución también tiene implicaciones en términos de impacto ambiental. El aumento del volumen de material extraído debido a la dilución puede generar mayores cantidades de desechos y escombros. Estos desechos, a menudo no procesados, deben ser gestionados adecuadamente para minimizar su impacto ambiental. Además, el manejo de grandes volúmenes de material estéril aumenta la cantidad de rellenos sanitarios y almacenamientos de residuos, lo que requiere un mayor espacio y recursos para su gestión.

Generación de Desperdicios

El material estéril debe ser almacenado o tratado, y la gestión de los residuos es una de las áreas más críticas de la minería moderna. La alta dilución aumenta la cantidad de material no

útil que se genera, lo que puede intensificar la huella ambiental de la operación minera, sobre todo en zonas con regulaciones estrictas de manejo de residuos.

2.5.4 Herramientas y Tecnologías para Controlar la Dilución

Varios estudios han sugerido que el uso de tecnologías avanzadas y estrategias operacionales optimizadas puede ayudar a controlar la dilución en el hundimiento por bloques. Estas herramientas incluyen sistemas de monitoreo en tiempo real, modelación física, y diseño optimizado de las voladuras.

- **Carter (2018)** destacó que el uso de sistemas avanzados de monitoreo de voladura y fragmentación en tiempo real puede permitir ajustes dinámicos durante el proceso de hundimiento, lo que ayuda a reducir la dilución. Además, sugirió que la modelación física y los estudios experimentales son esenciales para comprender cómo las condiciones geomecánicas y las técnicas operativas afectan la dilución, lo que permite tomar decisiones informadas para mejorar la eficiencia del proceso.
- **Brown et al. (2015)** propusieron el uso de modelos numéricos para predecir los niveles de dilución en diferentes escenarios operativos. Su estudio mostró que una mayor comprensión de los factores que afectan la fragmentación del macizo rocoso y el diseño de la voladura puede ayudar a minimizar la dilución y mejorar la recuperación de mineral.

3. Metodología

Este capítulo describe detalladamente los aspectos principales de la metodología utilizada para llevar a cabo la simulación física del hundimiento por bloques. Todo el contenido operativo ampliado y las ilustraciones específicas han sido trasladadas al Capítulo 8 (Anexos), para permitir una lectura fluida sin perder el nivel técnico necesario.

3.1 Descripción del Equipo de Simulación

El equipo experimental fue diseñado para replicar a escala 1:150 el proceso de hundimiento por bloques. Se compone de una estructura vertical de acrílico con dimensiones de 150 cm de alto, 47,5 cm de largo y 24 cm de ancho. Esta estructura incluye una caja superior donde se carga el material, una base perforada con calados que representan los puntos de extracción, y una bandeja inferior que recolecta el material (Ver ilustración N°1). (Para más detalles sobre equipo ver anexo Capítulo 8)



Ilustración 1: Equipo de simulación de hundimiento por bloques.

Mecanismo de extractores: En cada eje se instalan rodillos que simulan el balde de extracción de los equipos LHD. (ver ilustración 12 en Capítulo 8 Anexo)

Al girar los rodillos con ayuda de una manivela en cada vuelta se extrae el equivalente a una baldada de material.

3.2 Marcadores

En la caja de material se colocan 69 marcadores en cada uno de los 15 niveles. Cada 10 cm denominados de abajo hacia arriba como: A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N y P

En la ilustración 2, se puede observar que hay 69 marcadores dispuestos en las distintas líneas de extracción de la siguiente manera:

- Líneas 1 y 5 (extremos izquierdo y derecho en la figura 4): los marcadores están en los vértices y el en centro de los puntos de extracción
- Líneas 2, 3 y 4: Los marcadores están en los vértices y el en centro de los puntos de extracción y, entre puntos de extracción hay 2 marcadores dispuestos simétricamente.

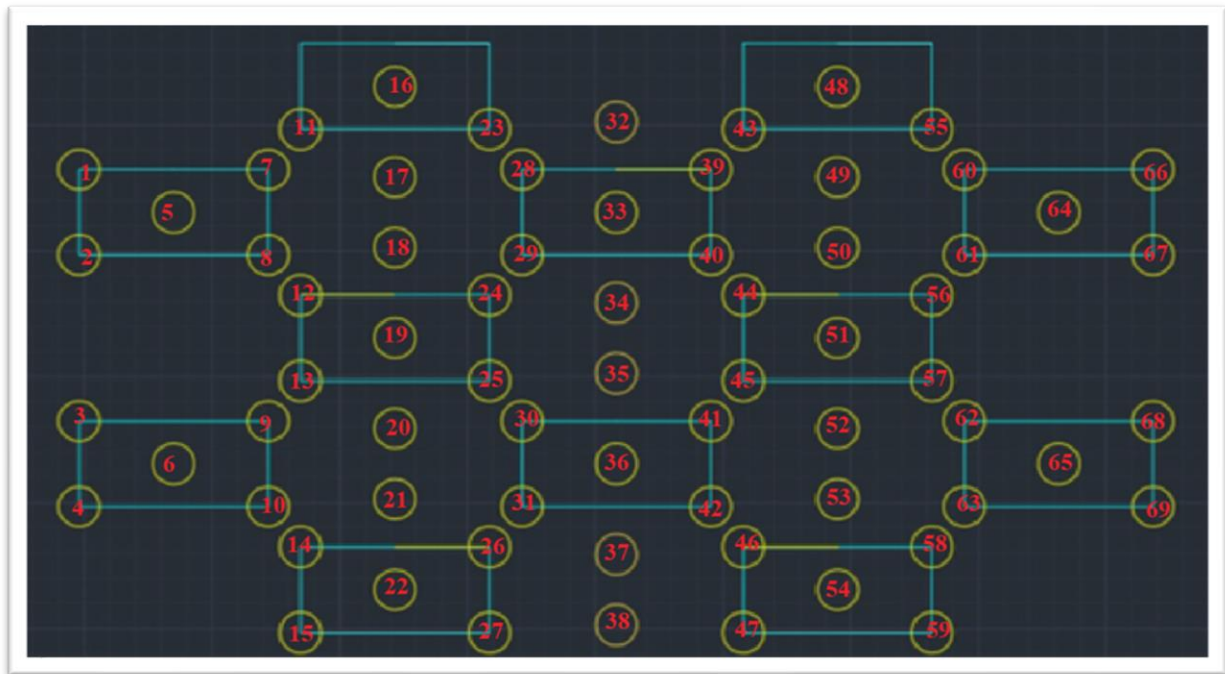


Ilustración 2: Ubicación de los 69 marcadores dentro del equipo

3.3 Material Granular

Se utilizaron dos tipos de materiales: gravilla (mineral útil) con densidad aparente de 1,45 g/cm³, y arena (material estéril) con densidad aparente de 1,4 g/cm³. Ambos fueron secados, tamizados y clasificados según granulometría (su recolección, procesamiento, roleo y granulometrías están en el Capítulo 8 Anexo). La elección de la arena como material diluyente se debe a que, por su granulometría fina y controlada, facilita su separación del mineral útil durante el proceso de tamizado

3.4 Alcances Experimentales

Los alcances del estudio fueron establecidos para garantizar comparaciones efectivas y significativas entre los diferentes ciclos de hundimiento por bloques. Las actividades experimentales se organizaron de la siguiente manera:

1. **Carga de Prueba del Equipo:** Se realizó una carga inicial para verificar que el sistema funcionara correctamente y para asegurar que todos los componentes estuvieran calibrados y listos para la operación.
2. **Cargas del Método de Bloques:** Se efectuaron dos experimentos para el método de hundimiento por bloques, con el fin de comprobar que el resultado de ambos es consistente.
3. **Etapas de los Experimentos:** Los experimentos se realizan siguiendo las siguientes etapas:

- ***Limpieza y Preparación del Equipo:*** Incluye la limpieza exhaustiva del equipo para eliminar residuos de experimentos anteriores y evitar contaminaciones que puedan afectar los resultados.
- ***Carga del Equipo con Material:*** El proceso de carga debe realizarse con cuidado para asegurar que se sigan las proporciones y el diseño experimental establecidos. Cualquier error en esta etapa podría alterar la distribución del material y, por lo tanto, los resultados obtenidos.
- ***Descarga del Material Extraído:*** Al finalizar cada ciclo de extracción, se debe descargar el material de manera ordenada y registrar las cantidades extraídas. Este paso es esencial para llevar un control adecuado de los resultados.
- ***Procesamiento del Material Extraído:*** Incluye el tamizado y la clasificación del material extraído para evaluar la dilución y la calidad del mineral.
- ***Inspección y Reemplazo de Piezas:*** Se realiza una revisión de las piezas del equipo, especialmente las que están en contacto con el material. Si alguna pieza está dañada, se reemplaza para asegurar el correcto funcionamiento del equipo en experimentos futuros.
-

3.5 Cargado y Colocación de Material

El carguío se realiza en capas de 10 cm de altura. Se prepara una mezcla controlada de gravilla según una granulometría definida y se deposita ordenadamente en la sección central del equipo. Los laterales se rellenan exclusivamente con arena para simular condiciones de dilución lateral. El piso 15 contiene solo arena (Ver ilustración N°3). (Los detalles de cómo cargar el equipo, así como las ilustraciones del proceso de carga, están disponibles en Capítulo 8 Anexo.).



Ilustración 3: Caja con 6 capas de material en proceso de carga

3.6 Colocación de Marcadores

La colocación de los marcadores se realizó utilizando una placa de posicionamiento XY que asegura una ubicación precisa dentro del equipo experimental. Se distribuyeron 69 marcadores en coordenadas que van desde x1 a x15 en el eje horizontal, y de y1 a y18 en el eje vertical

Este sistema permite una cobertura uniforme del volumen experimental, asegurando que los marcadores representen de manera fiel el comportamiento del material durante el hundimiento.

La tabla N° 4 completa con la disposición exacta de los marcadores y la ilustración 19 asociada a esta etapa se encuentran en Capítulo 8 Anexo

3.7 Metodología de Extracción y Procesamiento del Material

El proceso de extracción se realiza en 5 ciclos, y cada ciclo corresponde a una vuelta completa de cada eje en sentido horario girando manualmente la manivela que acciona por separado cada uno de los tres ejes del sistema de rodillos. Los ejes 2 y 4 tienen 3 rodillos cada uno separados por 120° , y el eje 3 tiene 2 rodillos separados por 180° . Esta configuración simula con mayor fidelidad el patrón real de extracción en una mina de hundimiento.

Una vez recolectado el material en la bandeja, este es vaciado en bolsas rotuladas según el número de ciclo. Posteriormente, se somete a un proceso de tamizado doble:

- **Extracción manual de marcadores:** por su tamaño, quedan retenidos sobre malla #4.
- **Tamizado inicial:** mallas #4 y #10 para separar los fragmentos grandes (útiles).
- **Tamizado secundario:** mallas #35 y #70 para clasificar:
 - Sobre malla #35: material útil
 - Entre malla #35 y #70: arena (diluyente)
 - Bajo malla #70: polvo (material conminuido)

Se registra el peso por categoría (útil, arena, polvo) y los marcadores extraídos.

Para mantener la estabilidad estructural del modelo, se repone el material extraído con arena limpia, en igual cantidad y distribuida cuidadosamente en la parte superior del equipo. (Las ilustraciones de los mecanismos de engranajes, los diagramas de tamices, el procedimiento completo de tamizado y los registros visuales de las bolsas y reposición están disponibles en el Capítulo 8 Anexo)

3.8 Método de Procesamiento de Datos de Marcadores

Una vez realizada la extracción de material y los marcadores, se lleva a cabo un procesamiento sistemático de los datos obtenidos. Este proceso permite analizar el comportamiento del material extraído en función al posicionamiento inicial de los marcadores en el equipo de simulación. A continuación, se describe el procedimiento detallado para procesar y clasificar los datos de los marcadores, permitiendo obtener información relevante sobre la dilución y el flujo del material.

3.8.1 Clasificación de General de Marcadores

Esta clasificación permite dividir los marcadores en tres categorías principales: Mineral, Frontera y Laterales. A continuación, se detallan las características de cada tipo:

- **Marcadores de Mineral:** Números del 16 al 54.

Representan el material útil dentro del cuerpo mineralizado. Son el material objetivo principal del proceso de extracción.
- **Marcadores de Frontera:**

- *M.FRONTERA.IZQ*: Números del 7 al 15
- *M.FRONTERA.DER*: Números del 55 al 63

Representan la transición entre el mineral y el diluyente.

- **Marcadores Laterales:**

- *M.LATERAL.IZQ*: Números del 1 al 6
- *M.LATERAL.DER*: Números del 64 al 69

Representan zonas extremas con predominancia de arena.

3.8.2 Modelación de los Marcadores

La modelación matemática es una herramienta poderosa para visualizar el comportamiento de los marcadores extraídos a lo largo del tiempo y para simular cómo varían en función de diferentes factores. Para realizar estas modelaciones, se utilizarán programas matemáticos avanzados como MATLAB, que permiten la creación de modelos precisos y gráficos interactivos.

Se realizarán tres tipos principales de modelación:

- **Modelación de Extracción:** Visualiza el comportamiento de los marcadores correspondientes a una extracción específica. Permite analizar su distribución espacial y comportamiento puntual.
- **Modelación de Extracciones Acumuladas:** Ofrece una visión integral del comportamiento de los marcadores a lo largo de múltiples ciclos de extracción. Es útil para identificar tendencias globales del flujo de material en el tiempo.
- **Modelación de Marcadores No Recuperados:** Permite identificar las zonas en donde quedó sin ser extraído los marcadores al finalizar el experimento. Esta representación muestra zonas de baja eficiencia y posibles acumulaciones residuales dentro del equipo.

3.8.3 División del Mineral en Función de los Puntos de Extracción

Se establece una segmentación del tonelaje total de mineral ingresado al equipo, considerando la distribución de los ocho puntos de extracción: dos ubicados en la zona central y seis distribuidos en los laterales (tres a la izquierda y tres a la derecha).

En base a esta disposición, se define lo siguiente:

- El mineral de la zona central corresponde a 2/8 partes del total de mineral ingresado, al estar asociado a solo dos puntos de extracción.
- El mineral de las zonas laterales (izquierda y derecha) corresponde a 6/8 partes del total, al estar asociado a seis puntos de extracción.

Junto con esta segmentación, se definen dos nuevos subconjuntos de marcadores:

- **Marcadores de frontera de mineral izquierda:** Números 23 al 31.
- **Marcadores de frontera de mineral derecha:** Números 39 al 47.

Se creará una tabla que indique el porcentaje de mineral extraído acumulado en el momento de aparición del primer marcador de mineral del centro y del primer marcador de frontera de mineral (ya sea izquierdo o derecho)

3.8.4 Clasificación de Marcadores Cercanos a los Puntos de Extracción

Se establecen agrupaciones de marcadores en función de su cercanía directa a los puntos de extracción correspondientes a cada uno de los tres ejes del sistema rotatorio del equipo experimental.

- Eje 1: Se consideran los marcadores 17, 18, 20 y 21 como próximos a los puntos de extracción asociados a este eje.
- Eje 2: Se consideran los marcadores 32, 34, 35 y 37 como próximos a los puntos de extracción asociados a este eje,
- Eje 3: Se consideran los marcadores 49, 50, 52 y 53 como próximos a los puntos de extracción asociados a este eje

3.9 Método de cálculo de dilución

El cálculo de la dilución es un aspecto esencial para evaluar la eficiencia de los procesos de extracción. La dilución se refiere a la proporción de material estéril (arena) mezclado con el material mineralizado durante el proceso de hundimiento.

Cálculo de la Dilución

El cálculo de la dilución para cada extracción se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$Dilución = \frac{\text{Peso de arena obtenida por extraccion}}{\text{Peso total de la extraccion}}$$

Este cálculo proporciona el porcentaje de arena (material estéril) en relación con el material total extraído durante una extracción específica.

Cálculo de la Dilución Acumulada

La dilución acumulada se calcula considerando la cantidad total de arena acumulada hasta la extracción actual y el peso total acumulado hasta esa misma extracción. La fórmula es:

$$\text{Dilucion acumulada} = \frac{\text{Peso de arena acumulada hasta la extraccion actual}}{\text{Peso total acumulado hasta la extraccion actual}}$$

Este indicador entrega una visión general del comportamiento de la dilución a lo largo de todas las extracciones realizadas.

Cálculo de la Recuperación

También es posible calcular otros indicadores claves como:

- **Porcentaje de Mineral Extraído:** Relación entre el material útil extraído y el total inicial en el equipo.
- **Porcentaje de Arena Extraída:** Proporción de arena extraída respecto al total extraído.
- **Porcentaje Total Extraído:** Cuantifica la eficiencia global del proceso considerando Mineral + arena respecto a la carga inicial.

3.10 Gráficos y Tablas

Para visualizar los resultados obtenidos de los cálculos de dilución y recuperación, se utilizarán representaciones gráficas que permitan un análisis comparativo entre los experimentos realizados. Se elaborarán los siguientes gráficos:

- **Gráfico 1:** Porcentaje de dilución acumulada (eje Y) vs. porcentaje de mineral extraído en kg (eje X) para el Experimento 1.
- **Gráfico 2:** Misma estructura que el anterior, pero correspondiente al Experimento 2.
- **Gráfico 3:** Curva ajustada obtenida del Ajuste de los gráficos 1 y 2. Esta curva representa el modelo generado a partir de los datos experimentales.

A esta curva ajustada se le superpondrán cuatro zonas de análisis para facilitar su interpretación:

- **Zona 1:** Desde el inicio del experimento hasta la aparición del primer marcador de frontera.
- **Zona 2:** Desde el primer marcador de frontera hasta el primer marcador lateral.
- **Zona 3:** Desde el primer marcador lateral hasta el primer marcador de sobrecarga (letra N).
- **Zona 4:** Desde el marcador de sobrecarga hasta el final del experimento.

Se complementarán los gráficos con tablas de valores por ciclo, que incluirán:

- % de dilución por ciclo

- % de dilución acumulada
- % de mezcla acumulada
- Total, de material extraído
- Número de marcadores por categoría

4. Resultados

4.1 Peso Observado

Experimento N°1			Experimento N°2		
N° de ciclo	Peso en Kg	Peso en kg acumulado	N° de ciclo	Peso en Kg	Peso en kg acumulado
1	1,8	1,8	1	1,2	1,2
10	1,5	17,0	11	1,3	14,3
20	1,7	34,1	22	1,8	33,6
30	2,9	55,3	33	1,7	51,5
40	2,8	79,2	44	1,7	68,5
50	1,9	100,7	55	1,6	88,0
60	2,1	120,2	66	1,6	106,3
70	1,9	138,1	77	1,3	122,5
80	1,8	156,1	88	1,1	139,2
90	1,4	173,1	99	1,4	154,7
97	2,6	186,1	112	2,0	176,5

Tabla 1: Masa total registrada en experimentos.

Experimento N°1			Experimento N°2		
N° de ciclo	Mineral en Kg	Mineral en kg acumulado	N° de ciclo	Mineral en Kg	Mineral en kg acumulado
1	1,8	1,8	1	1,2	1,2
10	1,2	15,5	11	1,2	13,5
20	1,3	29,0	22	1,4	29,4
30	1,9	44,3	33	1,2	42,8
40	1,8	60,1	44	1,2	55,4
50	1,4	74,4	55	1,2	69,7
60	1,4	87,5	66	1,1	82,1
70	1,2	99,0	77	1,0	94,1
80	1,2	111,0	88	0,9	105,7
90	1,1	122,8	99	1,1	117,0
97	1,1	130,3	112	0,9	131,6

Tabla 2: Mineral total registrado en experimentos.

Experimento N°1			Experimento N°2		
N° de ciclo	Arena en Kg	Arena en kg acumulado	N° de ciclo	Arena en Kg	Arena en kg acumulado
1	0,1	0,1	1	0,0	0,0
10	0,3	1,4	11	0,1	0,8
20	0,3	4,8	22	0,4	4,2
30	1,0	10,6	33	0,5	8,6
40	1,0	18,5	44	0,5	13,1
50	0,5	25,5	55	0,4	18,3
60	0,6	31,4	66	0,4	24,2
70	0,7	37,5	77	0,3	28,4
80	0,5	43,4	88	0,3	33,5
90	0,3	48,3	99	0,3	37,7
97	1,4	53,5	112	1,1	44,8

Tabla 3: Arena total registrada en experimentos.

4.2 Dilución Observada

Experimento N°1			Experimento N°2		
N° de ciclo	% dilución	% Dilución Acumulado	N° de ciclo	% dilución	% Dilución Acumulado
1	2,8%	2,8%	1	1,1%	1,1%
10	16,8%	8,1%	11	9,7%	5,3%
20	20,2%	14,2%	22	20,9%	12,4%
30	33,5%	19,2%	33	28,6%	16,7%
40	35,6%	23,4%	44	29,1%	19,0%
50	25,9%	25,4%	55	24,3%	20,7%
60	30,8%	26,1%	66	27,9%	22,6%
70	35,5%	27,2%	77	24,0%	23,1%
80	30,0%	27,8%	88	23,2%	24,0%
90	24,6%	27,9%	99	22,4%	24,2%
97	54,6%	28,7%	112	52,6%	25,3%

Tabla 4: Dilución y dilución acumulada registrada en experimentos.

Tablas completas de datos de dilución en los experimentos N°1 y N°2 en Capítulo Anexo 8

4.3 Datos procesados de marcadores

Experimento	M.Mineral	M.Frontera.Izq	M.Frontera.Der	M.Laterales.Izq	M.Laterales.Der	M.Sobrecarga
N°1	1,3%	12,3%	9,3%	25,3%	30,7%	92,1%
N°2	0,8%	6,2%	10,7%	19,3%	14,9%	91,8%

Tabla 5: Primera aparición de cada tipo de marcador según % de mineral acumulado

Experimento	M.Mineral	M.Frontera.Izq	M.Frontera.Der	M.Laterales.Izq	M.Laterales.Der	M.Sobrecarga
N°1	0%	9,5%	0%	16,1%	18,4%	28,1%
N°2	0%	0%	0%	11,30%	8,50%	24,40%

Tabla 6: Primera aparición de cada tipo de marcador según % de dilución acumulada.

Zona	Inicio	Fin	Zona	Inicio	Fin
N°1	0%	7,5%	N°1	0%	4,63%
N°2	7,5%	20,1%	N°2	4,63%	12,57%
N°3	20,1%	91,5%	N°3	12,57%	26,28%
N°4	91,5%	100%	N°4	26,28%	100%

Tabla 7: Delimitación de zonas respecto al material extraído acumulado y dilución acumulada en %.

Tablas completas de datos de obtención de marcadores en los experimentos N°1 y N°2 en [Capítulo 8 Anexo](#)

4.4 Resumen de Resultados Clave de experimentos.

N° de experimento		1	2
Descripción	Medida	Valor	Valor
Mezcla en equipo	Kg	138,6	137,6
Arena en equipo	Kg	146,4	147,4
Extraído del equipo	Kg	186,1	176,5
Mezcla extraída	Kg	130,3	131,6
Arena extraída	Kg	53,50	44,8
Extraído del equipo	%	65,29	61,92
Mezcla extraída	%	94,03	95,65
Arena extraída	%	36,54	30,42

Tabla 8: Resumen de datos experimentales de extracción.

4.5 Gráficos

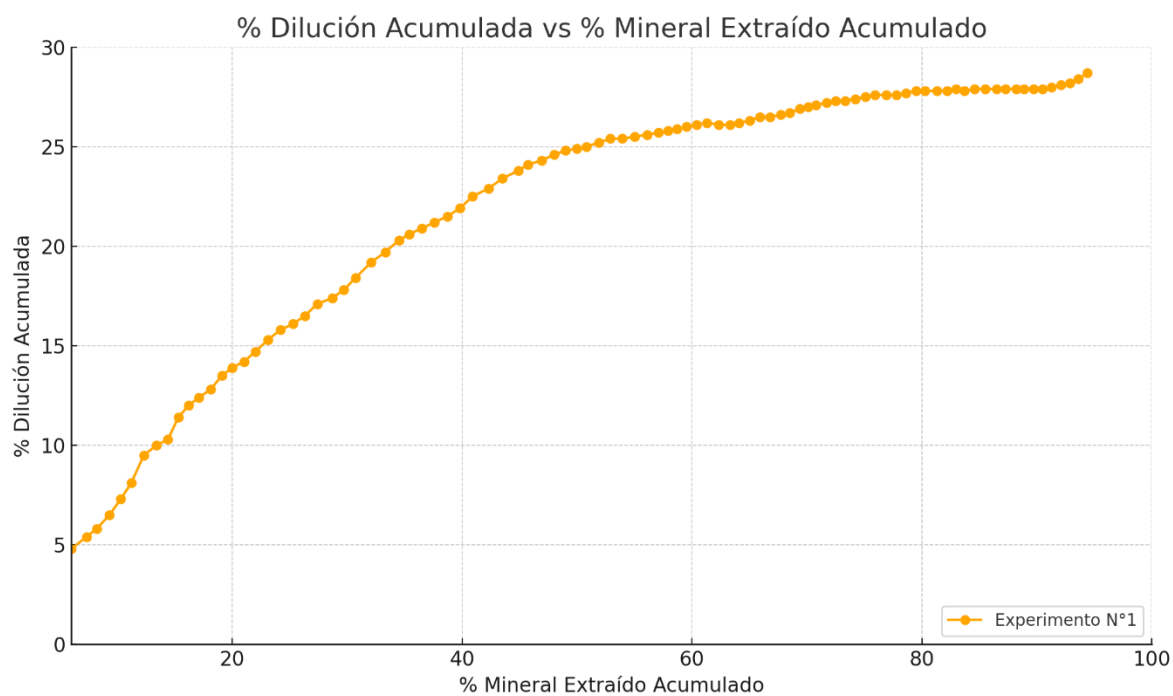


Ilustración 4: Grafico de dilución acumulada respecto a mineral acumulada en experimento N°1

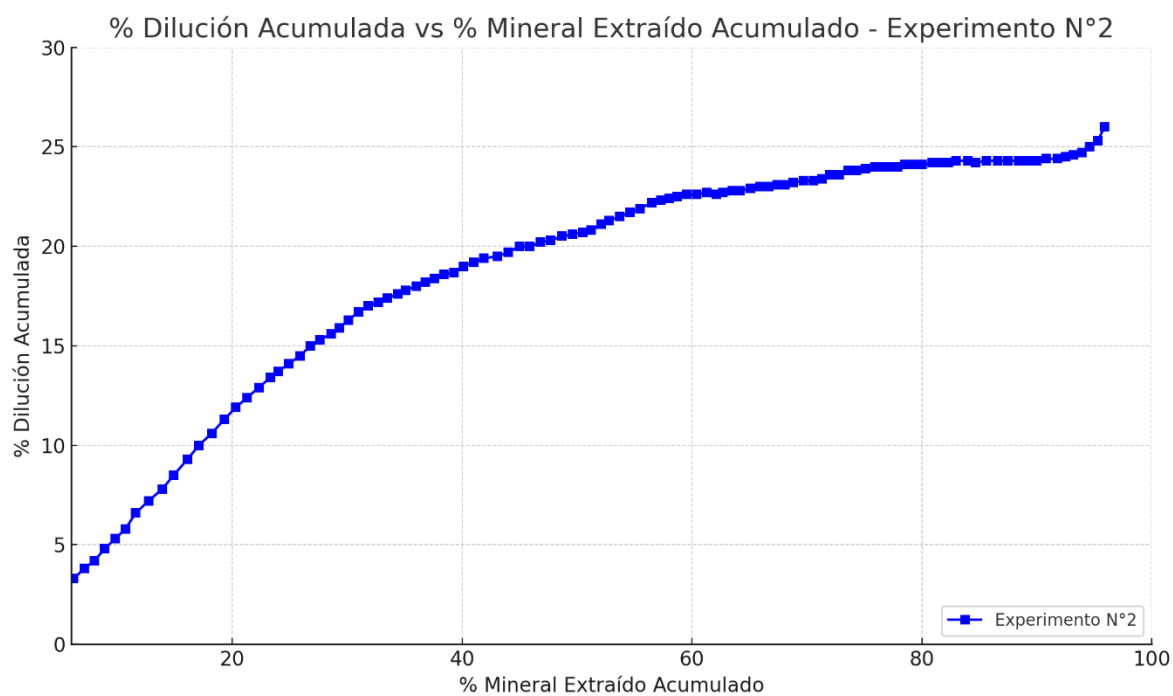


Ilustración 5: Grafico de dilución acumulada respecto a mineral acumulada en experimento N°2

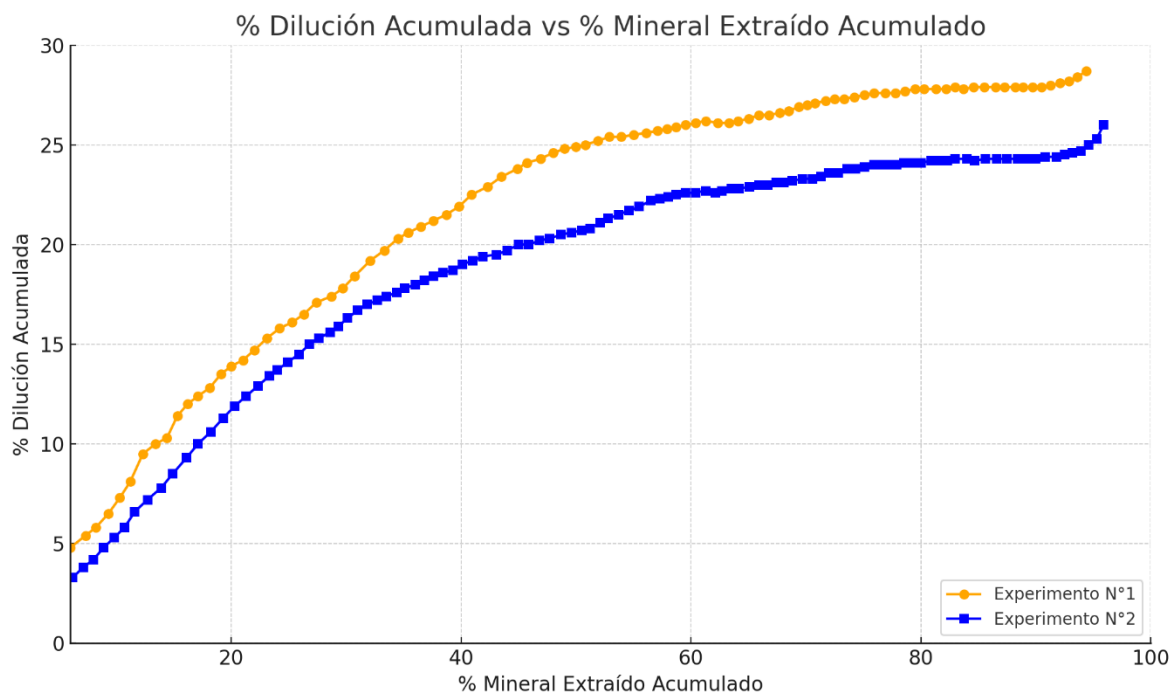


Ilustración6: Grafico de dilución acumulada respecto a mineral acumulada en experimento N°1 y 2

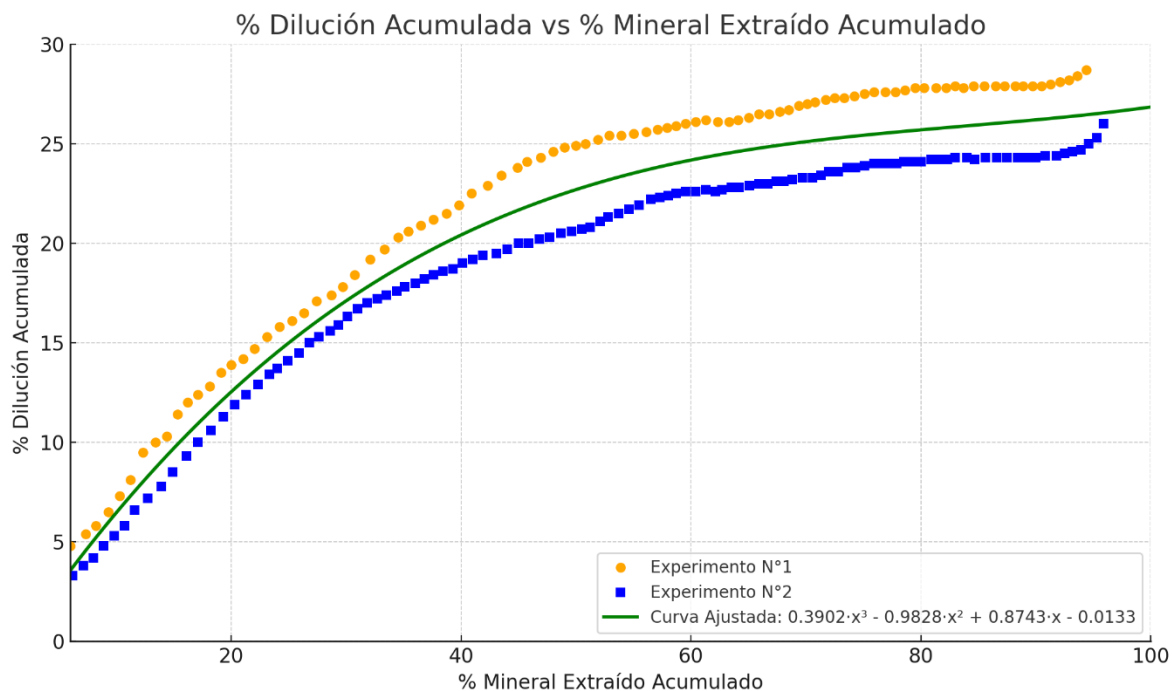


Ilustración7: Grafico de curva ajustada de la dilución acumulada respecto a mineral acumulada en experimento N°1 y 2

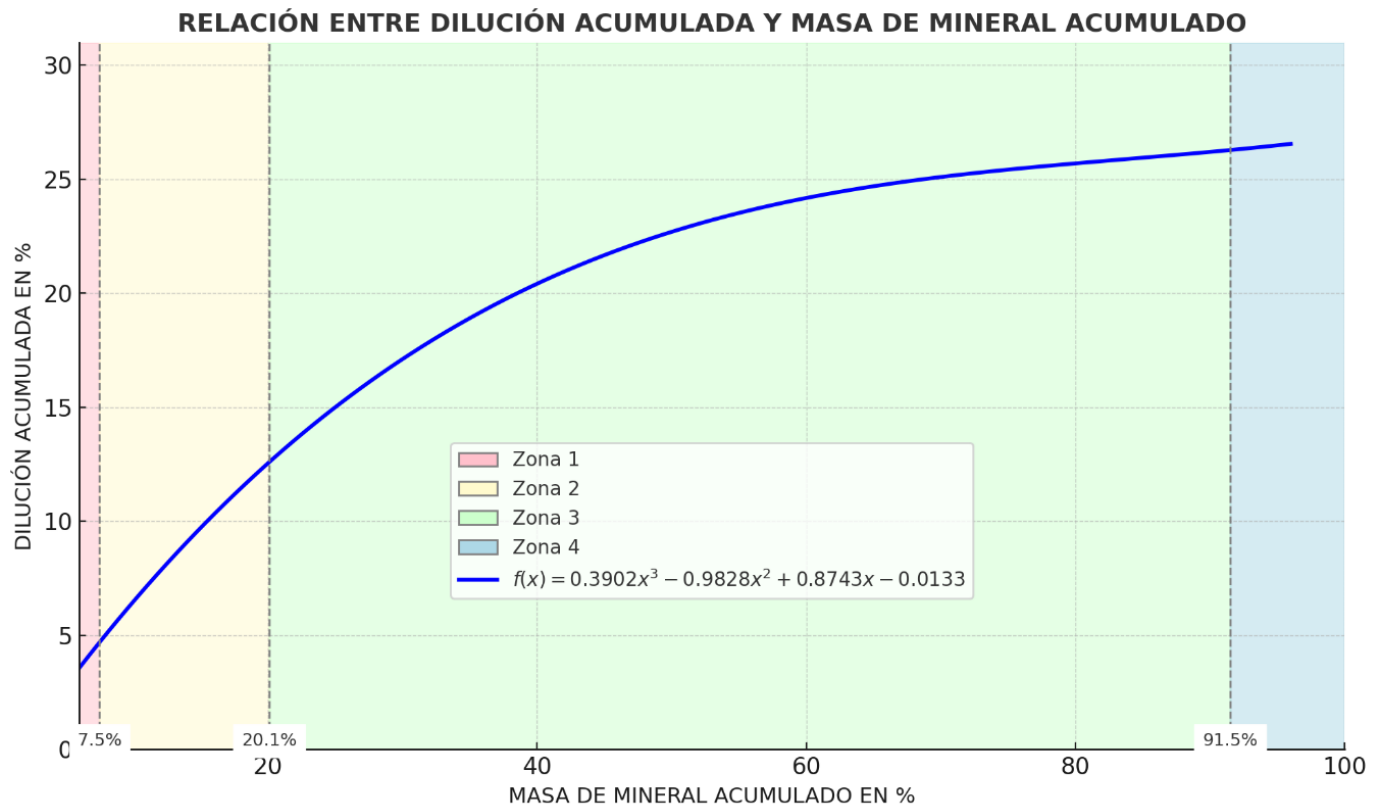


Ilustración 8: Grafico de curva ajustada de la dilución acumulada respecto a mineral acumulado con sus 4 zonas respecto a tipos de marcadores.

4.6 Visualización 3D de marcadores

4.6.1 Visualización Extracción acumuladas

Experimento N°1

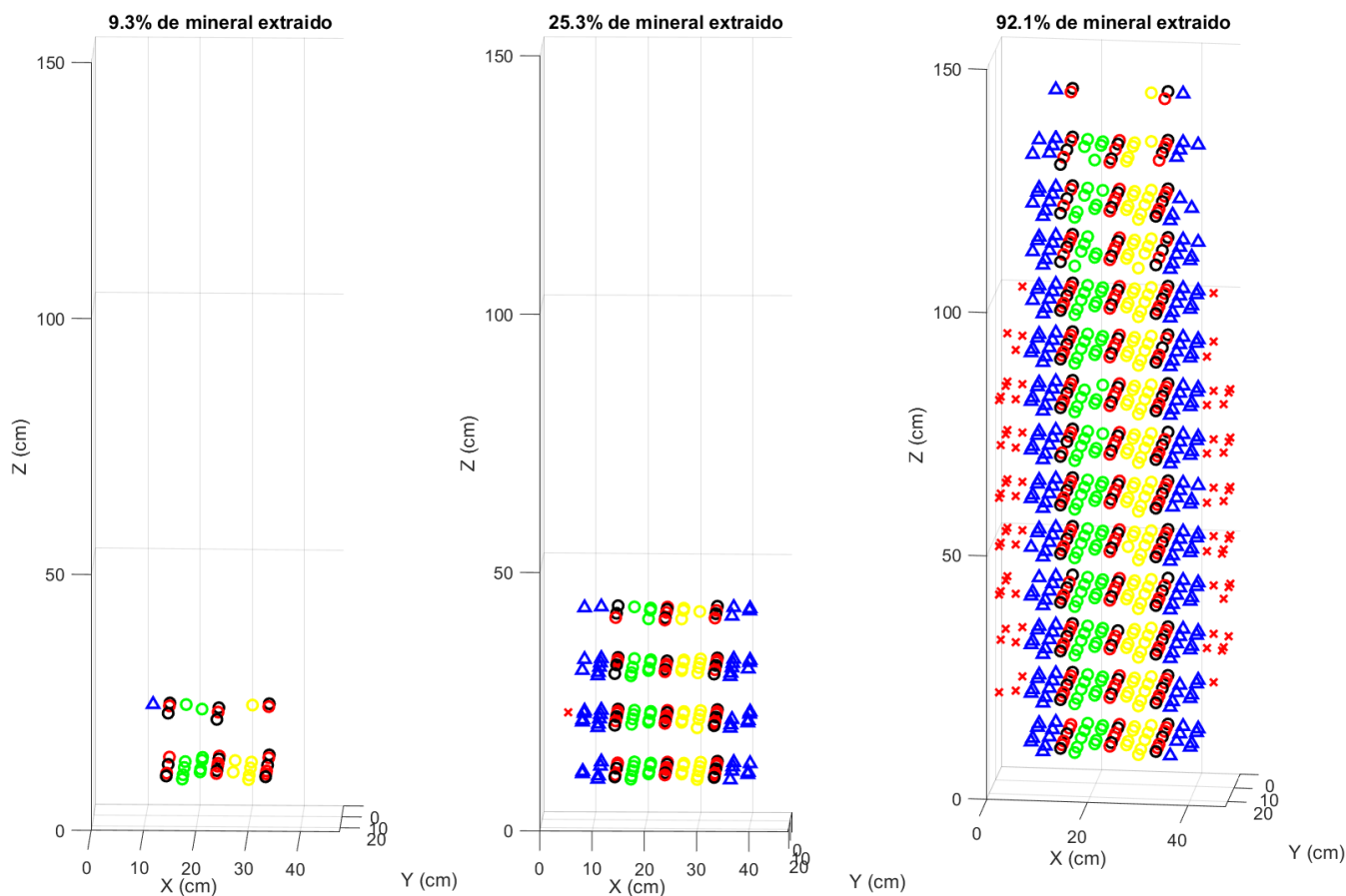


Ilustración 9: Visualizaciones de extracciones acumuladas de experimento N°1 con aparición de primer marcador de frontera, lateral y sobrecarga

Experimento N°2

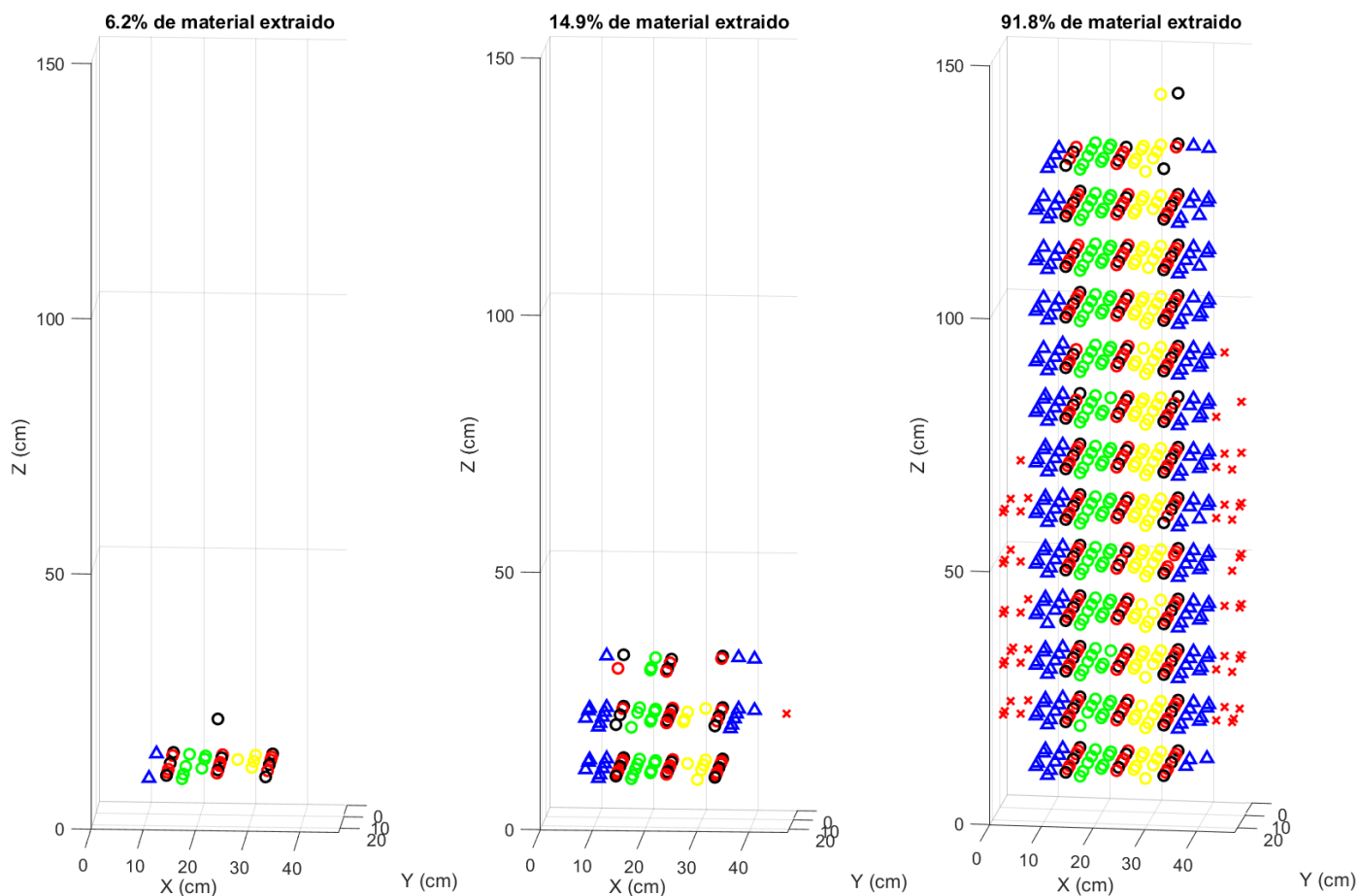


Ilustración 10: Visualizaciones de extracciones acumuladas de experimento N°2 con aparición de primer marcador de frontera, lateral y sobrecarga

4.6.2 Visualización Extracción sobrante

Marcadores sobrantes de experimento N°1 y 2

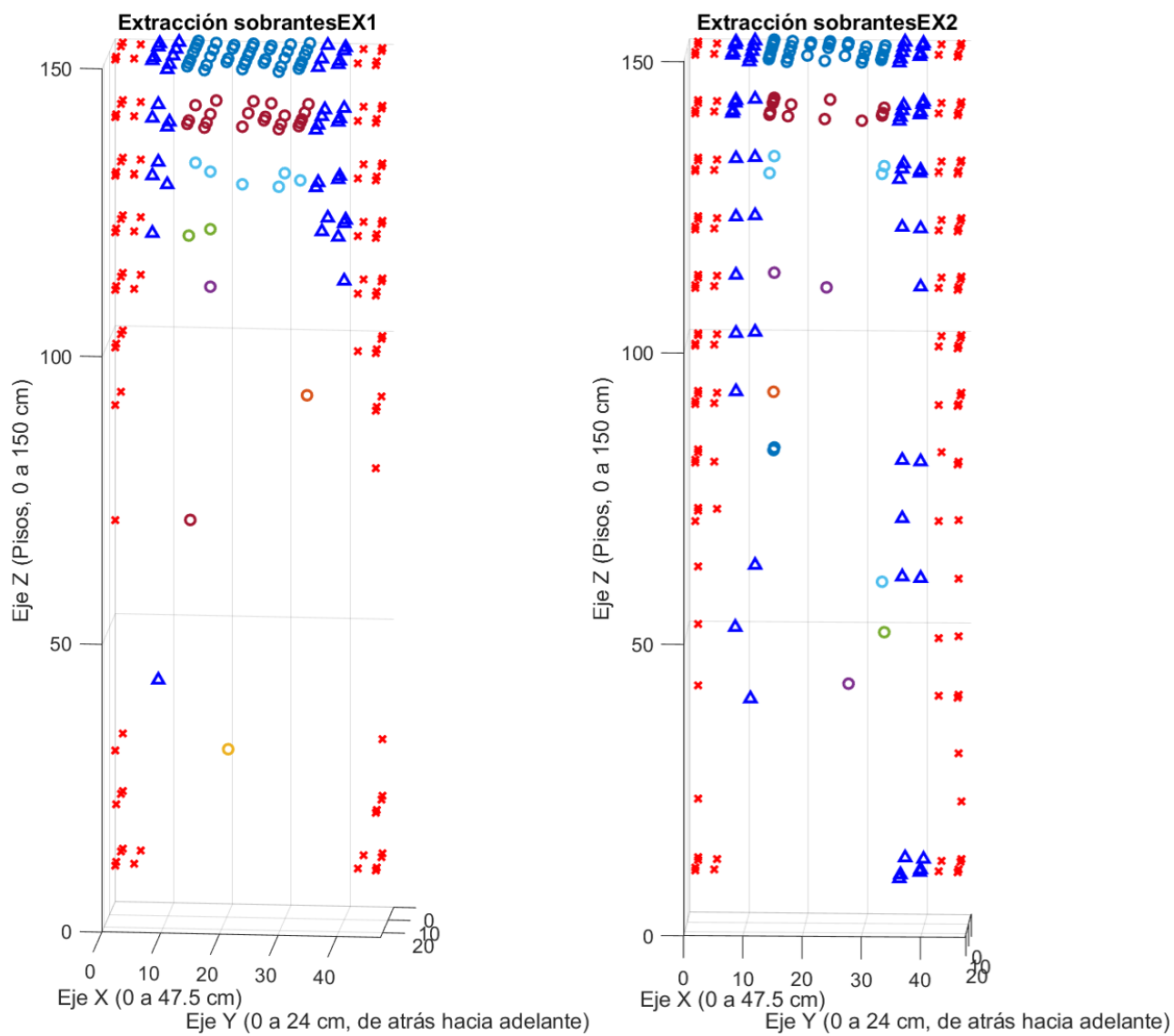


Ilustración 11: Visualizaciones de marcadores sobrantes de experimentos N°1 y N°2

5. Análisis

El presente capítulo tiene por objetivo interpretar en detalle los resultados experimentales obtenidos mediante la simulación física del método de hundimiento por bloques, centrándose especialmente en el fenómeno de la dilución y la incorporación de material estéril al flujo de mineral útil. Esta evaluación se realiza sobre la base de los datos experimentales obtenidos, las visualizaciones tridimensionales y los gráficos generados, con énfasis en el análisis zonal y la caracterización funcional de la curva de dilución acumulada.

5.1 Análisis de regularidad del tiraje

El análisis de la aparición del primer marcador por eje de extracción en función del porcentaje de material extraído permite confirmar que el flujo del material durante los experimentos fue uniforme y controlado. Como se observa en la Tabla N°9 y en la Ilustración N°12, existe una correlación directa y progresiva entre la altura del marcador (piso) y el porcentaje acumulado de material extraído, lo que indica que el material removido en cada ciclo corresponde efectivamente a las capas superiores del modelo, en orden. Esta regularidad evidencia que el sistema replicó adecuadamente un patrón de hundimiento por bloques con tiraje constante y coherente, sin que se presentaran extracciones prematuras desde niveles superiores ni interrupciones en el avance vertical del flujo gravitacional.

Además, se puede observar que en todos los casos los marcadores ubicados en los puntos de extracción (asociados a los ejes 1, 2 y 3) aparecieron antes que los marcadores de frontera correspondientes a cada eje. Esto confirma que la secuencia de vaciado respetó la configuración física del equipo, donde los puntos de extracción están diseñados para capturar primero el material central antes de que el flujo se expanda lateralmente hacia las zonas de frontera. La similitud en el comportamiento de los tres ejes, así como la consistencia entre ambos experimentos, refuerzan la validez y reproducibilidad del modelo experimental utilizado.

Piso	Altura cm	Eje 1 Ex1	Eje 1 Ex2	Eje2 Ex1	Eje 2 Ex2	Eje 3 Ex1	Eje 3 Ex2
A	10,0	1,3%	4,5%	1,3%	3,6%	1,3%	3,6%
B	20,0	6,0%	8,0%	7,3%	7,1%	8,2%	8,9%
C	30,0	18,1%	13,9%	15,3%	13,9%	13,4%	13,9%
D	40,0	25,3%	24,9%	21,0%	21,3%	22,0%	19,3%
E	50,0	28,7%	30,1%	26,3%	29,3%	26,3%	28,6%
F	60,0	38,7%	35,1%	34,5%	37,6%	33,3%	32,7%
G	70,0	43,5%	41,9%	43,5%	44,0%	45,7%	40,1%
H	80,0	48,0%	54,6%	49,0%	51,2%	52,9%	49,6%
I	90,0	55,0%	62,1%	57,1%	58,7%	62,3%	54,6%
J	100,0	64,1%	68,1%	65,0%	64,2%	65,0%	63,5%
K	110,0	70,8%	76,5%	73,3%	74,3%	71,7%	69,7%
L	120,0	80,3%	84,7%	78,6%	80,9%	77,8%	75,1%
M	130,0	85,5%	90,0%	86,5%	87,5%	84,6%	84,7%
N	140,0	92,1%		92,9%	93,2%	92,1%	95,3%
P	150,0				95,9%	94,4%	95,3%

Tabla 9: Aparición de primer marcador en cada eje de extracción según su % de material extraído en los experimentos N°1 y N°2

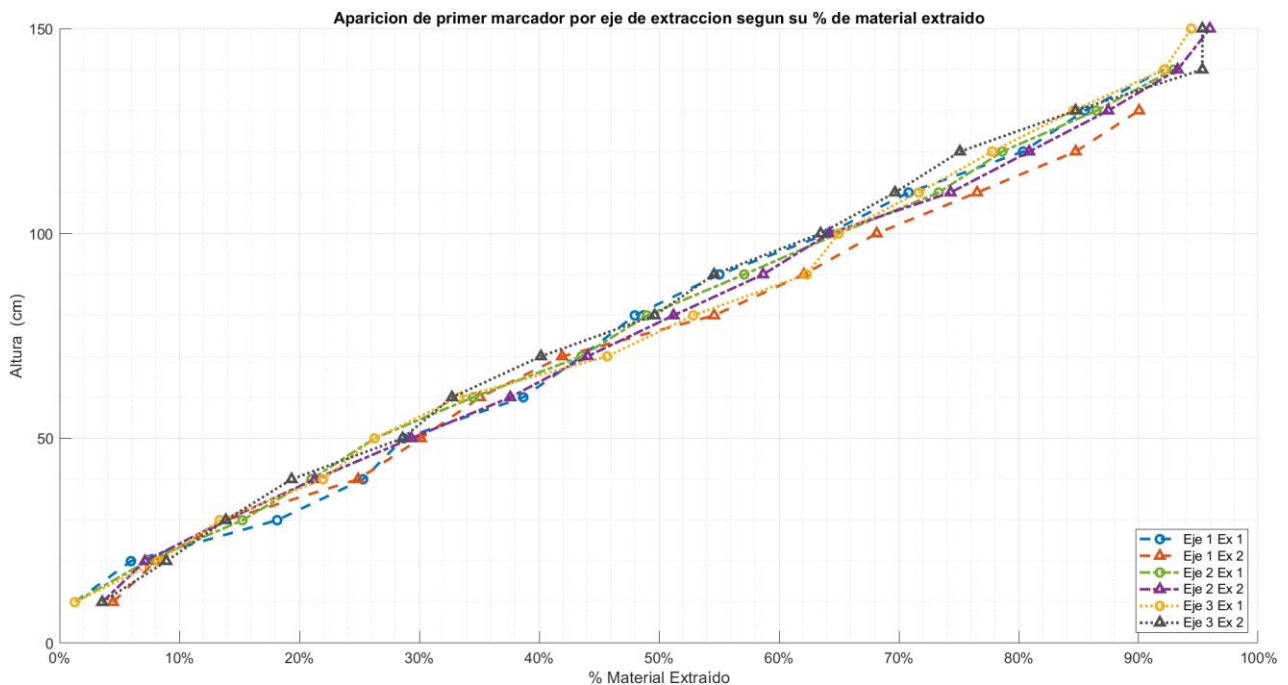


Ilustración12: Aparición de primer marcador por eje de extracción según su % de material extraído para los experimentos N°1 y N°2

5.2 Análisis de comportamiento de los marcadores en mineral

El análisis del comportamiento de los marcadores ubicados dentro del cuerpo mineralizado evidencia una secuencia clara y coherente en su aparición durante el proceso de hundimiento. En ambos experimentos, se observa que los marcadores posicionados en las zonas asociadas directamente a los ejes de extracción son los primeros en ser recuperados, antecediendo de

forma sistemática a los marcadores de frontera de mineral. Esta secuencia sugiere que el flujo gravitacional se inicia en las inmediaciones de los puntos de extracción, propagándose progresivamente hacia las zonas más externas del cuerpo útil.

Esta dinámica es consistente con el comportamiento esperado en un hundimiento controlado, donde el material desciende inicialmente por los canales centrales del caserón y, a medida que avanza el proceso de extracción, se van incorporando por gravedad las partículas ubicadas hacia los bordes internos del mineral. En términos generales, dentro del cuerpo mineralizado se observa siempre la siguiente secuencia de aparición de marcadores:

1. Primero, al menos un marcador ubicado directamente en el punto de extracción,
2. Luego, los marcadores asociados a los ejes de extracción,
3. Finalmente, los marcadores de frontera de mineral, es decir, aquellos cercanos al límite entre el mineral útil y el material estéril, pero aún dentro del cuerpo mineral.

5.3 Análisis del Fenómeno de Dilución

Los resultados de los experimentos muestran que la dilución acumulada aumenta progresivamente a medida que avanzan los ciclos de extracción. Este comportamiento es consistente con la hipótesis inicial de que, en el hundimiento por bloques, el material estéril (arena) ubicado en las zonas laterales y superiores del equipo puede incorporarse al flujo de mineral útil conforme este desciende.

El comportamiento observado está representado gráficamente en la Ilustración 6, donde se muestra la relación entre la dilución acumulada (%) y la masa de mineral extraída (kg). Se evidencia que en ambos experimentos existe un aumento sostenido en la dilución, y que dicho aumento sigue una curva no lineal, con aceleraciones marcadas en ciertos tramos del proceso.

5.4 Interpretación de la Curva Ajustada y su Función

La curva ajustada (Ilustración 7) sintetiza el comportamiento de los experimentos 1 y 2. Su representación funcional aproxima el comportamiento real del sistema y permite derivar un criterio de comportamiento: la dilución acumulada aumenta de forma polinómica con respecto al mineral extraído. Esta función puede utilizarse como criterio para predecir niveles de dilución en futuros estudios o para estimaciones preliminares en operaciones reales.

Este modelo funcional se valida en la Ilustración 8, donde se observan cuatro zonas críticamente delimitadas, cada una asociada a la aparición de un tipo específico de marcador (frontera, laterales, sobrecarga). Estas zonas permiten asociar la dilución con el origen del material estéril incorporado.

5.5 Análisis por Zonas

La curva ajustada se ha dividido en cuatro zonas de análisis (Ilustración 6), conforme al comportamiento de la dilución y a la aparición de marcadores clave:

- Zona 1 (6,1% / 7,2%): Corresponde a la extracción inicial de mineral, que finaliza con la aparición del primer marcador de frontera. Esta etapa se considera libre de dilución significativa y refleja un comportamiento ideal del flujo gravitacional.
- Zona 2 (7,2% / 20,1%) Se produce la aparición del primer marcador de frontera y finaliza con la aparición del primer marcador lateral. La dilución comienza a incrementarse de forma más notoria, indicando la incorporación moderada del material diluyente lateral adyacente al mineral útil.
- Zona 3 (20,1% / 91,5%) Marcada por la aparición del primer marcador lateral y finalizando con la aparición del primer marcador de sobrecarga. A partir de este tramo, la pendiente de la curva de dilución comienza a estabilizarse progresivamente. Este comportamiento se asocia al efecto de esponjamiento del material, el cual reduce la compactación del flujo y amortigua la incorporación abrupta de arena
- Zona 4 (91,5% / 100%) Corresponde a la aparición del primer marcador de sobrecarga (letras N y superiores) y finaliza con la extracción total. Esta zona representa el ingreso del material estéril superior por efecto de sobrecarga, lo que indica una saturación del sistema de extracción.

5.6 Apoyo del Modelamiento 3D

Las visualizaciones en MATLAB del comportamiento de los marcadores (Ilustraciones 9 a 11) permiten observar la trayectoria tridimensional de los elementos representativos del material. Estas representaciones ayudan a identificar zonas de acumulación, patrones de extracción y distribuciones no homogéneas que serían imposibles de detectar mediante tablas o gráficos bidimensionales.

En particular, la visualización de los marcadores no recuperados permite identificar sectores con baja eficiencia de extracción, y las visualizaciones acumuladas ofrecen información clave sobre la progresión de la dilución.

6.Conclusiones

1. La modelación física resultó ser una herramienta válida y efectiva para analizar el fenómeno de dilución en el hundimiento por bloques, ya que permitió observar directamente la progresión del flujo del material, la recuperación de marcadores y la incorporación de material estéril en distintas etapas del proceso. La fidelidad de la simulación, junto con la calidad de los datos recolectados, respalda el uso de este enfoque para estudios futuros en contextos controlados.

2. Los resultados obtenidos confirman que el flujo de material durante la extracción fue regular, progresivo y coherente con un patrón gravitacional controlado. Tanto los registros de masa extraída por piso como la secuencia de aparición de los marcadores evidencian que el proceso de extracción gravitacional respetó una progresión vertical desde los niveles superiores hacia los inferiores. A nivel interno del cuerpo mineral, se observó que el flujo se inició en los puntos de extracción, continuó a través de los marcadores asociados a los ejes de extracción y culminó con la recuperación de marcadores de frontera interna. Esta progresión validó la hipótesis del flujo gravitacional uniforme replicando fielmente el comportamiento esperado en condiciones reales.
3. El fenómeno de dilución presentó un comportamiento no lineal respecto al porcentaje de mineral acumulado extraído, como se observa en la curva ajustada que relaciona la dilución acumulada (%) con la masa de mineral útil extraída (%). En las primeras etapas del proceso (hasta aproximadamente un 20% de extracción), se evidencia una pendiente muy pronunciada, reflejando un aumento abrupto en la incorporación de arena. Esto se debe a que, desde el inicio de la extracción, el flujo gravitacional comienza a incorporar progresivamente el material estéril lateral, generado por el contacto directo entre el mineral y las zonas de arena en los bordes del caserón.

A medida que se avanza hacia el tramo intermedio de la curva (entre un 60% y un 90% de mineral acumulado), la pendiente comienza a suavizarse visiblemente. Esta atenuación no significa que la dilución se detenga, sino que se estabiliza el ritmo de ingreso de arena. Este fenómeno puede explicarse por el efecto de esponjamiento del material fragmentado, que genera una expansión volumétrica dentro del flujo, amortiguando la compactación y ralentizando la incorporación espontánea de nuevo diluyente. En esta zona, si bien la dilución continúa aumentando, lo hace de forma más gradual porque se mantiene un orden constante de arena extraída en cada ciclo, sin incrementos abruptos como los observados al inicio.

Sin embargo, esta estabilidad relativa se rompe al llegar al tramo final del proceso (por sobre el 90% de mineral extraído), donde se produce el contacto con la arena superior (sobrecarga). A partir de este punto, la incorporación de material estéril se vuelve descontrolada y la pendiente de la curva vuelve a incrementarse con fuerza. Esta última etapa representa el agotamiento del mineral útil remanente y la invasión de material desde la zona superior del caserón, lo que marca el colapso final del sistema de control de dilución.

Este comportamiento funcional, con un inicio violento, una etapa intermedia de estabilización y un tramo final de alta dilución, coincide con lo proyectado por Laubscher (1994) para casos reales, y demuestra que la modelación física utilizada no solo permite cuantificar la dilución, sino también identificar sus mecanismos desencadenantes y prever zonas críticas de incorporación de estéril durante el hundimiento por bloques

4. La interpretación de la curva ajustada de dilución acumulada permitió dividir el proceso en cuatro zonas funcionales, cada una vinculada con un tipo específico de marcador. Este enfoque zonal no solo permite describir con mayor precisión la evolución del proceso, sino que ofrece un criterio práctico para el monitoreo del hundimiento, facilitando la detección de umbrales críticos donde la dilución cambia significativamente su pendiente y comportamiento.
5. Las visualizaciones tridimensionales generadas en MATLAB complementaron eficazmente el análisis, ya que hicieron posible observar patrones de acumulación, distribución espacial de los marcadores y zonas de baja recuperación. Estas herramientas aportaron una dimensión visual clave para entender el comportamiento volumétrico del flujo, especialmente en lo que respecta a la incorporación de diluyentes desde zonas laterales o superiores.
6. Uno de los hallazgos más concretos de esta investigación fue la validación experimental de un criterio empírico ampliamente utilizado en minería subterránea. Según la curva ajustada $F(x)$, al llegar al 91,5% de extracción acumulada de mineral, se obtuvo una dilución acumulada cercana al 25%.

Este resultado se vuelve especialmente significativo al considerar que el flujo del material dentro del caserón fue uniforme y secuencial tal como lo demuestran las trayectorias de los marcadores y los datos de extracción por piso lo que permite suponer una distribución equilibrada del ingreso de material estéril. Bajo este supuesto, y considerando que el cuerpo mineralizado estaba en contacto con dos bloques agotados, es razonable deducir que esta dilución se distribuye en partes iguales, es decir, aproximadamente 12,5% de dilución lateral por cada cara.

Este valor encaja perfectamente dentro del rango propuesto por la regla no escrita aplicada en la industria, que estima una dilución entre 10% y 15% por cada cara en contacto con material estéril. La coherencia entre los datos experimentales y este conocimiento empírico proporciona un respaldo cuantitativo que fortalece su uso práctico, y al mismo tiempo demuestra que la modelación física puede servir como herramienta válida para evaluar con rigurosidad estimaciones operativas en minería subterránea.”

7. Referencias Bibliográficas

1. Brown, A. J., & Thomas, J. R. (2020). Understanding the effects of particle size distribution on the efficiency of block caving operations. *Journal of Sustainable Mining*, 19(1), 15-22.

2. Brown, S., et al. (2015). Numerical modeling of block caving dilution in large-scale mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 243-257.
3. Bullock, R., & Hustrulid, W. A. (2001). *Underground mining methods handbook*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
4. Bullock, R. L., & Hustrulid, W. A. (2001). Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies. *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME)*.
5. Carter, A. (2018). Dilution in underground mining: Causes and effects. *Journal of Mining Science*, 54(4), 716-728.
6. Carter, J. (2018). Optimizing block cave mining operations: A review of current best practices. *Mining Technology*, 129(3), 145-158.
7. Chitombo, G., & Bullock, R. (2013). Assessment of block cave dilution using large-scale physical models. *Geotechnical Testing Journal*, 36(2), 310-323.
8. Chitombo, G., & Bullock, R. (2013). Advances in cave mining methods. *Mining Engineering*, 65(11), 35-40.
9. De Oliveira, S., & Sousa, E. (2021). A comprehensive review of the influence of ore fragmentation on mining recovery. *Minerals*, 11(3), 307.
10. González, M., Rodríguez, P., & Silva, A. (2015). Techniques for the collection and analysis of sediment samples in mining. *Journal of Environmental Management*, 156, 123-130.
11. Hoek, E., & Brown, E. (1981). *Rock mechanics in mining engineering*. Geological Survey of Canada.
12. Huang, R., & Chen, H. (2018). The relationship between rock mass properties and caving behavior in underground mining: A literature review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(6), 1217-1227.
13. Kim, J., & Lee, H. (2020). Assessment of dilution in panel caving operations using numerical simulations. *Mining Science*, 27(2), 45-59.
14. Laubscher, D. H. (1994). Cave mining – The state of the art. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 94(10), 279-293.
15. Laubscher, D. H. (1994). The state of the art in block caving. *Mining Engineering*, 46(7), 62-69.
16. Lunder, J., & Pakalnis, R. (1997). The impact of mining practices on dilution and ore recovery. *CIM Bulletin*, 90(1007), 106-110.

17. Lunder, P., & Pakalnis, R. (1997). Assessment of dilution in underground mining. *Mining Engineering*, 49(9), 43-46.
18. Martínez, F., & Rodríguez, C. (2021). The importance of laboratory testing in the design of mining operations: A case study of block caving. *Geotechnical Testing Journal*, 44(5), 563-577.
19. Martínez, R., & Pérez, J. (2018). Numerical simulations of block cave mining for predicting dilution. *Journal of Mining Technology*, 59(3), 213-226.
20. Minera, X. (2017). The impact of granulation on mining efficiency: A comprehensive study. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(6), 987-995.
21. Roberts, B., & Smith, T. (2016). Material flow in underground mining: Insights from laboratory experiments. *Journal of Mining and Geology*, 53(4), 715-728.
22. Vann, J. (2015). The role of granulation in mining operations: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(4), 561-569.
23. Zhang, L., & Wang, Y. (2019). Advances in underground mining technologies: A review of recent developments. *Mining Engineering*, 71(5), 40-47.
24. Laubscher, D. H. (1994). Cave mining – The state of the art. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 94(10), 279–293.
25. Chitombo, G., & Bullock, R. (2013). Assessment of block cave dilution using large-scale physical models. *Geotechnical Testing Journal*, 36(2), 310–323.

8. Anexos

Equipo.

El diseño del equipo se divide en cuatro partes principales que permiten simular el proceso de flujo gravitacional los cuales son:

- a. **Caja:** La caja se ubica en la parte superior del “aparato” y está construida con tableros laterales transparentes (ver Ilustración 1) y en ella se introduce el material.
- b. **Base:** Este elemento es una placa con calados de dimensiones que representan los puntos de extracción del hundimiento por bloques. La placa tiene un espesor de 25 mm para soportar el peso del material.

En la figura 2 se presenta la disposición general de los puntos de extracción, dispuestos en 5 corridas. En que las corridas 1, 3 y 5 tienen 2 puntos de extracción y las corridas 2 y 4 tienen 3 (Ver ilustración 12).

La distancia entre corridas es de 86,6 mm correspondientes a la altura del triángulo equilátero de lado 100mm que forman los puntos de extracción.

- c. **Bandeja recolectora:** Es una bandeja ubicada en la parte inferior del “aparato” en la cual cae el material extraído durante el proceso
- d. **Mecanismo rotatorio:** Ya explicado en metodología

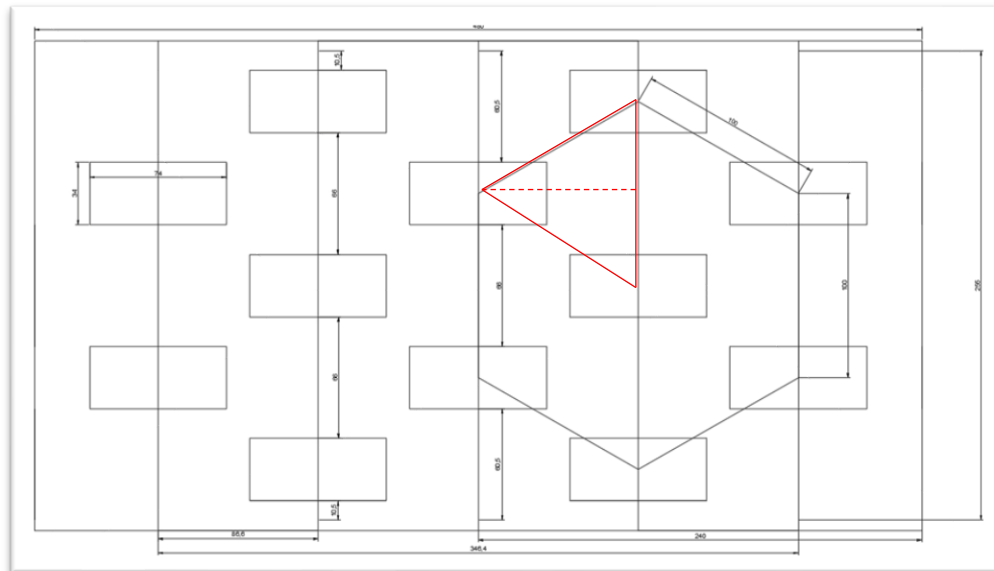


Ilustración 13: Base de equipo



Ilustración 14: Mecanismo de extractores

Placas de Separación: Se utilizan para evitar la mezcla de materiales durante la carga. Estas placas son de acrílico de 2mm de espesor. Tienen dimensiones de 15 cm de altura, 23.8 cm y el ancho interior de la caja

Granulometría

Las cantidades granulométricas necesarias de los materiales se ven reflejadas en la tabla 9.

Rango Granulométrico mm	Malla	Cantidad	Unidad
0,2-0,5	#35-#70	200	Kg
0,5-1,0	#18-#35	39	Kg
1,0-2,0	#10-#18	66	Kg
2,0-3,4	#6-#10	45	Kg
3,4-6,4	1/4"-#6	90	Kg
6,4-12,7	1/2"-1/4"	48	kg
12,7-19,1	3/4"-1/2"	12	Kg
Total		500	Kg

Tabla 10: Cantidades granulométricas de materiales

Proceso de Recolección del Material

El proceso de recolección se realizó de manera sistemática y en varias etapas para garantizar la cantidad necesaria con características físicas uniformes.

Recolección Inicial: Se comenzó con aproximadamente 250 kg de mezcla de gravilla de diferentes tamaños en el laboratorio, junto con 70 kg de arena. Para completar las cantidades necesarias, se recolectó material adicional del Río Maipo en las cubetas de la ilustración 13

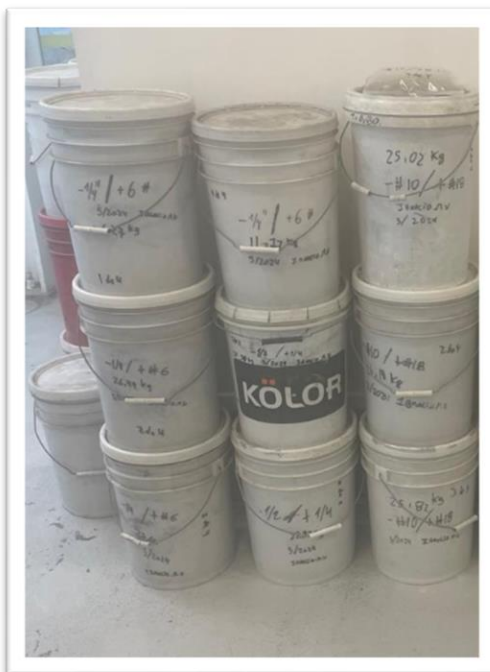


Ilustración 15: Material recolectado del río Maipo

1. ***Secado y Clasificación:*** En el laboratorio, el material se secó para eliminar la humedad residual. Después, se utilizó un harnero (Ilustración 14) para clasificar por tamaño, para ajustar las cantidades a los requisitos establecidos para los experimentos.



Ilustración 16: Harnero Gilson.

2. ***Uso de Molino de Bolas:*** Para completar las proporciones de material requerido, se usó un molino de bolas para reducir el tamaño de material grueso.
3. ***Tamizado:*** El producto molido se pasó por un tamizador (Ilustración 15) para separar el material de acuerdo a las especificaciones del experimento.



Ilustración 17: Tamizador (DURATAB).

Proceso de Roleo

Para cada carga de roleo, se establecieron las siguientes proporciones de material con distintas granulometrías:

Rango Granulométrico		Cantidad	Unidad
mm	Malla		
0,5-1,0	#18-#35	2,6	Kg
1,0-2,0	#10-#18	4,4	Kg
2,0-3,4	#6-#10	3	Kg
3,4-6,4	1/4"-#6	6	Kg
6,4-12,7	1/2"-1/4"	3,2	kg
12,7-19,1	3/4"-1/2"	0,8	Kg
Total		20	Kg

Tabla 11: Proporciones de Roleo

El proceso de roleo se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. **Preparación del Área de Trabajo:** Se limpia el área donde se realizará el roleo para evitar contaminación cruzada entre las diferentes granulometrías.
2. **Pesado de los Materiales:** Cada fracción de granulometría se pesa de acuerdo con las proporciones establecidas. Es importante utilizar una balanza calibrada para asegurar la precisión, ya que las variaciones en la cantidad de material pueden alterar los resultados.
3. **Mezcla de los Materiales:** Una vez pesadas las distintas granulometrías, se colocan en un recipiente de mezcla. Se debe mezclar cuidadosamente para asegurar que las partículas se distribuyan uniformemente. Este proceso puede realizarse manualmente o utilizando una mezcladora mecánica, lo que garantiza la homogeneidad de la mezcla, un aspecto crucial para el éxito del experimento.
4. **Control de Calidad de la Mezcla:** Durante el proceso de roleo, se verifica que no haya segregación de partículas y que la mezcla permanezca homogénea (ver Ilustración 16). Si se detecta alguna inconsistencia, se repite el proceso hasta obtener la calidad deseada.



Ilustración 18: Secuencia de Roleo del material.

Carguío de Equipo

El proceso de carga del equipo fue llevado a cabo en capas, con una altura específica de 10 cm por capa, lo que permitió una distribución controlada y homogénea del material durante todo el procedimiento experimental. La disposición del material en el equipo se organizó conforme a las siguientes especificaciones técnicas:

- ***Laterales:*** Se asignaron dos laterales con dimensiones exactas de 10.75 cm de ancho y 24 cm de profundidad, los cuales fueron cargados exclusivamente con arena. Este material actúa como un control de fondo que facilita la segregación de las capas de gravilla, evitando su mezcla durante el proceso de hundimiento.
- ***Centro:*** La sección central del equipo fue cargada con la mezcla de gravilla, utilizando un bloque con dimensiones de 26 cm de ancho y 24 cm de profundidad.

El proceso de carga se repitió para cada uno de los 14 pisos de la estructura experimental (ver ilustración 17). El piso número 15 fue cargado exclusivamente con arena, actuando como un material estéril.



Ilustración 19: Distribución de carga con vista en planta.

Una vez que los marcadores fueron posicionados en la placa de posicionamiento, se trasladaron al equipo de simulación para su fijación final.

Marcadores

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15
y1					16						48				
y2				11		23		32		43		55			
y3	1		7		17		28		39		49		60		66
y4		5						33						65	
y5	2		8		18		19		40		50		61		67
y6				12		24				44		56			
y7								34							
y8					19						51				
y9								35							
y10				13		25				45		57			
y11	3		9				30		41				62		68
y12		6			20			36			52			66	
y13	4		10				31		42				63		69
y14					21			37			53				
y15				14		26				46		58			
y16					22						54				
y17								38							
y18				15		27				47		59			

Tabla 12: Distribución de marcadores en coordenadas XY



Ilustración 20: Marcadores puestos en placa de posicionamiento y en equipo.

Extracción y Procesamiento del Material

El sistema de engranajes es esencial, ya que distribuye el movimiento a los ocho rodillos de extracción, los cuales están distribuidos en tres ejes diferentes. Los rodillos están ubicados a una distancia de 100 mm entre cada uno y la distancia entre eje y eje es de 86.6 mm. Cada eje tiene un número diferente de rodillos y grados de apertura, lo cual influye directamente en la dinámica de la extracción.

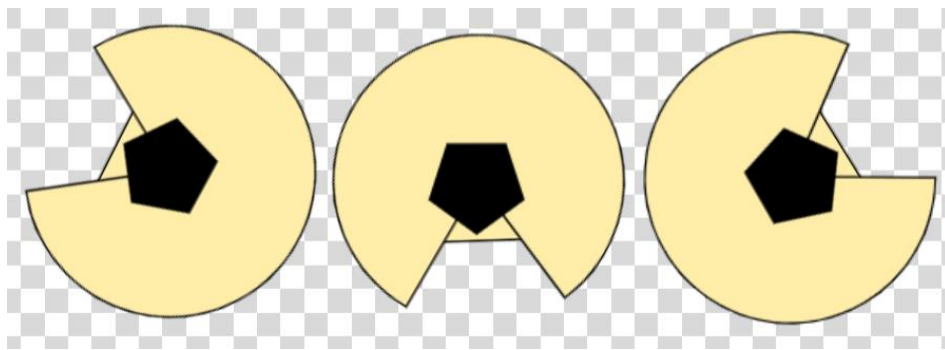


Ilustración 21: Distancia de rodillos a 120°

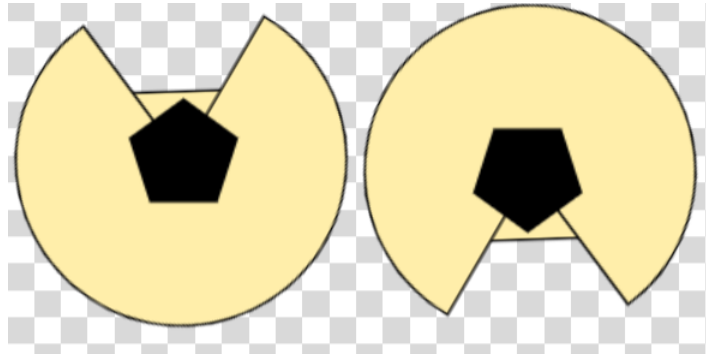


Ilustración 22: Distancia de rodillos a 180° Primero



Ilustración 23: Extracción del material.



Ilustración 24: Bolsas rellenas con ciclos de extracción de mineral.



Ilustración 25: Tamices utilizados en el proceso.

Tablas completas de datos recolectados y procesados

Ciclo	Piso	M.Mineral	M.Frontera.Izq	M.Laterales.Izq	M.Frontera.Der	M.Laterales.Der
1	A	1	0	0	0	0
2	A	9	0	0	0	0
3	A	5	0	0	0	0

4	A	4	0	0	0	0
5	A	5	0	0	0	0
	B	3	0	0	0	0
6	A	6	0	0	0	0
	B	4	0	0	0	0
7	A	1	0	0	0	0
	B	4	1	0	0	0
8	A	0	0	0	1	0
	B	3	0	0	0	0
9	A	2	0	0	1	0
	B	3	3	0	1	0
10	A	1	0	0	0	0
	B	4	1	0	0	0
11	A	0	1	0	0	0
	B	2	0	0	0	0
	C	1	1	0	0	0
12	B	6	0	0	0	0
	C	1	0	0	0	0
13	B	1	1	0	0	0
	C	1	0	0	0	0
14	A	0	1	0	0	0
	B	2	1	0	1	0
	C	1	1	0	1	0
15	A	1	1	0	0	0
	C	2	0	0	0	0
16	B	1	0	0	0	0
	C	4	0	0	1	0
17	A	0	0	0	1	0
	B	0	0	0	1	0
	C	5	1	0	1	0
18	A	1	1	0	1	0
	B	3	0	0	0	0
	C	4	1	0	0	0
19	A	0	0	0	1	0
	B	1	0	0	0	0
	C	3	0	0	1	0
	D	2	1	0	1	0
20	A	0	0	0	1	0
	B	0	1	0	2	0
	C	0	0	0	2	0
	D	2	0	0	0	0
21	A	1	1	0	1	0
	B	0	0	0	1	0

	C	3	1	0	1	0
	D	3	1	0	0	0
21	A	0	0	0	1	0
	B	0	1	0	1	0
	C	3	1	0	0	0
	D	1	0	0	2	0
23	C	2	0	0	1	0
	D	6	0	0	0	0
24	A	0	1	0	0	0
	B	0	0	1	0	0
	C	2	1	0	0	0
	D	6	0	0	1	0
25	B	0	0	0	1	0
	C	1	0	0	0	0
	D	2	1	0	0	0
	E	3	0	0	1	0
26	A	1	0	0	1	0
	C	1	0	0	1	0
	D	2	0	0	0	0
	E	2	0	0	1	0
27	A	0	1	0	0	0
	B	1	0	0	0	0
	C	2	1	0	0	0
	D	1	1	0	2	0
	E	3	1	0	0	0
28	A	1	0	0	0	0
	C	0	1	0	0	0
	D	1	0	0	1	0
	E	4	0	0	1	0
29	B	0	1	0	0	1
	C	1	0	0	0	1
	D	1	1	0	0	0
	E	1	0	0	0	0
30	A	0	1	0	0	0
	B	0	0	1	0	0
	C	1	0	1	0	0
	D	0	1	0	0	0
	E	4	1	0	1	0
31	D	2	0	0	0	0
	E	3	1	0	1	0
	F	1	0	0	1	0
32	D	2	0	0	0	0
	E	2	0	0	1	0

	F	7	0	0	0	0
33	D	1	0	0	0	0
	E	1	0	0	0	0
	F	1	0	0	0	0
34	C	0	0	0	0	1
	D	1	0	0	0	1
	E	4	0	0	1	0
	F	2	0	0	0	0
35	B	1	0	0	0	0
	C	0	0	1	0	0
	D	1	0	0	1	0
	E	2	0	0	1	0
	F	4	0	0	1	0
36	D	1	0	0	0	0
	F	6	1	0	0	0
37	E	3	2	0	0	0
	F	3	0	0	2	0
38	D	0	2	0	0	0
	E	1	1	0	0	0
	F	2	1	0	0	0
39	D	0	0	2	0	1
	E	1	0	0	0	0
	F	1	2	0	1	0
	G	2	0	0	0	0
40	D	1	0	1	1	0
	E	1	0	0	0	0
	F	3	1	0	0	0
	G	4	0	0	0	0
41	D	1	0	0	0	0
	E	1	0	0	0	0
	F	0	1	0	0	0
	G	3	2	0	0	0
42	C	0	0	0	0	1
	D	0	0	0	0	0
	E	0	0	1	0	0
	F	1	0	0	0	0
	G	4	1	0	0	0
43	F	0	1	0	0	0
	G	7	0	0	1	0
44	C	0	0	0	0	1
	E	0	0	0	1	1
	F	4	0	1	0	0
	G	4	0	0	2	0

	H	3	1	0	0	0
45	D	0	0	1	0	0
	E	0	0	1	0	0
	F	0	1	0	0	0
	G	2	0	0	0	0
	H	3	1	0	0	0
46	F	1	1	0	0	0
	G	0	2	0	0	0
	H	2	0	0	0	0
47	E	1	0	1	0	0
	G	0	0	0	1	0
	H	2	0	0	0	0
48	D	0	0	1	0	1
	E	0	0	0	0	1
	F	0	0	0	1	0
	G	2	2	0	2	0
	H	1	2	0	0	0
49	F	1	0	0	0	0
	G	1	2	0	0	0
	H	4	0	0	0	0
50	E	1	0	0	0	0
	F	0	0	1	0	0
	G	1	0	0	0	0
	H	5	0	0	2	0
51	F	1	0	1	0	0
	G	4	0	0	1	0
	H	1	1	0	1	0
	I	1	0	0	0	0
52	G	3	0	1	0	0
	H	3	1	0	0	0
	I	2	0	0	0	0
53	E	0	1	0	0	0
	H	3	0	0	1	0
	I	3	1	0	0	0
54	E	0	0	1	0	0
	F	0	0	1	0	0
	H	4	0	0	1	0
	I	1	0	0	1	0
55	F	0	0	0	0	1
	G	0	0	0	1	0
	H	2	1	0	1	0
	I	1	0	0	0	0
56	E	0	0	0	0	1

	H	1	1	0	0	0
	I	2	2	0	1	0
57	D	0	0	0	0	1
	G	0	0	0	0	1
	H	1	0	0	0	0
	I	2	0	0	1	0
58	E	0	1	0	0	0
	F	0	1	0	0	1
	G	1	0	0	0	0
	I	4	0	0	2	0
59	E	1	0	0	0	0
	H	0	0	0	2	0
	I	6	1	0	0	0
60	D	0	0	0	0	1
	F	1	0	1	0	1
	H	0	1	0	0	0
	I	1	1	0	1	0
61	H	1	0	0	0	0
	I	2	0	0	0	0
	J	1	0	0	0	0
62	G	0	0	1	1	0
	I	2	1	0	0	0
	J	4	0	0	0	0
63	B	1	0	0	0	0
	I	3	0	0	2	0
	J	4	1	0	1	0
64	C	0	0	0	0	1
	G	0	0	1	0	0
	H	0	0	1	0	0
	I	2	0	0	0	0
	J	3	1	0	0	0
65	F	1	0	0	0	0
	G	0	0	0	0	1
	I	1	0	0	0	0
	J	7	1	0	0	0
66	G	0	0	1	0	0
	I	1	0	0	0	0
	J	3	0	0	2	0
67	E	0	1	0	0	0
	F	0	0	0	0	1
	H	0	0	0	1	0
	J	1	0	0	1	0
68	E	0	1	0	0	1

	F	0	0	0	0	1
	I	1	0	0	0	0
	J	1	0	0	0	0
69	C	0	0	1	0	0
	I	0	1	0	0	0
	J	1	1	0	1	0
	K	2	0	0	0	0
70	I	2	1	0	0	0
	J	6	0	0	0	0
	K	2	0	0	0	0
71	J	0	1	0	0	0
	K	1	0	0	1	0
72	G	0	0	0	0	1
	J	1	0	0	2	0
	K	4	2	0	0	0
73	H	0	0	0	0	0
	J	1	0	0	0	1
	K	3	0	0	2	0
74	G	0	0	1	0	0
	I	0	0	1	0	0
	J	2	0	0	0	0
	K	2	0	0	1	0
75	H	0	0	0	0	1
	I	0	0	1	0	0
	K	4	1	0	0	0
76	H	0	1	1	0	0
	J	1	1	0	0	0
	K	5	0	0	0	0
77	A	0	1	0	0	0
	H	0	0	1	0	0
	J	1	0	0	0	0
	K	3	2	0	1	0
	L	1	0	0	0	0
78	K	3	0	0	1	0
	L	2	0	0	0	0
79	G	0	0	0	0	2
	H	0	0	1	0	0
	I	0	0	0	0	1
	J	1	0	0	1	0
	K	1	0	0	0	0
	L	3	2	0	0	0
80	K	0	2	0	0	0
	L	4	0	0	0	0

81	K	1	1	0	0	0
	L	2	0	0	0	0
82	D	0	1	0	0	0
	H	0	0	0	0	2
	L	5	1	0	1	0
83	E	0	0	0	0	1
	H	0	0	0	0	1
	I	0	1	0	0	0
	L	5	2	0	0	0
84	I	0	1	0	0	0
	L	4	1	0	0	0
85	K	0	0	0	1	0
	I	0	0	0	0	1
	J	1	0	0	0	0
	L	2	0	0	0	0
	M	2	0	0	0	0
86	K	0	0	0	1	0
	L	0	0	0	1	0
	M	2	0	0	1	0
87	H	0	0	1	0	0
	I	1	0	0	0	0
	K	1	0	0	0	0
	L	5	0	0	0	0
	M	3	0	0	1	0
88	H	0	0	1	0	0
	I	0	0	0	1	0
	M	3	4	0	0	0
89	K	1	0	0	0	0
	L	1	0	0	1	0
	M	2	0	0	0	0
90	J	0	0	1	0	0
	L	0	0	0	1	0
	M	3	1	0	1	0
91	G	0	1	0	0	0
	I	0	0	1	0	0
	J	0	0	0	1	0
	K	1	0	0	0	0
	L	1	0	0	0	0
	M	3	0	0	0	0
92	C	0	0	1	0	0
	L	1	1	0	0	0
	M	2	0	0	1	0
93	F	0	0	0	1	0

	J	0	0	0	0	1
	M	3	0	0	0	0
	N	1	0	0	0	0
94	L	0	1	0	0	0
	M	2	0	0	0	0
	N	4	1	0	1	0
95	I	0	0	1	0	0
	K	2	0	0	0	0
	L	1	0	0	0	0
	M	3	0	0	0	0
	N	3	0	0	0	0
96	F	0	0	0	1	0
	K	1	0	0	0	0
	M	1	0	0	1	0
	N	5	0	0	1	0
97	J	0	0	1	0	0
	K	0	1	0	0	0
	M	3	0	0	0	0
	N	5	1	0	0	0
	P	1	0	0	0	0

Tabla 13: Marcadores de cada tipo correspondientes al experimento N°1

Ciclo	Piso	M.Mineral	M.Frontera.Izq	M.Laterales.Izq	M.Frontera.Der	M.Laterales.Der
2	A	2	0	0	0	0
3	A	5	0	0	0	0
4	A	8	0	0	0	0
5	A	5	0	0	0	0
6	A	6	0	0	0	0
7	A	3	2	0	0	0
	B	1	0	0	0	0
8	A	3	0	0	0	0
	B	4	0	0	0	0
9	A	0	2	0	0	0
	B	6	0	0	0	0
10	A	1	2	0	0	0
	B	3	0	0	0	0
11	B	2	0	0	0	0
12	A	0	1	0	0	0
	B	0	0	0	1	0
13	A	1	1	0	0	0
	B	3	2	0	1	0

14	B	3	0	0	4	0
	C	2	1	0	0	0
15	A	0	1	0	0	0
	B	2	2	0	0	0
	C	4	0	0	1	0
16	A	0	1	0	0	0
	B	2	2	0	0	1
	C	5	0	0	1	0
17	B	4	0	0	1	0
	C	5	0	0	0	0
18	B	1	1	0	0	0
	C	5	2	0	0	0
	D	0	0	0	1	0
19	B	1	0	0	0	0
	C	1	2	0	0	0
	D	1	0	0	0	0
20	A	1	1	0	0	0
	B	0	0	1	0	0
	C	1	2	0	0	0
	D	1	0	0	1	0
21	B	0	0	0	1	0
	C	2	0	0	2	0
22	B	1	0	1	1	0
	C	2	0	0	0	0
	D	2	0	0	0	0
23	A	1	0	0	0	0
	B	0	0	1	0	0
	C	1	1	0	0	0
	D	6	0	0	0	0
24	B	1	0	0	0	0
	C	1	0	0	3	0
	D	4	0	0	1	0
25	C	2	0	0	0	0
	D	2	0	0	0	0
26	A	0	0	0	1	0
	B	0	0	0	0	1
	C	1	1	0	0	0
	D	2	0	0	0	0
27	D	2	3	0	0	0
	E	2	0	0	0	0
28	A	1	0	0	1	0
	B	2	0	0	0	0

	C	1	0	0	0	0
	D	5	0	0	1	0
29	D	3	0	0	0	0
	E	1	0	0	0	0
30	C	3	0	0	1	0
	D	1	2	0	2	0
	E	1	0	0	0	0
31	B	1	0	0	0	0
	D	1	0	0	0	0
	E	2	0	0	2	0
32	A	1	0	0	0	0
	D	1	0	0	0	0
	E	6	1	0	0	0
33	D	0	1	0	0	0
	E	1	1	0	0	0
34	C	0	0	0	1	0
	D	0	1	0	0	0
	E	2	2	0	0	0
35	C	1	0	1	0	0
	D	2	0	0	0	0
	E	3	0	0	1	0
	F	2	0	0	0	0
36	D	0	1	0	0	0
	E	4	0	0	0	0
	F	1	0	0	0	0
37	D	2	0	0	0	0
	E	4	1	0	0	0
38	B	0	0	1	0	0
	D	1	0	0	1	0
	E	0	1	0	0	0
	F	1	0	0	0	0
39	B	0	0	1	0	0
	E	1	1	0	0	0
	F	1	1	0	1	0
40	D	1	0	0	1	0
	E	1	1	0	0	0
	F	2	1	0	0	0
41	E	2	0	0	0	0
	F	5	0	0	0	0
42	E	2	0	0	0	0
	F	5	1	0	1	0
43	C	1	0	0	0	0
	D	0	0	0	0	1

	F	2	1	0	0	0
44	E	2	0	0	1	0
	F	3	0	0	0	0
	G	1	0	0	0	0
45	C	0	0	1	0	0
	E	1	0	0	1	0
	F	2	0	0	0	0
	G	1	0	0	0	0
46	F	1	0	0	0	0
	G	1	0	0	0	0
47	F	4	1	0	0	0
	G	2	0	0	1	0
48	C	0	1	0	0	0
	D	0	1	0	0	0
	F	1	0	0	0	0
	G	3	0	0	0	0
49	A	0	0	0	1	0
	C	0	0	0	0	1
	D	0	0	0	1	0
	E	0	1	0	3	0
	F	1	1	0	1	0
	G	3	0	0	0	0
50	C	0	0	1	0	0
	D	0	0	1	0	0
	F	2	0	0	0	0
	G	3	1	0	0	0
51	B	0	0	0	0	1
	C	1	0	1	0	0
	D	0	0	0	0	1
	E	1	0	0	0	0
	G	3	0	0	0	0
	H	1	0	0	0	0
52	F	1	0	0	0	0
	G	5	1	0	0	0
53	D	1	0	0	0	0
	E	1	0	0	0	1
	F	0	0	0	1	0
	G	2	1	0	0	0
	H	1	0	0	0	0
54	F	0	1	0	1	0
	G	3	0	0	0	0
	H	4	0	0	0	0
55	F	2	0	0	1	0

	G	4	0	0	0	0
	H	3	0	0	0	0
56	C	0	0	0	0	1
	F	1	0	0	0	0
	G	0	0	0	1	0
	H	2	0	0	0	0
57	B	0	0	0	0	1
	C	0	0	1	0	0
	D	0	0	0	0	1
	G	2	1	0	0	0
	H	1	0	0	1	0
58	G	3	1	0	1	0
	H	2	0	0	0	0
59	D	0	0	1	0	0
	G	2	0	0	1	0
	H	5	0	0	1	0
60	F	0	0	0	1	0
	G	1	0	0	0	0
	H	2	1	0	0	0
	I	1	0	0	0	0
61	D	0	0	0	0	1
	G	0	0	0	1	0
	H	5	2	0	0	0
	I	1	0	0	1	0
62	B	0	0	0	0	1
	G	0	1	0	0	0
	H	1	0	0	1	0
	I	1	0	0	0	0
63	E	1	0	0	0	0
	H	1	1	0	0	0
	I	1	0	0	0	0
64	E	0	0	0	0	1
	F	0	0	0	0	1
	H	3	0	0	0	0
	I	0	0	0	1	0
65	E	0	0	0	1	0
	G	0	0	0	1	0
	H	3	2	0	1	0
	I	1	0	0	1	0
66	G	0	1	0	0	0
	H	1	1	0	0	0
	I	2	0	0	0	0
67	I	4	0	0	0	0

68	H	1	0	0	0	0
	I	5	0	0	0	0
	J	1	0	0	0	0
69	G	0	0	0	1	0
	H	1	0	0	1	0
	I	4	0	0	0	0
70	I	2	0	0	0	0
71	E	0	0	0	0	1
	I	1	0	0	0	0
	J	1	0	0	1	0
72	J	3	0	0	1	0
73	F	0	0	0	0	1
	H	1	0	0	0	0
	I	2	0	0	0	0
	J	4	0	0	0	0
74	G	0	0	0	1	0
	H	0	0	0	1	0
	I	3	0	0	1	0
	J	2	0	0	0	0
75	E	0	0	2	0	0
	F	0	0	1	0	0
	G	0	0	0	0	1
	I	1	2	0	0	0
	J	1	0	0	0	0
76	I	1	0	0	0	0
	J	3	0	0	0	0
77	H	0	0	0	1	0
	I	1	1	0	0	0
	J	5	1	0	0	0
78	E	0	0	1	0	0
	F	0	0	0	0	1
	I	0	1	0	0	0
	J	1	1	0	0	0
79	J	3	0	0	0	0
	K	3	0	0	0	0
80	I	1	0	0	0	0
	J	3	0	0	0	0
81	E	0	0	1	0	0
	H	0	0	0	1	0
	I	1	0	0	0	0
	J	2	0	0	0	0
82	F	0	1	0	0	0
	H	0	1	0	0	0

	J	0	1	0	1	0
	K	1	0	0	2	0
83	C	0	0	0	0	1
	J	3	0	0	0	0
84	G	0	1	0	0	0
	I	1	0	0	0	0
	J	1	0	0	0	0
	K	3	0	0	0	0
85	F	0	0	0	0	1
	K	4	0	0	1	0
86	I	0	0	0	2	0
	J	1	1	0	0	0
	K	7	0	0	0	0
	L	1	0	0	0	0
	E	0	0	0	0	1
87	K	3	2	0	0	0
	L	1	0	0	0	0
88	G	0	0	0	0	1
	K	3	0	0	0	0
	L	0	0	0	1	0
89	F	0	0	1	0	0
	J	1	1	0	0	0
	K	1	1	0	1	0
90	F	0	0	0	0	1
	I	0	1	0	1	0
	J	1	0	0	2	0
	K	2	1	0	0	0
	L	1	0	0	0	0
91	J	1	1	0	0	0
	K	1	1	0	2	0
92	K	1	0	0	1	0
	L	1	0	0	0	0
93	F	0	0	1	0	0
	J	1	0	0	0	0
	L	4	0	0	0	0
94	I	0	0	0	1	0
	K	1	1	0	0	0
	L	6	0	0	1	0
95	G	0	0	0	0	1
	I	1	0	0	0	0
	K	1	1	0	1	0
	L	4	1	0	0	0
96	L	2	2	0	0	0

97	K	1	0	0	1	0
	L	3	0	0	1	0
98	C	0	0	0	0	1
	F	0	0	1	0	0
	J	0	0	0	1	0
	K	1	0	0	0	0
	L	3	0	0	0	0
99	G	0	0	1	0	0
	H	0	1	0	0	0
	L	2	2	0	0	0
	M	2	0	0	0	0
100	J	0	0	0	1	0
	L	3	0	0	2	0
	M	1	0	0	0	0
101	F	0	0	1	0	0
	K	3	0	0	0	0
	L	3	0	0	0	0
	M	1	0	0	0	0
102	C	0	0	0	0	1
	H	0	0	0	0	1
	J	1	0	0	0	0
	K	1	0	0	1	0
	L	3	0	0	1	0
	M	5	0	0	0	0
103	I	0	0	0	0	1
	L	1	0	0	0	0
	M	3	0	0	0	0
104	G	0	1	0	0	0
	H	0	0	0	0	1
	M	4	3	0	1	0
105	M	0	0	0	1	0
	L	5	1	0	0	0
106	L	0	2	0	0	0
	M	5	0	0	1	0
107	G	0	0	0	0	1
	M	5	0	0	0	0
	N	2	0	0	0	0
108	M	1	1	0	0	0
	N	1	0	0	1	0
109	M	1	1	0	1	0
	N	4	0	0	0	0
110	M	1	0	0	0	0
	N	5	0	0	0	0

111	H	0	0	0	0	1
	M	1	0	0	1	0
	N	7	1	0	0	0
112	H	0	0	1	0	0
	M	1	0	0	0	0
	N	4	1	0	0	0
	P	3	0	0	0	0
113	D	0	0	1	0	0
	G	0	0	1	0	0
	L	1	0	0	0	0
	N	2	1	0	0	0
	P	5	0	0	0	0

Tabla 14: Marcadores de cada tipo correspondientes al experimento N°2

N°	Peso kg	Peso en kg acumulado	Mezcla en Kg	Mezcla en Kg acumulado	Arena en Kg	Arena en Kg Acumulado	% Dilución	% Dilución Acumulado
1	1,82	1,82	1,76	1,76	0,05	0,05	2,8%	2,8%
2	1,86	3,68	1,78	3,54	0,07	0,12	3,8%	3,3%
3	1,68	5,35	1,59	5,13	0,08	0,20	4,7%	3,7%
4	1,54	6,90	1,44	6,57	0,10	0,30	6,5%	4,3%
5	1,78	8,68	1,66	8,23	0,11	0,41	6,4%	4,8%
6	2,06	10,74	1,89	10,12	0,16	0,57	7,8%	5,4%
7	1,38	12,12	1,24	11,35	0,13	0,71	9,6%	5,8%
8	1,66	13,77	1,45	12,81	0,19	0,90	11,5%	6,5%
9	1,68	15,45	1,44	14,25	0,23	1,12	13,4%	7,3%
10	1,52	16,97	1,25	15,50	0,25	1,38	16,8%	8,1%
11	1,98	18,95	1,54	17,04	0,42	1,80	21,3%	9,5%
12	1,69	20,64	1,41	18,45	0,26	2,07	15,7%	10,0%
13	1,62	22,26	1,37	19,82	0,23	2,30	14,4%	10,3%
14	1,71	23,97	1,25	21,07	0,44	2,74	25,7%	11,4%
15	1,63	25,60	1,28	22,35	0,34	3,07	20,6%	12,0%
16	1,58	27,18	1,26	23,61	0,30	3,38	19,1%	12,4%
17	1,80	28,98	1,44	25,06	0,34	3,71	18,8%	12,8%
18	1,77	30,75	1,33	26,39	0,43	4,14	24,0%	13,5%
19	1,65	32,40	1,28	27,67	0,36	4,50	21,6%	13,9%
20	1,71	34,11	1,35	29,02	0,34	4,84	20,2%	14,2%
21	1,77	35,88	1,32	30,34	0,43	5,28	24,5%	14,7%
22	2,07	37,95	1,58	31,92	0,53	5,80	25,5%	15,3%
23	2,10	40,05	1,54	33,46	0,54	6,34	25,5%	15,8%
24	1,93	41,97	1,50	34,96	0,41	6,75	21,5%	16,1%
25	1,84	43,81	1,33	36,29	0,49	7,24	26,6%	16,5%

26	2,21	46,02	1,58	37,87	0,61	7,85	27,6%	17,1%
27	2,39	48,41	1,78	39,65	0,58	8,43	24,4%	17,4%
28	1,98	50,39	1,41	41,06	0,55	8,98	27,7%	17,8%
29	2,06	52,45	1,36	42,42	0,68	9,66	32,9%	18,4%
30	2,88	55,33	1,89	44,31	0,96	10,62	33,5%	19,2%
31	2,53	57,86	1,73	46,04	0,78	11,41	31,0%	19,7%
32	2,41	60,27	1,59	47,63	0,80	12,21	33,2%	20,3%
33	1,88	62,15	1,27	48,90	0,60	12,81	31,8%	20,6%
34	2,15	64,30	1,48	50,38	0,65	13,46	30,3%	20,9%
35	2,25	66,54	1,56	51,94	0,67	14,12	29,7%	21,2%
36	2,13	68,67	1,47	53,41	0,64	14,77	30,2%	21,5%
37	2,34	71,01	1,51	54,91	0,81	15,57	34,5%	21,9%
38	2,56	73,57	1,56	56,47	0,98	16,55	38,2%	22,5%
39	2,89	76,46	1,89	58,36	0,98	17,52	33,7%	22,9%
40	2,75	79,21	1,75	60,11	0,98	18,50	35,6%	23,4%
41	2,90	82,12	1,84	61,96	1,04	19,54	35,7%	23,8%
42	1,78	83,89	1,11	63,06	0,65	20,19	36,8%	24,1%
43	2,56	86,46	1,71	64,77	0,83	21,03	32,5%	24,3%
44	2,34	88,80	1,48	66,25	0,85	21,87	36,1%	24,6%
45	2,09	90,89	1,39	67,65	0,68	22,55	32,6%	24,8%
46	1,94	92,83	1,36	69,01	0,56	23,11	28,7%	24,9%
47	1,70	94,53	1,19	70,20	0,50	23,61	29,5%	25,0%
48	2,30	96,84	1,52	71,72	0,76	24,37	33,0%	25,2%
49	1,98	98,82	1,27	72,99	0,68	25,05	34,5%	25,4%
50	1,91	100,72	1,39	74,39	0,49	25,55	25,9%	25,4%
51	2,31	103,03	1,60	75,99	0,68	26,23	29,6%	25,5%
52	2,25	105,28	1,55	77,54	0,68	26,91	30,1%	25,6%
53	2,02	107,30	1,31	78,85	0,69	27,60	33,9%	25,7%
54	1,69	108,99	1,17	80,02	0,50	28,10	29,8%	25,8%
55	1,67	110,66	1,08	81,10	0,56	28,66	33,7%	25,9%
56	1,60	112,26	1,01	82,11	0,57	29,23	35,7%	26,0%
57	1,88	114,14	1,27	83,38	0,59	29,82	31,1%	26,1%
58	1,80	115,95	1,22	84,60	0,56	30,38	31,2%	26,2%
59	2,18	118,12	1,45	86,04	0,40	30,78	18,5%	26,1%
60	2,10	120,22	1,43	87,47	0,65	31,43	30,8%	26,1%
61	1,59	121,81	1,03	88,51	0,53	31,96	33,4%	26,2%
62	1,85	123,66	1,21	89,72	0,61	32,57	33,1%	26,3%
63	1,93	125,60	1,26	90,98	0,65	33,22	33,6%	26,5%
64	1,83	127,42	1,28	92,25	0,53	33,75	29,0%	26,5%
65	1,83	129,26	1,21	93,46	0,60	34,35	32,6%	26,6%
66	1,89	131,15	1,20	94,66	0,66	35,01	35,1%	26,7%
67	1,92	133,07	1,17	95,83	0,72	35,74	37,5%	26,9%
68	1,55	134,62	0,97	96,80	0,56	36,29	36,0%	27,0%

69	1,59	136,21	0,98	97,78	0,59	36,88	37,0%	27,1%
70	1,87	138,08	1,18	98,96	0,67	37,55	35,5%	27,2%
71	1,75	139,84	1,15	100,11	0,58	38,12	32,8%	27,3%
72	1,72	141,56	1,14	101,25	0,55	38,67	32,0%	27,3%
73	1,82	143,38	1,17	102,42	0,63	39,30	34,5%	27,4%
74	1,88	145,26	1,23	103,65	0,62	39,93	33,2%	27,5%
75	1,83	147,09	1,18	104,83	0,62	40,55	34,2%	27,6%
76	1,92	149,01	1,33	106,16	0,57	41,12	29,6%	27,6%
77	1,86	150,86	1,27	107,42	0,57	41,68	30,4%	27,6%
78	1,74	152,60	1,15	108,57	0,56	42,25	32,5%	27,7%
79	1,78	154,38	1,16	109,73	0,60	42,84	33,5%	27,8%
80	1,77	156,15	1,23	110,96	0,53	43,38	30,0%	27,8%
81	1,81	157,96	1,26	112,22	0,54	43,91	29,6%	27,8%
82	1,86	159,82	1,27	113,49	0,56	44,48	30,2%	27,8%
83	1,65	161,47	1,08	114,57	0,55	45,02	33,1%	27,9%
84	1,37	162,84	1,03	115,60	0,33	45,35	23,7%	27,8%
85	1,77	164,61	1,18	116,78	0,57	45,91	32,1%	27,9%
86	1,75	166,36	1,30	118,08	0,42	46,34	24,3%	27,9%
87	1,97	168,32	1,35	119,43	0,59	46,93	30,1%	27,9%
88	1,77	170,09	1,17	120,60	0,57	47,50	31,9%	27,9%
89	1,62	171,72	1,14	121,74	0,46	47,96	28,3%	27,9%
90	1,42	173,14	1,05	122,79	0,35	48,30	24,6%	27,9%
91	1,70	174,84	1,14	123,93	0,54	48,84	31,5%	27,9%
92	1,48	176,31	1,06	124,99	0,40	49,23	26,7%	27,9%
93	1,71	178,03	1,15	126,15	0,53	49,76	30,9%	28,0%
94	1,87	179,90	1,06	127,21	0,78	50,55	41,8%	28,1%
95	1,74	181,64	1,09	128,30	0,63	51,17	36,0%	28,2%
96	1,90	183,53	0,93	129,22	0,93	52,10	49,2%	28,4%
97	2,55	186,08	1,11	130,33	1,39	53,50	54,6%	28,7%
Total	186,08	186,08	0,13	130,33	53,50	53,5	28,75%	28,75%

Tabla 15: Datos obtenidos y procesados del experimento N°1

N°	Peso kg	Peso en kg acumulado	Mezcla en Kg	Mezcla en Kg acumulado	Arena en Kg	Arena en Kg Acumulado	% Dilución	% Dilución Acumulado
1	1,18	1,18	1,17	1,17	0,01	0,01	1,1%	1,1%
2	1,24	2,42	1,22	2,39	0,02	0,04	1,9%	1,5%
3	1,30	3,72	1,26	3,64	0,04	0,08	3,1%	2,1%
4	1,31	5,03	1,27	4,91	0,04	0,12	2,9%	2,3%
5	1,30	6,33	1,25	6,16	0,05	0,17	3,9%	2,6%
6	1,15	7,48	1,10	7,27	0,04	0,21	3,6%	2,8%
7	1,37	8,85	1,28	8,55	0,09	0,29	6,3%	3,3%

8	1,38	10,23	1,29	9,84	0,09	0,39	6,6%	3,8%
9	1,33	11,55	1,22	11,06	0,11	0,49	8,0%	4,3%
10	1,36	12,92	1,23	12,30	0,13	0,62	9,5%	4,8%
11	1,35	14,27	1,22	13,51	0,13	0,75	9,7%	5,3%
12	1,40	15,67	1,24	14,75	0,16	0,92	11,7%	5,8%
13	1,53	17,21	1,31	16,06	0,22	1,14	14,6%	6,6%
14	1,69	18,89	1,46	17,52	0,23	1,37	13,7%	7,3%
15	1,88	20,77	1,62	19,14	0,26	1,63	13,9%	7,9%
16	1,70	22,47	1,40	20,54	0,30	1,93	17,4%	8,6%
17	1,98	24,46	1,63	22,17	0,35	2,28	17,9%	9,3%
18	1,73	26,18	1,38	23,55	0,35	2,63	20,1%	10,0%
19	1,87	28,05	1,52	25,07	0,34	2,98	18,5%	10,6%
20	2,10	30,15	1,65	26,72	0,45	3,43	21,5%	11,4%
21	1,66	31,81	1,29	28,01	0,38	3,80	22,5%	12,0%
22	1,76	33,57	1,39	29,40	0,37	4,17	21,0%	12,4%
23	1,87	35,44	1,44	30,84	0,43	4,60	22,9%	13,0%
24	1,80	37,23	1,37	32,21	0,42	5,02	23,5%	13,5%
25	1,25	38,48	0,96	33,17	0,29	5,31	23,2%	13,8%
26	1,59	40,07	1,21	34,38	0,37	5,68	23,5%	14,2%
27	1,75	41,81	1,32	35,70	0,43	6,11	24,5%	14,6%
28	1,74	43,56	1,29	37,00	0,45	6,56	25,9%	15,1%
29	1,50	45,06	1,14	38,14	0,36	6,92	23,8%	15,4%
30	1,73	46,79	1,33	39,47	0,40	7,32	22,9%	15,6%
31	1,44	48,22	1,05	40,52	0,39	7,71	27,2%	16,0%
32	1,53	49,75	1,08	41,60	0,44	8,15	29,0%	16,4%
33	1,70	51,45	1,21	42,81	0,49	8,64	28,8%	16,8%
34	1,49	52,94	1,10	43,91	0,39	9,03	26,4%	17,1%
35	1,69	54,64	1,29	45,20	0,41	9,44	24,0%	17,3%
36	1,39	56,03	1,06	46,26	0,33	9,77	23,9%	17,4%
37	1,65	57,68	1,20	47,46	0,45	10,22	27,1%	17,7%
38	1,30	58,98	0,97	48,43	0,33	10,55	25,6%	17,9%
39	1,66	60,64	1,26	49,68	0,41	10,96	24,4%	18,1%
40	1,54	62,18	1,15	50,84	0,39	11,35	25,2%	18,2%
41	1,47	63,65	1,07	51,91	0,39	11,74	26,8%	18,4%
42	1,56	65,21	1,12	53,03	0,44	12,18	28,2%	18,7%
43	1,58	66,79	1,19	54,22	0,40	12,58	25,0%	18,8%
44	1,73	68,52	1,22	55,44	0,51	13,08	29,3%	19,1%
45	1,66	70,18	1,20	56,64	0,46	13,54	27,9%	19,3%
46	1,71	71,89	1,24	57,88	0,47	14,02	27,6%	19,5%
47	2,19	74,08	1,68	59,56	0,50	14,52	22,9%	19,6%
48	1,72	75,80	1,23	60,80	0,49	15,01	28,5%	19,8%
49	1,93	77,74	1,34	62,14	0,59	15,60	30,6%	20,1%
50	1,65	79,39	1,26	63,40	0,39	15,99	23,5%	20,1%

51	1,73	81,12	1,24	64,64	0,48	16,47	28,0%	20,3%
52	1,73	82,85	1,28	65,92	0,45	16,92	26,0%	20,4%
53	1,75	84,60	1,27	67,20	0,48	17,40	27,2%	20,6%
54	1,87	86,47	1,33	68,53	0,54	17,94	29,1%	20,7%
55	1,58	88,05	1,19	69,72	0,39	18,33	24,4%	20,8%
56	1,38	89,43	0,99	70,71	0,39	18,72	28,4%	20,9%
57	1,78	91,21	1,18	71,89	0,60	19,32	33,7%	21,2%
58	1,60	92,82	1,04	72,93	0,56	19,88	35,1%	21,4%
59	1,79	94,61	1,21	74,15	0,58	20,47	32,5%	21,6%
60	1,79	96,40	1,24	75,39	0,55	21,02	30,8%	21,8%
61	1,78	98,18	1,20	76,59	0,58	21,60	32,5%	22,0%
62	2,17	100,35	1,41	78,00	0,75	22,35	34,8%	22,3%
63	1,54	101,88	1,07	79,06	0,47	22,82	30,5%	22,4%
64	1,43	103,31	0,97	80,04	0,46	23,28	31,9%	22,5%
65	1,44	104,75	0,98	81,02	0,46	23,73	31,7%	22,7%
66	1,55	106,31	1,12	82,14	0,44	24,17	28,0%	22,7%
67	1,63	107,93	1,27	83,41	0,36	24,52	22,1%	22,7%
68	1,62	109,55	1,18	84,59	0,44	24,96	26,9%	22,8%
69	1,43	110,98	1,14	85,73	0,30	25,26	20,6%	22,8%
70	1,11	112,09	0,82	86,54	0,29	25,55	26,2%	22,8%
71	1,59	113,68	1,11	87,65	0,48	26,02	30,2%	22,9%
72	1,40	115,07	1,02	88,67	0,38	26,41	27,3%	22,9%
73	1,71	116,78	1,22	89,89	0,49	26,90	28,7%	23,0%
74	1,64	118,42	1,18	91,07	0,45	27,35	27,7%	23,1%
75	1,31	119,73	0,98	92,05	0,33	27,68	25,1%	23,1%
76	1,45	121,18	1,04	93,09	0,41	28,09	28,2%	23,2%
77	1,34	122,52	1,02	94,11	0,32	28,41	24,1%	23,2%
78	1,37	123,89	0,90	95,01	0,47	28,88	34,4%	23,3%
79	1,72	125,61	1,21	96,22	0,51	29,40	29,8%	23,4%
80	1,83	127,44	1,33	97,55	0,50	29,89	27,2%	23,5%
81	1,42	128,86	0,95	98,50	0,46	30,36	32,7%	23,6%
82	1,52	130,38	1,00	99,50	0,53	30,88	34,5%	23,7%
83	1,55	131,94	1,08	100,58	0,48	31,36	30,7%	23,8%
84	1,57	133,51	1,06	101,64	0,51	31,87	32,6%	23,9%
85	1,43	134,94	0,98	102,62	0,45	32,32	31,5%	24,0%
86	1,58	136,52	1,08	103,70	0,50	32,82	31,5%	24,0%
87	1,57	138,09	1,12	104,82	0,45	33,27	28,7%	24,1%
88	1,11	139,20	0,85	105,67	0,26	33,53	23,3%	24,1%
89	1,15	140,35	0,83	106,50	0,32	33,85	27,9%	24,1%
90	1,43	141,78	1,03	107,53	0,40	34,25	28,1%	24,2%
91	1,38	143,15	0,94	108,46	0,44	34,69	31,9%	24,2%
92	1,43	144,58	1,06	109,52	0,37	35,06	25,7%	24,2%
93	1,34	145,92	1,01	110,53	0,33	35,39	25,0%	24,3%

94	1,59	147,51	1,14	111,67	0,45	35,85	28,6%	24,3%
95	1,38	148,89	1,04	112,70	0,35	36,19	25,0%	24,3%
96	1,42	150,32	1,01	113,71	0,41	36,61	29,2%	24,4%
97	1,27	151,59	0,91	114,62	0,36	36,97	28,6%	24,4%
98	1,76	153,35	1,34	115,96	0,42	37,39	23,9%	24,4%
99	1,38	154,73	1,07	117,03	0,31	37,70	22,5%	24,4%
100	1,60	156,32	1,19	118,21	0,41	38,11	25,8%	24,4%
101	1,82	158,15	1,36	119,57	0,46	38,58	25,5%	24,4%
102	1,70	159,84	1,21	120,78	0,48	39,06	28,5%	24,4%
103	1,64	161,48	1,24	122,02	0,40	39,46	24,6%	24,4%
104	1,53	163,01	1,16	123,18	0,37	39,83	23,9%	24,4%
105	1,59	164,60	1,15	124,33	0,44	40,27	27,5%	24,5%
106	1,50	166,10	1,06	125,39	0,44	40,71	29,3%	24,5%
107	1,88	167,98	1,33	126,72	0,55	41,26	29,3%	24,6%
108	1,43	169,41	0,99	127,72	0,44	41,69	30,5%	24,6%
109	1,56	170,97	1,05	128,76	0,51	42,20	32,7%	24,7%
110	1,56	172,53	0,94	129,70	0,62	42,83	39,9%	24,8%
111	1,90	174,43	0,98	130,68	0,92	43,75	48,5%	25,1%
112	2,04	176,46	0,94	131,62	1,10	44,84	53,9%	25,4%
113	3,02	179,49	0,86	132,47	2,17	47,01	71,7%	26,2%
Total Kg	0,18	179,49	0,13	132,47	0,05	47,0	26,19%	26,19%

Tabla 16: Datos obtenidos y procesados del experimento N°2