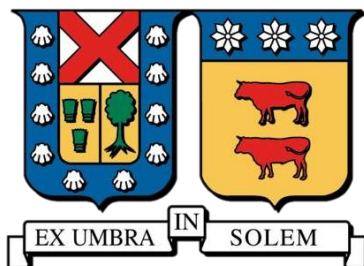


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y MATERIALES
SANTIAGO-CHILE



ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA Y FACTORES DE ESCALAMIENTO EN FLOTACIÓN DE LABORATORIO

Presentado por

MARTÍN EDUARDO RIVERA KRSTULOVIC

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

Profesor guía

ING. CARLOS HUNT RECABAREN

Miembro de la Comisión

ING. JORGE IPINZA ABARCA

SANTIAGO, ENERO 2024

Resumen

El escalamiento de resultados de flotación de laboratorio hasta procesos de flotación industriales es clave a la hora de predecir el comportamiento que tendrán las plantas de flotación de gran escala ante cambios en, por ejemplo, la mineralogía de alimentación y acondicionamiento del mineral. Bajo este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal estudiar las distintas plantas de flotación primaria activas en División Chuquicamata y verificar si es que los factores de escalamiento utilizados actualmente son óptimos a la hora de comparar los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio con los resultados reales obtenidos en planta.

Para esto, se construyó una base de datos a partir de datos disponibles provenientes de: ensayos de laboratorio, sensores activos en las celdas y datos CADEMI. Con esta base de datos consolidada y filtrada en base a criterios operacionales usados en la planta, se estimó el tiempo de residencia de cada una de las plantas, observándose medianas de 31.2, 35.8 y 20.9 minutos para las plantas A0, A1 y A2, respectivamente. Luego, a partir de los tiempos de residencia calculados y las curvas de cinética de flotación obtenidas desde los datos de laboratorio, se determina que los factores de escalamiento más efectivos a la hora de escalar los resultados de laboratorio a planta son 5.1, 5.6 y 3.2 para las plantas A0, A1 y A2, respectivamente.

Finalmente, con el objetivo de ver cómo es que la mineralogía presente en la pulpa afecta a los distintos factores de escalamiento, se clasifican las pulpas observadas en clusters mediante algoritmo K-means, donde se observó que la relación entre mineralogía y factor de escalamiento se conserva entre las plantas que son alimentadas con el mismo mineral (A0 y A1). Sin embargo, esta relación no se observa en la planta A2. Se concluye que la mineralogía con que se está alimentando a la planta no es suficiente para clasificar los distintos tipos de pulpa, por lo que el análisis debe complementarse con, por ejemplo, curvas de granulometría de la pulpa.

Abstract

The scaling up of laboratory flotation results to industrial flotation processes is key to predict the performance of large-scale flotation plants in the face of changes in, for example, feed mineralogy and ore conditioning. Under this context, the present study has as main objective to study the different primary flotation plants active in Codelco División Chuquicamata and to verify if the scaling factors currently used are optimal when comparing the results obtained in laboratory tests with the real results obtained in plant.

For this purpose, a database was constructed from available data from laboratory tests, active sensors in the cells and CADEMI data. With this database consolidated and filtered based on operational criteria used in the plant, the residence time of each of the plants was estimated, observing medians of 31.2, 35.8 and 20.9 minutes for plants A0, A1 and A2, respectively. Then, from the calculated residence times and the flotation kinetics curves obtained from the laboratory data, it is determined that the most effective scaling factors when scaling the results from laboratory to plant are 5.1, 5.6 and 3.2 for plants A0, A1 and A2, respectively.

Finally, in order to see how the mineralogy present in the slurry affects the different scaling factors, the observed slurries are classified into clusters by K-means algorithm, where it was observed that the relationship between mineralogy and scaling-up factor is conserved between plants that are fed with the same mineral (A0 and A1). However, this relationship is not observed in plant A2. It is concluded that the mineralogy with which the plant is being fed is not sufficient to classify the different types of slurry, so the analysis must be complemented with, for example, pulp granulometry curves.

Índice

1.	Introducción	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo general	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.1.3	Alcances	2
2.	Marco teórico	3
2.1	Flotación	3
2.1.1	Reactivos de flotación.....	4
2.1.2	Celdas de flotación	5
2.1.3	Circuitos de flotación	6
2.1.4	Porcentaje de solidos.....	7
2.1.5	Granulometría	8
2.1.6	pH.....	9
2.1.7	Tiempo de residencia	9
2.1.8	Flujo de aire	9
2.1.9	Hold-up de aire.....	10
2.1.10	Velocidad de espuma.....	10
2.1.11	Nivel de espuma.....	10
2.2	Escalamiento del proceso de flotación	10
2.2.1	Modelo cinético de primer orden	12
2.2.2	Modelo cinético de Klimpel	13
2.2.3	Factor de escalamiento.....	14
2.3	Análisis multivariable	15
2.3.1	Análisis de componentes principales.....	15
2.3.2	Selección del número de componentes principales	17
2.3.3	Clustering mediante algoritmo k-Means	18
2.3.4	Selección del número de clústers	19
2.4	Antecedentes Planta de flotación de Chuquicamata.....	20
3.	Metodología	23
3.1	Construcción de base de datos	23
3.2	Estudio exploratorio de datos.....	23
3.3	Estimación del tiempo de residencia	23
3.4	Cinética de flotación de laboratorio.....	24

3.5	Estimación de factores de escalamiento.....	24
3.5.1	Factor de escalamiento “Actual”.....	24
3.5.2	Factor de escalamiento “Teórico”.....	24
3.6	Efectos de la mineralogía sobre el factor de escalamiento	25
3.6.1	Análisis de componentes principales.....	25
3.6.2	Clustering.....	25
3.6.3	Estimación de factor de escalamiento por grupo de mineral	25
4.	Resultados.....	26
4.1	Construcción de base de datos	26
4.1.1	Base de datos de planta.....	26
4.1.2	Base de datos de laboratorio.....	27
4.1.3	Base de datos final.....	27
4.2	Estudio exploratorio de datos.....	28
4.2.1	Condiciones operacionales de planta	28
4.2.2	Características del mineral.....	36
4.2.3	Resultados de laboratorio	37
4.3	Estimación del tiempo de residencia.....	39
4.3.1	Operatividad de plantas.....	39
4.3.2	Tiempo de residencia	39
4.4	Cinética de flotación de laboratorio.....	41
4.4.1	Recuperación máxima.....	41
4.4.2	Constante cinética de flotación.....	41
4.5	Factor de escalamiento cinético.....	42
4.5.1	Factor de escalamiento actual	42
4.5.2	Factor de escalamiento teórico	43
4.5.3	Propuesta de factor de escalamiento.....	44
4.6	Efectos de la mineralogía sobre el factor de escalamiento	45
4.6.1	Análisis de componentes principales.....	45
4.6.2	Clustering.....	49
4.6.3	Clústers – Tolva Convencional.....	51
4.6.4	Clústers – Tolva SAG.....	52
4.6.5	Factor de escalamiento según grupo mineralógico	54
5.	Conclusiones.....	56
6.	Referencias	57

Índice de figuras

Figura 1. Tensiones interfaciales presentes en el proceso de flotación.....	3
Figura 2. Adhesión de colector a la superficie del mineral (Yianatos, 2005)	4
Figura 3. Adhesión espumante a la superficie de la burbuja de aire (Yianatos, 2005)	5
Figura 4. Esquema del proceso de flotación (Wills, 2006).....	6
Figura 5. Esquema básico de un circuito de flotación, con flotación Rougher, Scavenger y Cleaner (Wills, 2006).....	7
Figura 6. Efectos del tamaño de partícula sobre la recuperación (Bahrami, 2019)	8
Figura 7. Costos asociados a distintas celdas de flotación (Aleksi Peltola, 2008)	11
Figura 8. Ejemplo de una distribución rectangular para una constante cinética de flotación.....	13
Figura 9. Ejemplo de gráfico de sedimentación.....	18
Figura 10. Ejemplo de agrupamiento por K-means	19
Figura 11. Ejemplo de selección de número de clústers	20
Figura 12. Esquema de planta de molinos y flotación primaria de Chuquicamata	22
Figura 13. Esquema de la metodología utilizada	23
Figura 14. Ejemplo de determinación de factor de escalamiento	25
Figura 15. Flujo de aire, planta A0.....	28
Figura 16. Flujo de aire, planta A1.....	29
Figura 17. Flujo de aire, planta A2.....	29
Figura 18. Nivel de espuma, planta A0.....	30
Figura 19. Nivel de espuma, planta A1.....	31
Figura 20. Nivel de espuma, planta A2.....	31
Figura 21. Velocidad de espuma, planta A0.....	32
Figura 22. Velocidad de espuma, planta A1.....	33
Figura 23. Velocidad de espuma, planta A2.....	33
Figura 24. Porcentaje de sólidos en planta.....	34
Figura 25. Porcentaje de mineral retenido en la malla #65	34
Figura 26. Tasa de alimentación de pulpa a planta, medido en toneladas por hora	35
Figura 27. Recuperación de cobre en planta.....	35
Figura 28. Origen del mineral que alimenta a las distintas plantas de flotación.....	36
Figura 29. Mineralogías en Base Sulfuro, Chuquicamata Rajo, Chuquicamata subterránea y Radomiro Tomic	37
Figura 30. Recuperación de Cu acumulada en flotación de laboratorio, planta A0	38

Figura 31. Recuperación de Cu acumulada en flotación de laboratorio, planta A1	38
Figura 32. Recuperación de Cu acumulada en flotación de laboratorio, planta A2	38
Figura 33. Número total de celdas operativas por planta	39
Figura 34. Tiempo de residencia en plantas de flotación Rougher.....	40
Figura 35. Constante de recuperación máxima obtenida en los ensayos de laboratorio	41
Figura 36. Constante cinética para flotación de laboratorio	42
Figura 37. Factor de escalamiento "Actual"	43
Figura 38. Factor de escalamiento "Teórico"	43
Figura 39. Varianza por componente principal. Tolva convencional	46
Figura 40. Varianza acumulada por componente principal. Tolva SAG.....	47
Figura 41. Resultados del PCA, Tolva Convencional. (a): Componentes 1 y 2, (b): Componentes 1 y 3, (c): Componentes 2 y 3	48
Figura 42. Resultados del PCA, Tolva SAG. (a): Componentes 1 y 2, (b): Componentes 1 y 3, (c): Componentes 2 y 3.....	49
Figura 43. Gráfico de codo. Tolva convencional.....	50
Figura 44. Gráfico de codo. Tolva SAG	51
Figura 45. Resultados de clustering. Tolva Convencional. (a): Vista componentes 1 y 2, (b): Vista componentes 1 y 3, (c): Vista componentes 2 y 3	51
Figura 46. Resultados de clustering. Tolva SAG. (a): Vista componentes 1 y 2, (b): Vista componentes 1 y 3, (c): Vista componentes 2 y 3	53
Figura 47. Factor de escalamiento teórico según grupo Kmeans	54

Índice de tablas

Tabla 1. Modelos cinéticos de flotación, con constante cinética única	13
Tabla 2. Modelos de cinética de flotación, con distribución rectangular de constante cinética	14
Tabla 3. Tiempos de residencia típicos para flotación de distintos materiales en planta y laboratorio (Nelson, 2002).	15
Tabla 4. Características de las celdas de flotación y variables fijas usadas para determinar el volumen efectivo de las celdas.....	40
Tabla 5. Raíz del error cuadrático medio calculado entre recuperaciones de planta y laboratorio .	44
Tabla 6. Factores de escalamiento propuestos junto a su RECM	45
Tabla 7. Componentes principales junto a sus respectivas varianzas explicadas y acumuladas. Datos de la Tolva Convencional	46
Tabla 8. Componentes principales junto a sus respectivas varianzas explicadas y acumuladas. Datos de la Tolva SAG	47
Tabla 9. Estadísticas básicas, Clúster 0, Tolva convencional.....	52
Tabla 10. Estadísticas básicas, Clúster 1, Tolva convencional.....	52
Tabla 11. Estadísticas básicas, Clúster 2, Tolva convencional.....	52
Tabla 12. Estadísticas básicas, Clúster 0, Tolva SAG	53
Tabla 13. Estadísticas básicas, Clúster 1, Tolva SAG	53
Tabla 14. Estadísticas básicas, Clúster 2, Tolva SAG	54

1. Introducción

El dimensionamiento de equipos y circuitos de flotación históricamente se ha basado en resultados de estudios a escala piloto. Recientemente, debido al incremento de costos y la dificultad de recuperar mineral, es que estos resultados de pilotaje deben ser complementados con información más sofisticada, con el fin de crear modelos a escala industrial. Con estos modelos es posible predecir con un alto grado de confianza el desempeño que tendrá un circuito de flotación, permitiendo así evaluar distintos tipos de criterios y ajustar parámetros con el fin de mantener recuperaciones, ley, costos, y tiempos dentro de los estándares requeridos a lo largo de la vida útil del proyecto.

En Codelco División Chuquicamata se ha reconocido la importancia de avanzar la optimización de los procesos de flotación para mantener la competitividad y eficiencia en la extracción de minerales.

Actualmente, en las tres plantas de flotación primaria de División Chuquicamata, se utiliza como método de escalamiento el comparar los resultados de recuperación de cobre obtenidos en planta con los obtenidos en ensayos de laboratorio al minuto 7.5 de flotación. Esta metodología resulta ser poco precisa y no ofrece flexibilidad ante cambios del tiempo de residencia del mineral en planta, por lo que se propone buscar una nueva forma de escalar los resultados obtenidos en laboratorio a planta.

Esta memoria de título estudia los distintos circuitos de flotación primaria en Codelco División Chuquicamata, y busca, mediante el análisis de datos de laboratorio, verificar que el factor de escalamiento de laboratorio a planta utilizado actualmente sea el más adecuado. Lo anterior, además de cuantificar, intenta proponer un nuevo factor de escalamiento tomando en cuenta los tiempos de residencia de la pulpa en la celda, entre otros factores. Igualmente, se evaluará el impacto que tiene la mineralogía de la pulpa sobre el factor de escalamiento.

La motivación final de este estudio es proponer mejoras a la metodología de escalamiento que está siendo utilizada actualmente en Codelco División Chuquicamata y, de esta forma, poder predecir de manera más exacta el comportamiento de la planta en respuesta a, por ejemplo, cambios de mineralogía o acondicionamiento del mineral.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Redefinir el factor de escalamiento utilizado en las distintas plantas de flotación primaria de Codelco División Chuquicamata.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar las mejores condiciones operacionales para considerar los datos de planta a utilizar.
- Cuantificar el tiempo de residencia para cada uno de los tres circuitos de flotación primaria.
- Proponer un nuevo factor de escalamiento considerando los tiempos de residencia de la pulpa dentro de la celda.
- Evaluar si es que el Factor de escalamiento está condicionado al tipo de mineral con que se está alimentando en la planta de flotación.

1.1.3 Alcances

- El estudio se realizó con datos entregados por División Chuquicamata provenientes de las tres plantas de Flotación Rougher de la división, además de datos de ensayos diarios de flotación realizados en laboratorio.
- Los datos utilizados corresponden a muestras del periodo 2021.
- El estudio realizado es solo de carácter conceptual y no considera la verificación práctica de las recomendaciones realizadas.

2. Marco teórico

2.1 Flotación

Durante el último siglo se ha considerado a la flotación de minerales como uno de los procesos metalúrgicos de separación de más importancia de la industria, esto ya que, dada su versatilidad, ha permitido el procesamiento de minerales complejos y de baja ley, que de lo contrario serían considerados no rentables (Wills, 2006).

La flotación es un proceso fisicoquímico utilizado para separar selectivamente partículas de mineral valioso de la ganga. Este proceso aprovecha las diferencias en las propiedades electroquímicas de las superficies del mineral, es decir, entre las superficies hidrofóbicas e hidrofílicas que se producen naturalmente o son inducidas artificialmente por reactivos químicos. Estas características permiten que las partículas hidrófobas se adhieran a burbujas de aire ingresadas al sistema y floten hasta la superficie, mientras que las partículas hidrofílicas no se adhieren y, por ende, caen al fondo del sistema (Diego Mesa, 2019).

Naturalmente, la gran mayoría de minerales son hidrofílicos. La hidrofobicidad del mineral puede ser aumentada incrementando el ángulo de contacto que se crea a partir de las tres tensiones interfasiales características del proceso. Estas tensiones interfasiales son solido-liquido (γ_{sl}), solido-gas (γ_{sa}) y liquido-gas (γ_{la}) (Saeed, 2021).

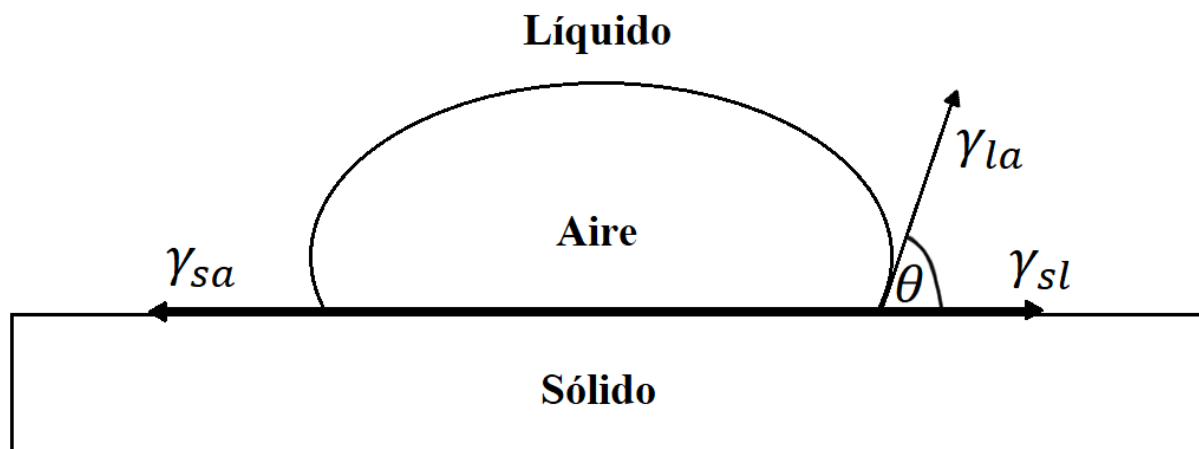


Figura 1. Tensiones interfasiales presentes en el proceso de flotación

En estado de equilibrio, estas tres tensiones interfasiales pueden ser descritas según la ecuación (1), denominada ecuación de Young:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sa} - \gamma_{sl}}{\gamma_{la}} \quad (1)$$

Con θ como el ángulo de contacto.

2.1.1 Reactivos de flotación

Existen distintos tipos de reactivos que pueden ser agregados al proceso de flotación con el fin de cambiar el ángulo de contacto y modificar las propiedades superficiales de los minerales y burbujas. Estos reactivos son claves para el éxito del proceso de flotación, por lo que es importante una adecuada elección del tipo y cantidad de reactivo a utilizar. Los reactivos de flotación pueden ser clasificados en tres clases de reactivos: colectores, espumantes y modificadores.

Colectores

Los colectores corresponden a un tipo de compuesto orgánico que, al entrar en contacto con el mineral, induce la hidrofobicidad en la superficie de este.

Los colectores poseen una parte polar y otra apolar. La parte polar del colector se adsorbe en la superficie del mineral, mientras que la parte apolar, queda orientada hacia la fase acuosa, produciendo que el mineral repela al agua (Yianatos, 2005).

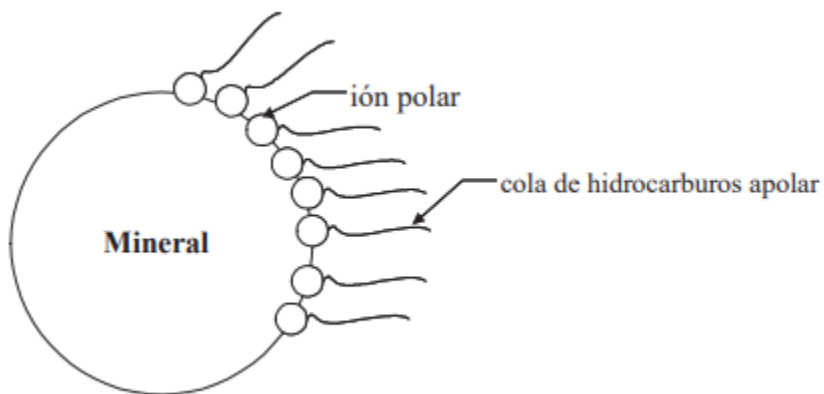


Figura 2. Adhesión de colector a la superficie del mineral (Yianatos, 2005)

Espumantes

La función principal de un espumante es entregar estabilidad a la espuma. Dado que la flotación es un proceso que se basa en la adhesión de mineral a burbujas de aire, surge la necesidad de crear una espuma estable, conformada por burbujas que puedan evitar la coalescencia que ocurre de manera espontánea dentro de las celdas de flotación (Yianatos, 2005)

Al igual que los colectores, los espumantes están formados de una parte polar, la cual se disuelve en el agua, y otra parte apolar, que es adsorbida por las burbujas de aire.

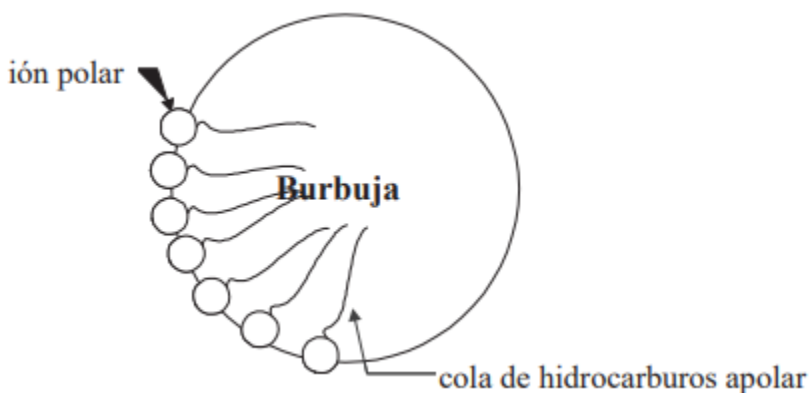


Figura 3. Adhesión espumante a la superficie de la burbuja de aire (Yianatos, 2005)

Modificadores

Los modificadores son reactivos químicos utilizados para controlar la química del proceso de flotación. Estos modificadores pueden dividirse en tres categorías:

Activadores: Sustancias que facilitan la adhesión de los colectores a la superficie del mineral

Depresores: Reactivos que disminuyen la adsorción del colector en minerales que no son de interés en el proceso.

Reguladores de PH: Reactivos utilizados para regular el pH de la solución. En general los colectores utilizados en flotación son estables a pH alcalinos. Esta condición además ayuda a evitar la corrosión de las celdas producto de la acidez de la solución.

2.1.2 Celdas de flotación

Para que el proceso de flotación ocurra, la pulpa proveniente del proceso de molienda es ingresada a tanques llamados celdas de flotación, acá la pulpa acondicionada con reactivos de flotación, que facilitan la flotación de partículas de interés y mejoran la estabilidad de la espuma y aire. Desde el

fondo de la celda se inyecta aire para generar las burbujas. Dado que los minerales de cobre poseen la característica de ser hidrofóbicos, estas partículas se adhieren a las burbujas, llegando hasta la superficie en forma de una espuma rica en mineral valioso, mientras que la mayor parte de la ganga se hunde hasta el fondo de los tanques.

Como producto de estas interacciones se obtiene un concentrado, el cual debe someterse a distintos procesos de refinamiento con el fin de hacerlo comercializable. Por otro lado, la ganga acumulada en fondo de la celda abandona el sistema por una corriente de relave.

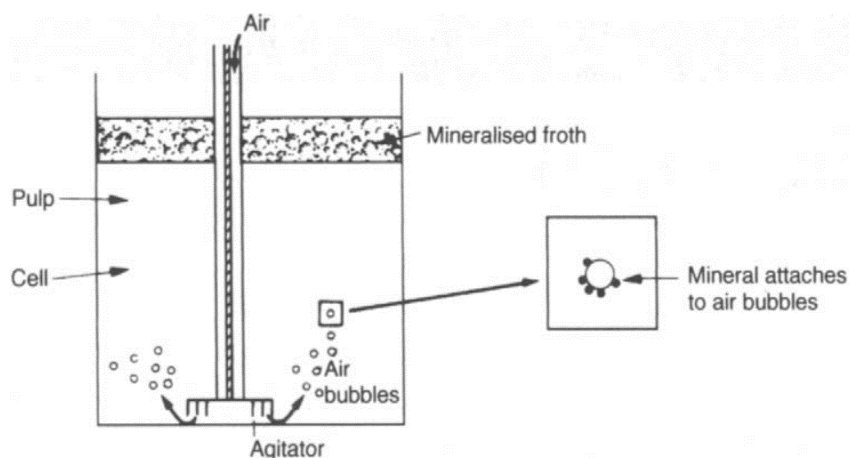


Figura 4. Esquema del proceso de flotación (Wills, 2006)

En una celda de flotación se pueden diferenciar dos zonas de características distintas, la zona de colección y zona de limpieza. En la zona de colección ocurre el primer contacto entre las partículas minerales descendentes y las burbujas de aire ascendentes, formándose el agregado partícula-burbuja como causa de los eventos de colisión y adhesión. Por otra parte, la zona de limpieza corresponde al tramo que recorren las burbujas con mineral adherido dentro del lecho de espuma hasta el rebalse de concentrado (Yianatos, 2005).

2.1.3 Circuitos de flotación

En el proceso de flotación se distinguen tres tipos de circuitos, cada uno con un objetivo distinto:

Primaria o Rougher: Esta etapa corresponde a la primera de un circuito de flotación, aquí el mineral es concentrado de una manera poco selectiva, resultando en un concentrado con alta recuperación, pero baja ley de mineral de interés. Este concentrado es comúnmente enviado a un proceso de limpieza en flotación Cleaner.

Limpieza o Cleaner: Esta etapa tiene como misión aumentar la ley del concentrado que proviene desde la flotación primaria y separar la mayor cantidad posible de impurezas. Dado que es un proceso mucho más selectivo, es importante que el concentrado proveniente de las celdas Rougher y Scavenger se someta a una remolienda con el fin de que el mineral este en su mayor grado de liberación. Los relaves de este proceso corresponden a un producto intermedio y son reciclados dentro del mismo circuito de flotación

Barrido o Scavenger: Esta etapa recibe el relave de las etapas Rougher y Cleaner, y su función es flotar los minerales de interés que no lo hicieron originalmente, ya sea por falta de tiempo, adición de reactivos o algún efecto mecánico. El concentrado de estas celdas aun contiene muchas impurezas, por lo que es reingresado al circuito con el fin de recuperar el mineral valioso.

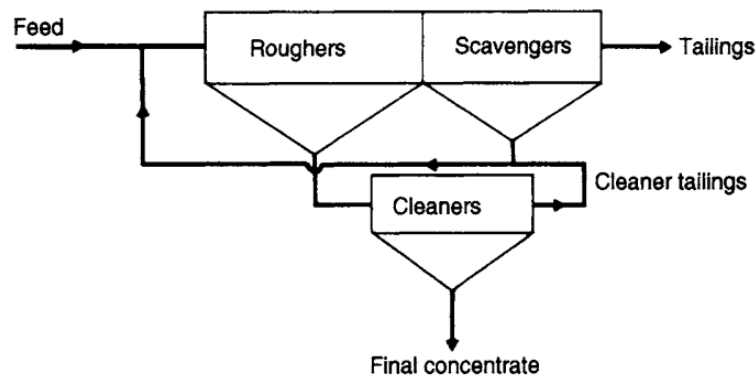


Figura 5. Esquema básico de un circuito de flotación, con flotación Rougher, Scavenger y Cleaner (Wills, 2006)

Dentro del proceso de flotación se reconocen distintos parámetros, los que son de suma importancia para el proceso.

2.1.4 Porcentaje de solidos

El porcentaje de solidos de una pulpa corresponde a la proporción de solidos respecto del agua que hay en la pulpa. Por lo general se asume que la densidad de la pulpa no tiene incidencia sobre la cinética de flotación, por lo que modificar esta variable solo afecta a la recuperación por su incidencia en el tiempo de residencia. Una baja densidad de pulpa implica un mayor volumen de pulpa para tratar la misma cantidad de material sólido, resultando en un mayor flujo volumétrico de pulpa y, por ende, una reducción en el tiempo de residencia de la pulpa en la celda y menor recuperación de mineral.

$$\%Solidos = 100 * \frac{m_{solidos}}{m_{total}} \quad (2)$$

Si bien el porcentaje de solidos corresponde a una variable del proceso de flotación que es fácilmente controlable, por lo general se mantiene como un valor constante dado a la falta de conocimiento certero acerca de cómo esta variable afecta a la cinética de flotación.

2.1.5 Granulometría

Dado que el mecanismo principal del proceso de flotación se basa en el aprovechamiento de las propiedades superficiales del mineral, es importante considerar la variable tamaño de partícula o granulometría a la hora de realizar flotación, ya que estas propiedades superficiales dependen en gran parte del grado de liberación que posee el mineral de interés.

Cuando el mineral presente en la pulpa tiene un tamaño de partícula muy grande, se tiene que las partículas de cobre no están lo suficientemente liberadas o expuestas del resto de mineral hidrofílico, impidiendo su adhesión a las burbujas de aire, también ocurre la ruptura del complejo burbuja-partícula debido a la turbulencia de la celda. Por otro lado, cuando la granulometría del mineral es muy baja, se corre el riesgo de generar “lamas”, un lodo formado por minerales no hidrofóbicos que envuelve a la partícula de cobre, impidiéndole ser flotada (Bahrami, 2019).

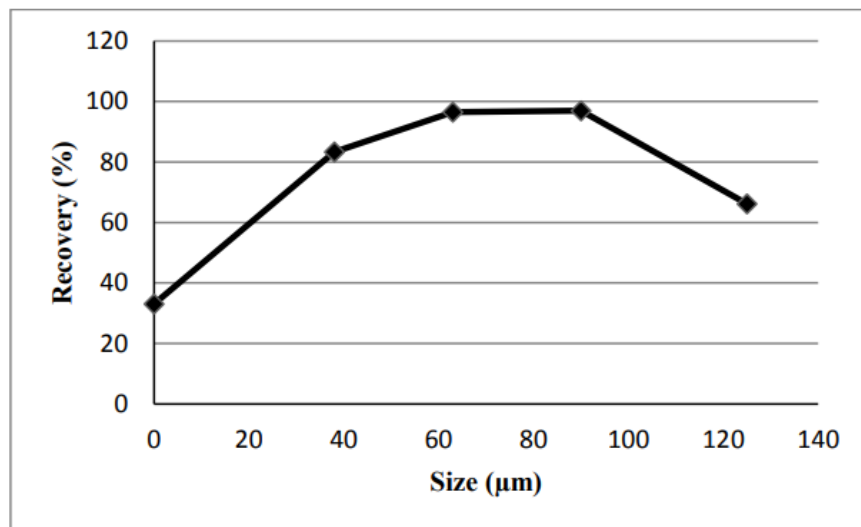


Figura 6. Efectos del tamaño de partícula sobre la recuperación (Bahrami, 2019)

En función de lo anterior, es correcto decir que, para cada circuito de flotación particular, existe una distribución de tamaños de partícula optima en donde la recuperación de metal por las burbujas es máxima.

2.1.6 pH

El control del pH es uno de los métodos más utilizados para la afinación de la flotación de mineral, ya que puede tener un efecto significativo sobre la eficiencia y rendimiento del proceso de flotación.

En general, el pH de una pulpa debe mantenerse dentro de un rango específico para que el proceso de flotación funcione eficazmente. El rango óptimo de pH depende en gran medida del tipo de mineral que se esté procesando y de los reactivos de flotación que se utilicen.

2.1.7 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia en la flotación juega un rol importante a la hora de determinar tanto la ley como la recuperación del mineral flotado (Yianatos, 2005). Este se define como el tiempo que tarda una partícula en salir de una celda o circuito de flotación y se puede calcular como:

$$\tau = \frac{V_{ef}}{Q} = \frac{(A_c * h_c - A_c * h_e) * (1 - \varepsilon_g)}{Q} \quad (3)$$

Siendo τ el tiempo de residencia, V_{ef} el volumen efectivo de la celda, A_c el área de la celda, h_c la altura de la celda, ε_g el hold-up de gas, h_e la altura de espuma y Q el flujo volumétrico de pulpa que pasa por la celda.

El tiempo de residencia dependerá, principalmente, de la cantidad de mineral diario que se quiera procesar y del porcentaje de sólidos que posea la pulpa, de esta manera, a mayor tonelaje de pulpa diario, menor será el tiempo de residencia del mineral (Urra, 2016).

2.1.8 Flujo de aire

El flujo de aire es una de las variables más importantes en el control de la flotación, esto dado a su efecto en distintos parámetros de la flotación, como lo son la dispersión de gas, distribución de tamaños de burbuja y hold-up de aire. Generalmente, se dice que un aumento del flujo de aire mejora la recuperación del mineral, esto dado al incremento del área superficial de burbujas, proporcionando una mayor probabilidad de generar colisiones entre partículas y burbuja (Yianatos, 2005), lo anterior predomina en la zona de espuma de la celda. Un aumento del flujo de aire también trae consigo un menor tiempo de residencia en la zona de espuma, causando menos coalescencia de burbujas, la cual afecta al desprendimiento de partículas de la burbuja, aumentando así la recuperación (Ata, 2012). Sin embargo, el aumento de flujo de aire tiene una limitante, y es

que después de cierto punto se genera un desequilibrio en la hidrodinámica de la flotación, reduciéndose así la eficiencia del proceso (Yianatos, 2005).

2.1.9 Hold-up de aire

En flotación, el hold-up de aire corresponde al contenido volumétrico de aire dentro de la pulpa. Constituye un parámetro que depende del valor del flujo de aire, tamaño de burbujas, densidad de la pulpa, carga de sólidos en las burbujas y la velocidad de descenso de la pulpa (Yianatos, 2005). Con este factor es posible determinar el contenido de aire dentro de la pulpa, lo que permite calcular el volumen efectivo de la celda de flotación y, en consecuencia, estimar de manera más precisa el tiempo de residencia.

2.1.10 Velocidad de espuma

La velocidad de espuma, también conocida como velocidad de rebose, corresponde a la velocidad con que viajan las burbujas en la superficie de la celda hasta el borde de esta. Este parámetro es de suma importancia en el control metalúrgico del proceso de flotación, ya que tiene efectos significativos sobre el tiempo de residencia de las partículas minerales adheridas a las burbujas y, además, está estrechamente relacionada con la tasa de recuperación de concentrado (LIU, 2013)

2.1.11 Nivel de espuma

La altura de espuma es otra de las variables importantes del proceso de flotación, esto ya que afecta el transporte de las burbujas cargadas de mineral hacia el flujo de concentrado (Matamoros, 2018). La altura de espuma afecta directamente a la selectividad del proceso. Al disminuir la altura de espuma, disminuye el tiempo de residencia en la zona de espuma, lo que aumenta la recuperación general, pero disminuye la selectividad. Al contrario, si lo que se busca es aumentar la ley del concentrado, se debe trabajar con alturas de lecho mayores (Yianatos, 2005)

2.2 Escalamiento del proceso de flotación

Con el avance de los años, las celdas de flotación han aumentado su tamaño para satisfacer las crecientes necesidades de procesamiento de mineral de la industria. La industria del procesamiento de minerales está enfocada en incrementar tanto el número de celdas de flotación como sus dimensiones. Este aumento de dimensiones trae consigo el beneficio de aumentar la eficiencia de consumo energético y de reactivos, además de reducir en menor medida el capital de inversión y los costos de operación (Aleksi Peltola, 2008). Sin embargo, este incremento en el tamaño de las

celdas ha traído consigo nuevos desafíos en cuanto a rendimiento, diseño y operación en términos de hidrodinámica de pulpa y transporte de pulpa (Erico Tabosa, 2016).

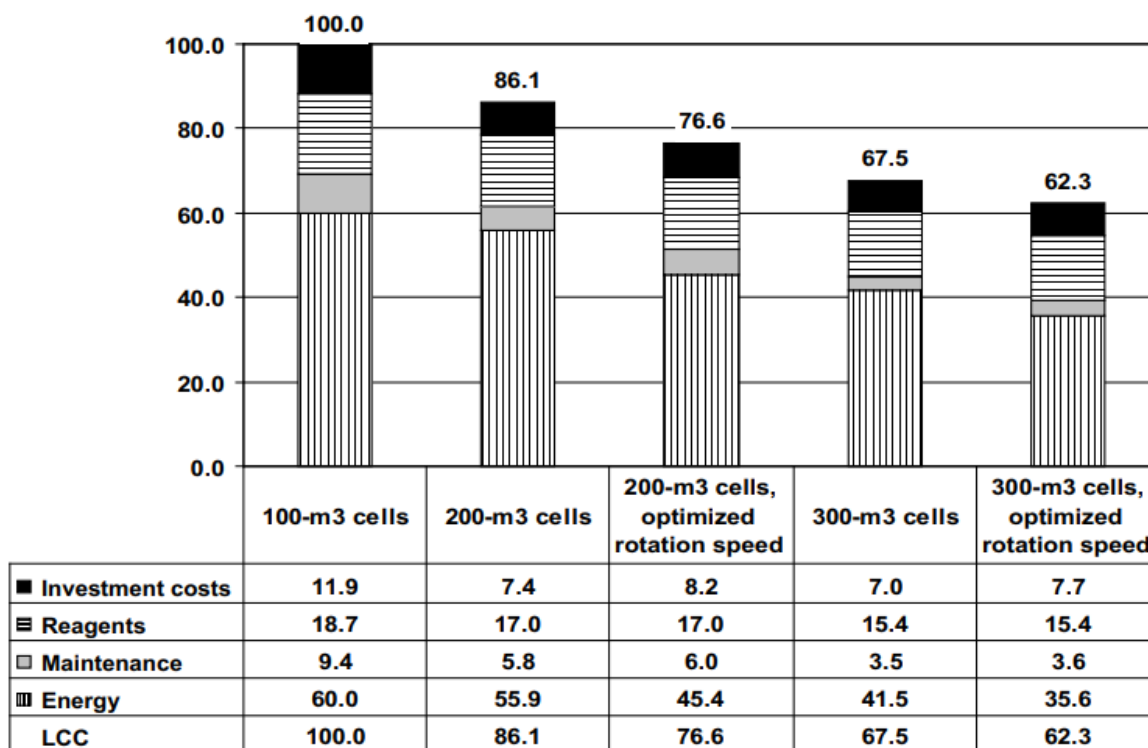


Figura 7. Costos asociados a distintas celdas de flotación (Aleksi Peltola, 2008)

Lo anterior, junto a la complejidad intrínseca del proceso de flotación, provoca que la construcción de modelos matemáticos que expliquen el fenómeno de flotación resulte difícil de llevar a cabo (Xie, 2016).

Actualmente, los estudios de escalamiento de flotación se dividen en 3 categorías:

- Escalamiento basado en modelos teóricos
- Escalamiento basado en modelos probabilísticos
- Escalamiento basado en modelos cinéticos

De estos tres, el más utilizado corresponde al escalamiento por modelos de cinética de flotación. Diversos autores coinciden en que los modelos cinéticos gobiernan al proceso de flotación, en donde el desempeño general de este depende principalmente de factores cinéticos (tiempo).

2.2.1 Modelo cinético de primer orden

El primer modelo cinético fue propuesto el año 1935 por García-Zúñiga y se basa en el supuesto de que las colisiones partícula-burbuja se asemejan a las colisiones entre moléculas en una reacción química. Manteniendo un flujo de aire constante y asumiendo que la variación de concentración de mineral es proporcional a la concentración del mineral en la zona de colección, García-Zúñiga utilizó la ecuación de cinética de reacción química y obtuvo lo siguiente:

$$\frac{dC(t)}{dt} = -kC \quad (4)$$

En donde $C(t)$ corresponde a la concentración de partículas flotables en un tiempo t y k es la constante cinética de flotación.

Resolviendo la Ecuación (4) y considerando la condición de borde $C = C_0$ en $t = t_0$, se obtiene que:

$$C = C_0 * e^{-kt} \quad (5)$$

Luego, expresando la recuperación de mineral como:

$$R = \frac{C_0 - C(t)}{C_0} \quad (6)$$

Es posible reescribir la recuperación reemplazando la Ecuación (5) en la Ecuación (6), obteniendo el modelo de recuperación ideal para una operación batch:

$$R = 1 - e^{-kt} \quad (7)$$

Si bien este tipo de modelo es usado comúnmente para describir procesos de flotación de primer orden, se debe considerar que el proceso de flotación nunca es perfecto, esto dada la imposibilidad de flotar todo el mineral y las limitaciones que tienen los equipos. Por esto, se debe definir una Recuperación máxima $R_{infinito}$ que no puede ser superada. Lo anterior aplicado a la Ecuación (7) queda expresado como:

$$R = R_{infinito} * (1 - e^{-kt}) \quad (8)$$

Con $R_{infinito}$ como la recuperación máxima logable en un proceso de flotación real.

2.2.2 Modelo cinético de Klimpel

Los modelos de cinética de flotación de primer orden asumen una constante cinética k constante. En la práctica, dicha constante se representa como una distribución que depende de diversos factores operacionales, como lo son el tamaño de partícula, flujo de aire, entre otros. Esto es algo que el modelo de Klimpel toma en consideración, suponiendo una distribución rectangular de la constante cinética:

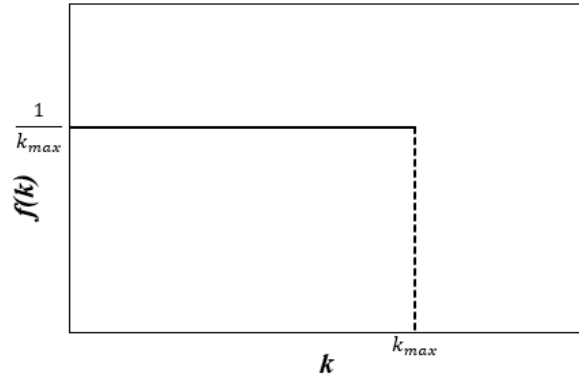


Figura 8. Ejemplo de una distribución rectangular para una constante cinética de flotación

$$f(k) \begin{cases} \frac{1}{k_{max}} & \text{si } 0 < k < k_{max} \\ 0 & \text{si } k > k_{max} \end{cases} \quad (9)$$

Con k_{MAX} como constante cinética máxima de una distribución rectangular.

De esta forma, el modelo planteado por Klimpel queda como:

$$R = R_{infinito} \left(1 - \frac{1}{k_{max}t} (1 - e^{-k_{max}t}) \right) \quad (10)$$

Esta ecuación solo es capaz de modelar el proceso de flotación de un circuito tipo Batch. A continuación, se presentan modelos de cinética de flotación aplicables a otros tipos de circuitos de flotación:

Tabla 1. Modelos cinéticos de flotación, con constante cinética única

Selección de modelos con constante cinética única	
Modelo Celda Batch	$R = R_{\infty} \cdot (1 - e^{-kt})$
Modelo Celda Perfectamente Mezclada	$R = R_{\infty} \cdot \left(\frac{kt}{1+kt} \right)$

$$R = R_{\infty} \cdot \left(1 - \frac{1}{(1+kt)^n}\right)$$

Tabla 2. Modelos de cinética de flotación, con distribución rectangular de constante cinética

Selección de modelos con distribución rectangular de constante cinética

Modelo Celda Batch	$R = R_{\infty} \cdot \left(1 - \frac{1}{k_{max}t} (1 - e^{-k_{max}t})\right)$
Modelo Celda Perfectamente Mezclada	$R = R_{\infty} \cdot \left(1 - \left(\frac{\ln(1+k_{max}t)}{k_{max}t}\right)\right)$
Modelo Banco de n Celdas	$R = R_{\infty} \cdot \left(1 - \left(\frac{1-(1+k_{max}t)^{1-n}}{k_{max}t(n-1)}\right)\right)$

Es importante considerar que la constante de flotación obtenida en ensayos de laboratorio no conserva su relación a una escala industrial. Lo anterior ocurre dadas las diferencias que existen entre las condiciones hidrodinámicas y operativas intrínsecas a cada tipo de flotación (Diego Mesa, 2019). Es por esto que el escalamiento de resultados de flotación de laboratorio a planta resulta ser un proceso complejo que, en general, se basa en supuestos e intenta predecir la relación entre ambas escalas.

2.2.3 Factor de escalamiento

Uno de los métodos más comunes para estimar el factor de escalamiento en flotación consiste en realizar pruebas paralelas tanto en planta como laboratorio, usando la misma pulpa en iguales condiciones, para así luego comparar los tiempos a los cuales ambas alcanzan una misma recuperación (J. Yianatos & P. Vallejos, 2022). Este procedimiento permite cuantificar la razón entre el tiempo de residencia en planta y tiempo de residencia en laboratorio, para flotaciones de igual rendimiento.

$$Factor\ escalamiento = \frac{\tau_{planta}}{\tau_{laboratorio}} \quad (11)$$

En la Tabla 3 se observan valores referenciales para el tiempo de residencia en circuitos Rougher y flotación de laboratorio de distintos materiales, junto con su respectivo factor de escalamiento promedio.

Tabla 3. Tiempos de residencia típicos para flotación de distintos materiales en planta y laboratorio (Nelson, 2002).

Material flotado	Tiempo de residencia en circuito Rougher, Minutos	Tiempo de residencia en flotación de laboratorio, Minutos	Factor de escalamiento promedio
Barita	8 - 10	4 - 5	2.0
Carbón	3 - 5	2 - 3	1.6
Cobre	13 - 16	6 - 8	2.1
Feldespatos	8 - 10	3 - 4	2.6
Plomo	6 - 8	3 - 5	1.8
Molibdeno	14 - 20	6 - 7	2.6
Nickel	10 - 14	6 - 7	1.8
Fosfato	4 - 6	2 - 3	2.0
Tungsteno	8 - 12	5 - 6	1.8
Zinc	8 - 12	5 - 6	1.8

2.3 Análisis multivariable

Los datos por analizar en este trabajo de título pueden resultar complejos, ya que implican múltiples variables. Algunas de estas variables pueden ser relevantes para el estudio, mientras que otras no. El análisis multivariable es una herramienta útil para comprender las relaciones entre estas variables y buscar la simplicidad en su análisis. Para este estudio, se dará énfasis en las técnicas de análisis de componentes principales y agrupamiento k-Means, ya que son herramientas efectivas para analizar datos multivariados y podrían ser útiles para identificar patrones en la mineralogía que podrían afectar el factor de escalamiento de flotación de minerales.

2.3.1 Análisis de componentes principales

El análisis de Componentes Principales (PCA) es una técnica de análisis multivariable que se utiliza para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos con la finalidad de simplificar de simplificar la estructura compleja de los datos y obtener una representación más compacta y fácil de interpretar. En esencia, se trata de una técnica de transformación lineal que proyecta los datos originales en un nuevo espacio dimensional que se conoce como espacio de componentes principales. En este nuevo espacio, cada variable representa una dimensión, donde a la vez, las variables no están correlacionadas. Estas nuevas variables se denominan factores o Componentes principales. Estas nuevas variables son combinaciones linealmente independientes de las variables originales, las que son ordenadas de tal manera que las primeras componentes principales son las que retienen la mayor cantidad de información de los datos originales y, por ende, pueden ser utilizadas para explicar la variabilidad presente en los datos.

El objetivo principal del PCA es simplificar la estructura compleja de los datos y obtener una representación más compacta y fácil de interpretar. Para ello, se utilizan los valores y vectores propios de la matriz de covarianza o de correlación de los datos originales. La matriz de covarianza se utiliza cuando las variables tienen diferentes unidades o escalas, mientras que la matriz de correlación se utiliza cuando las variables tienen las mismas unidades o escalas.

A continuación, se muestra la fórmula de la matriz de covarianza:

$$Cov(X) = \frac{1}{n} * X'X \quad (12)$$

Donde X es la matriz de datos original, X' es la matriz traspuesta de X y n es el número de observaciones.

La matriz de correlación se calcula de manera similar, pero antes de aplicar la fórmula anterior, se deben estandarizar los datos:

$$R = \frac{1}{n} * X'X \quad (13)$$

Donde R es la matriz de correlación.

A partir de la matriz de covarianza o de correlación, se pueden obtener los valores y los vectores propios. Los valores propios representan la cantidad de varianza explicada por cada componente principal, mientras que los vectores propios indican la dirección de cada componente principal.

La fórmula para calcular los valores propios es:

$$\lambda_i = \frac{S_i^2}{(n - 1)} \quad (14)$$

Donde λ_i es el valor propio de la i-ésima componente principal, S_i es la desviación estándar de la i-ésima variable y n es el número de observaciones.

Los vectores propios se calculan a partir de la siguiente fórmula:

$$AX = \lambda X \quad (15)$$

Donde A es la matriz de covarianza o de correlación, X es el vector propio y λ es el valor propio correspondiente.

Una vez que se han obtenido los valores y vectores propios, se pueden ordenar los valores propios de mayor a menor y seleccionar las primeras componentes principales que expliquen la mayor parte de la varianza presente en los datos originales. Estas componentes principales se pueden utilizar para explicar patrones de variabilidad en los datos y para simplificar su interpretación.

2.3.2 Selección del número de componentes principales

La selección del número de componentes principales es un paso crucial en el Análisis de Componentes Principales (ACP), ya que determina la cantidad de información que se conserva en la representación reducida de los datos. La elección del número de componentes principales depende del objetivo del análisis y del nivel de precisión que se requiera en la interpretación de los resultados. Para determinar la cantidad de componentes principales a utilizar se utilizan dos criterios:

- Método de la varianza acumulada: Este método implica seleccionar las componentes principales que acumulan un porcentaje fijo de la varianza total. Por lo general, se seleccionan las componentes principales que acumulan entre un 80% y 90% de la varianza total.
- Método de sedimentación: Este método implica trazar los valores propios en orden descendente y seleccionar las componentes principales cuyos valores propios estén por encima del “codo” del gráfico. El “codo” se define como el punto en el que la curva del gráfico se aplana y los valores propios restantes son relativamente pequeños.

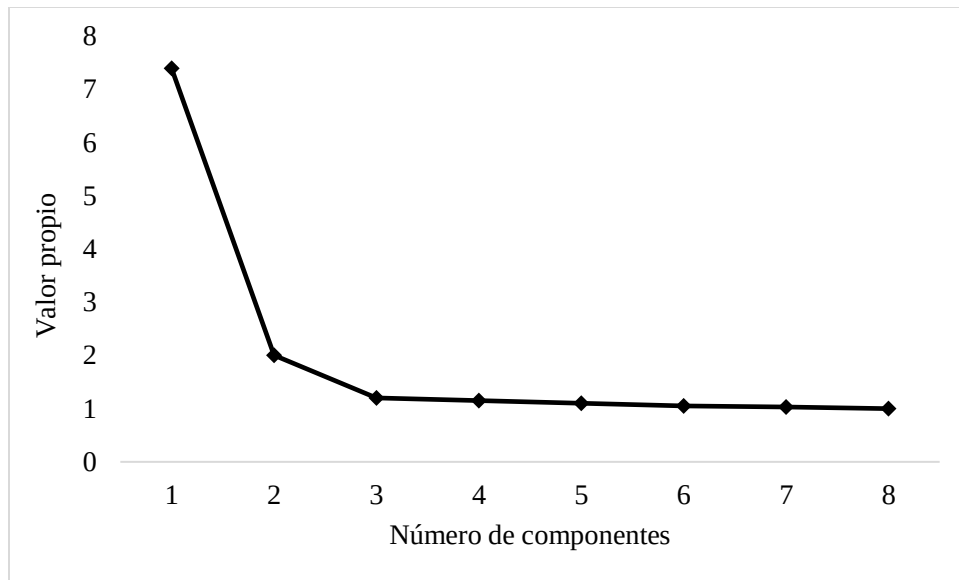


Figura 9. Ejemplo de gráfico de sedimentación

Los métodos mencionados corresponden solo a aproximaciones, por ende, la selección final del número de componentes principales debe basarse en una combinación de los resultados de alguno de estos métodos junto a la interpretación de los datos por parte del investigador.

2.3.3 Clustering mediante algoritmo k-Means

Clustering, también conocido como agrupamiento, es una técnica de análisis de datos no supervisada que implica la separación de un conjunto de datos en grupos o clústers homogéneos. El objetivo de clustering es agrupar los datos en función de su similitud, de modo que los elementos dentro de cada grupo sean lo más similares posible entre sí, mientras que los elementos en diferentes grupos sean lo más diferentes posible.

Uno de los algoritmos para realizar clustering más utilizados es el k-Means, el cual posee un enfoque iterativo para clasificar los datos y se basa en la minimización de la varianza dentro de cada grupo y la maximización de la varianza entre los grupos.

El algoritmo k-Means se puede resumir en los siguientes pasos:

- Elegir k centroides iniciales de forma aleatoria dentro del conjunto de datos. Estos centroides representan los puntos que se utilizarán para dividir el conjunto de datos en k grupos distintos.

- Asignar cada punto de datos al centroide más cercano. Para calcular la distancia entre cada punto de datos y los centroides, se utiliza una medida de distancia, como, por ejemplo, la distancia Euclidiana
- Recalcular el centroide de cada grupo como la media aritmética de todos los puntos del grupo. El centroide de cada grupo se utiliza para representar el centro de cada grupo.
- Repetir los pasos 2 y 3 hasta que se alcance una solución estable, esto quiere decir, cuando los centroides de cada grupo ya no cambien

Es fundamental considerar que el rendimiento del algoritmo k-Means puede ser influenciado por factores como la selección del número de grupos, la inicialización de los centroides y la sensibilidad a valores atípicos. Debido a esto, es necesario realizar pruebas y ajustes con el fin de alcanzar una solución óptima y confiable.

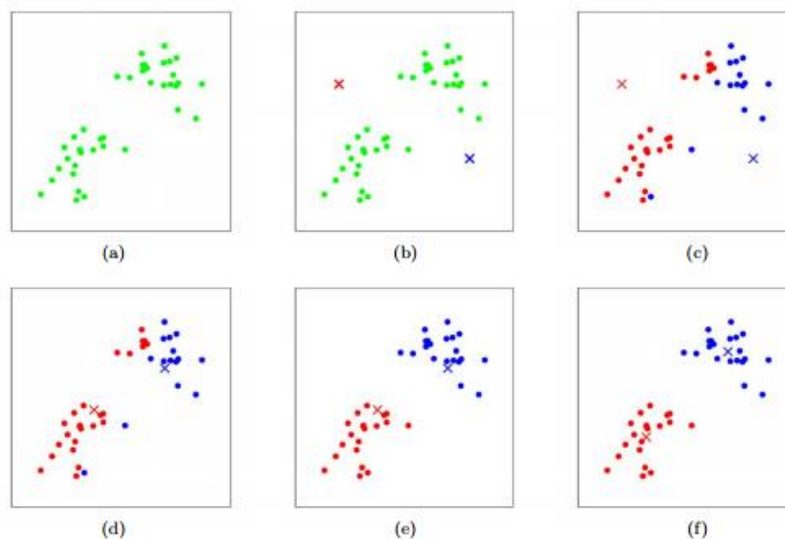


Figura 10. Ejemplo de agrupamiento por K-means

2.3.4 Selección del número de clústers

Al realizar agrupamiento de datos por clústers, uno de los desafíos más importantes es determinar el número adecuado de clústers para un conjunto de datos. Un número insuficiente de clústers puede resultar en agrupaciones que no reflejan adecuadamente la estructura de un conjunto de datos, mientras que un número excesivo de clústers puede generar agrupaciones irrelevantes y difíciles de interpretar.

Existen distintos métodos y técnicas que se pueden utilizar para determinar el número óptimo de clústers en un algoritmo de clustering. El utilizado en este trabajo corresponde al método del codo.

El método del codo es una técnica que se utiliza para determinar el número óptimo de clústers en el algoritmo K-means. Este método se basa en la suma de los cuadrados de las distancias (SSE, por sus siglas en inglés) de los puntos de datos a sus centroides correspondientes.

El proceso para seleccionar el número óptimo de clúster utilizando el método del codo es el siguiente:

1. Ejecutar el algoritmo k-means para distintos valores de k.
2. Calcular el WCSS (Within-Cluster Sum of Squares): Se calcula el WCSS para cada valor de k. Esta es calculada como la suma de los cuadrados de las distancias de cada punto de datos al centroide correspondiente de su clúster.
3. Graficar la relación entre WCSS y el número de clústers.
4. Seleccionar el valor de k en el que el WCSS se estabiliza: Se escoge el valor de k en el que el WCSS se estabiliza o disminuye marginalmente. Este valor es conocido como el codo de la curva, e indica el número óptimo de clústers para el conjunto de datos.

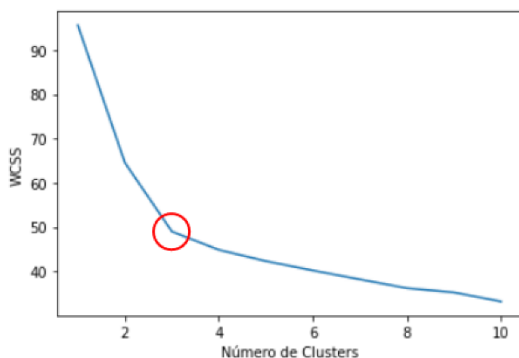


Figura 11. Ejemplo de selección de número de clústers

2.4 Antecedentes Planta de flotación de Chuquicamata

El proceso de flotación primaria que se lleva a cabo en Chuquicamata se divide en tres plantas distintas: A0, A1 y A2. El mineral que alimenta a estas tres plantas corresponde a una mezcla de mineral proveniente de tres orígenes: Chuquicamata Rajo, Chuquicamata Subterráneo y Radomiro Tomic Rajo.

El mineral proveniente del complejo minero de Chuquicamata es sometido a un proceso de chancado primario. El mineral chancado resultante de este proceso es enviado a dos destinos distintos, denominados tolva convencional y tolva SAG, donde a su vez será mezclado con mineral ya chancado proveniente del rajo Radomiro Tomic a diferentes razones.

El mineral almacenado en la tolva convencional se encargará de alimentar a los circuitos de molienda A0 y A1. El circuito denominado A0 está compuesto de 13 secciones de molinos, de capacidad 216 tph cada uno, procesando en total 2808 tph. La pulpa resultante de este circuito de molienda alimentará a la planta de flotación primaria A0, compuesta de 12 celdas de 300 m³ dispuestas en una configuración de 2 filas, con 6 celdas cada una.

El circuito de molienda A1 se compone de 3 secciones de molinos, de 462 tph cada uno, procesando en total 1386 tph. La pulpa producto de este circuito de molienda se encarga de alimentar a la planta de flotación A1, compuesta de 12 celdas de 160 m³ dispuestas en una configuración de 2 filas, con 3 bancos de 2 celdas cada una.

Por otra parte, el mineral contenido en la tolva SAG es alimentado a la planta de molinos SAG, compuesta principalmente de dos molinos SAG, con capacidades de 2684 tph y 1942 tph, procesando en conjunto 4626 tph. La pulpa resultante de este circuito de molienda es destinada a la planta de flotación A2, compuesta de 24 celdas Rougher de 160 m³ cada una, dispuestas en una configuración de 3 filas, cada una con 4 bancos de 2 celdas.

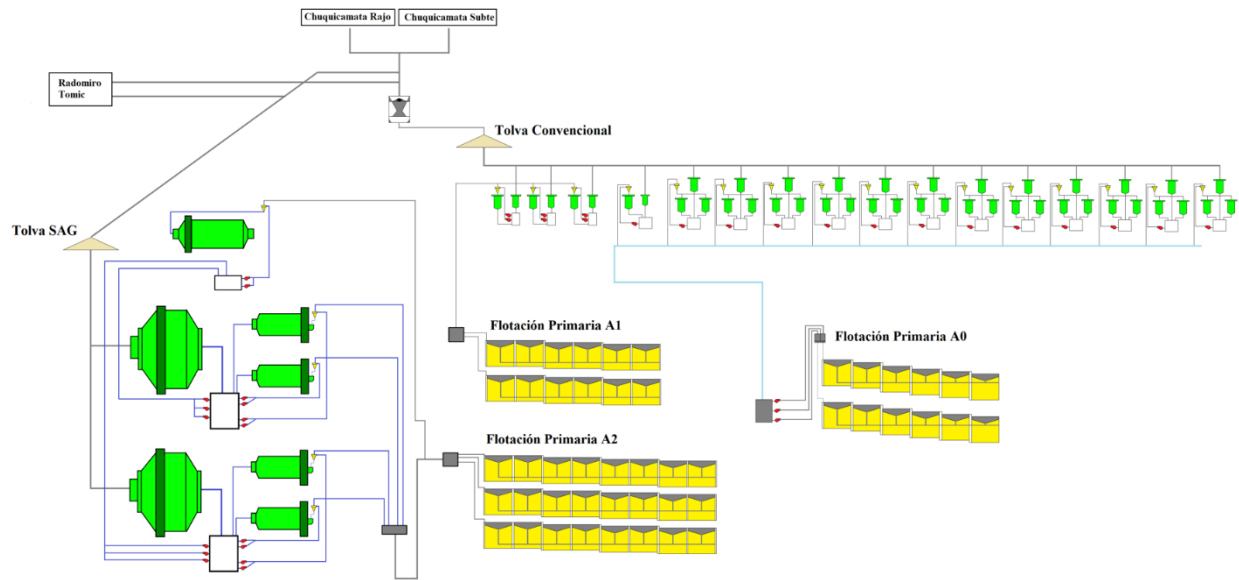


Figura 12. Esquema de planta de molinos y flotación primaria de Chuquicamata

En la operación de las tres plantas de molienda, se utilizan diferentes criterios para determinar si es que la molienda se está llevando a cabo de la mejor manera. Los criterios más importantes incluyen un valor para el porcentaje de mineral retenido en la malla #60 menor al 32%, y un porcentaje de sólidos cercano al 42%. Estas variables son monitoreadas constantemente durante la operación de las plantas para asegurar que se estén logrando los objetivos de molienda deseados y garantizar que la condición en la que se encuentra la pulpa sea óptima para el proceso de flotación.

3. Metodología

En este apartado se presentará la metodología utilizada para estimar el factor de escalamiento cinético utilizado actualmente en las tres plantas de flotación primaria de Codelco Chuquicamata, además de verificar si es que este factor depende de alguna manera del tipo de mineral con que se está alimentando a la planta.

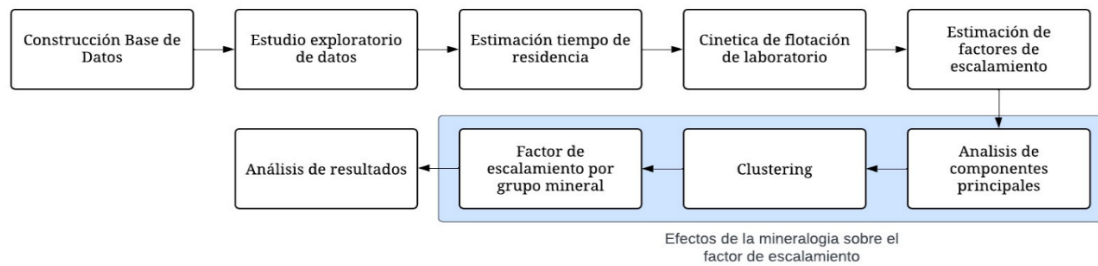


Figura 13. Esquema de la metodología utilizada

3.1 Construcción de base de datos

Para comenzar, se describirán las bases de datos a utilizar, las que luego serán consolidadas en una base de datos única para llevar a cabo el estudio.

3.2 Estudio exploratorio de datos

A partir de la base de datos generada, se llevará a cabo un estudio exploratorio de los datos, desde donde se extraerán estadísticas básicas generales de las variables que son de interés para este estudio como, por ejemplo: variables operacionales (Flujo de aire, Nivel de espuma, Velocidad de burbuja), tasa de alimentación de pulpa, porcentaje de sólidos, entre otros.

3.3 Estimación del tiempo de residencia

En este paso, se utilizarán los datos provenientes de planta para determinar el tiempo de residencia de cada una de las plantas.

Para llevar a cabo la estimación del tiempo de residencia, el primer paso será determinar que celdas del circuito están efectivamente funcionando. Para esto, se utilizará la base de datos creada junto con distintos criterios operacionales considerados por los operados de planta. Una vez se tenga claridad del número de celdas que efectivamente se encuentran funcionando, se procede a calcular el tiempo de residencia de la pulpa mediante una razón entre el volumen de pulpa entrante y la capacidad volumétrica del circuito

3.4 Cinética de flotación de laboratorio

A partir de los datos provenientes de la flotación de laboratorio, que corresponden principalmente a recuperaciones de mineral en distintas marcas de tiempo, y utilizando el modelo cinético de una flotación de tipo “Batch” con una constante de distribución rectangular, se calcularán tanto la constante cinética de flotación como la recuperación máxima, lo que permitirá generar una curva de cinética de flotación distinta para cada uno de los ensayos realizados en laboratorio.

3.5 Estimación de factores de escalamiento

Tomando como base los tiempos de residencia calculados, además de los datos provenientes de los ensayos de laboratorio, se procederá a calcular el factor de escalamiento utilizado actualmente en cada una de las plantas, junto con un factor de escalamiento teórico.

3.5.1 Factor de escalamiento “Actual”

El factor de escalamiento actual será calculado como la razón entre el tiempo de residencia de planta y el tiempo de residencia en laboratorio que, según criterios de los operadores, corresponde al tiempo al que la recuperación de laboratorio es más parecida a la recuperación en planta (Actualmente, se considera que esta condición ocurre a los 7,5 minutos de flotación en laboratorio).

3.5.2 Factor de escalamiento “Teórico”

Por otro lado, se calculará un factor de escalamiento teórico, el cual corresponde a la razón entre el tiempo de residencia en planta y el tiempo de residencia en laboratorio al que efectivamente se alcanza la misma recuperación de la planta. Para obtener dicho tiempo de residencia del laboratorio, se recurrirá a las curvas de cinética generadas a partir de los ensayos de laboratorio.

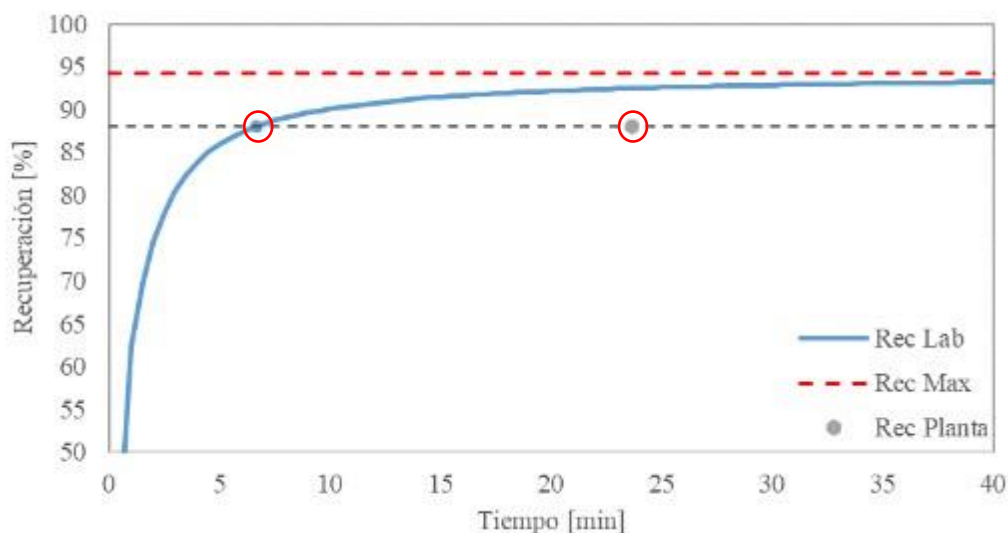


Figura 14. Ejemplo de determinación de factor de escalamiento

3.6 Efectos de la mineralogía sobre el factor de escalamiento

Con el fin de visualizar los efectos de la mineralogía de la pulpa sobre el factor de escalamiento, se realizará un agrupamiento por clústers de datos, a partir del algoritmo k-Means, para lo cual se seguirán los siguientes pasos:

3.6.1 Análisis de componentes principales

Al existir múltiples tipos de mineralogía dentro de la pulpa, se llevará a cabo un análisis de componentes principales con la finalidad de reducir la dimensionalidad de los datos a un espacio de 2 o 3 dimensiones, dependiendo del porcentaje de la varianza total que expliquen estas variables en conjunto, y así poder simplificar y facilitar el análisis de los datos disponibles.

3.6.2 Clustering

Mediante el algoritmo de agrupamiento de K-Means, se realizará un clustering a partir de los componentes principales definidos, con el fin de poder generar grupos de pulpas que contengan mineralogías similares. También, se describirá y analizará en detalle la mineralogía que representa a cada uno de los clústers.

3.6.3 Estimación de factor de escalamiento por grupo de mineral

Tomando como base los clústers definidos y los factores de escalamiento previamente calculados, se procede a agrupar los factores de escalamiento según cada clúster definido, con el fin de ver cómo es que el tipo de mineral con que se está alimentando afecta al factor de escalamiento.

4. Resultados

4.1 Construcción de base de datos

4.1.1 Base de datos de planta

Con respecto a la base de datos de planta, esta nace como un conglomerado de 3 bases de datos distintas:

- Datos provenientes de planta

Estos datos son reportados cada una hora por los distintos sensores presentes en las plantas de concentración. Dentro de estos datos se encuentran:

- **Altura de espuma:** Altura del lecho de espuma, medido en [mm]
- **Velocidad de burbuja:** Velocidad que poseen las burbujas viajando hacia el labio de rebose, medido en [cm/s]
- **Flujo de aire:** Flujo de aire suministrado a la celda, medido en [m³/min]
- **Tasa de alimentación:** Tasa de alimentación de mineral, medido en [tph]

- Datos del “Laboratorio Químico Calama”

Desde cada planta se extraen distintas muestras de mineral y concentrado en cada uno de los turnos de operación. Estas muestras son sometidas a distintas pruebas, desde donde se extrae información de:

- **Ley de alimentación:** Ley de Cu de la pulpa, medido en [%]
- **Ley de concentrado:** Ley de Cu del concentrado, medido en [%]
- **Recuperación Cu:** Recuperación de Cu de la planta, medido en [%]

- Datos CADEMI

Esta base de datos recopila las características mineralógicas (Mineralogías en base mineral, Recuperación In-Situ) del mineral que entra a cada tolva, haciendo la distinción por origen del mineral (Chuquicamata Rajo, Chuquicamata Subte y Radomiro Tomic). Desde esta base de datos se extraen los siguientes datos:

- **Min_Base_XX:** mineralogía en base mineral, incluye registros de Pirita, Calcopirita, Covelina, Calcosina, Digenita, Bornita, Enargita y Blenda
- **Rec_IS:** Recuperación In-Situ, correspondiente a una estimación realizada mediante modelos geometalúrgicos de la posible recuperación máxima del mineral, medido en [%]

- **Prop_XX:** Proporción de mineral de distintos orígenes (Chuquicamata Rajo, Chuquicamata Subterránea, Radomiro Tomic), medido en [%]

Estas 3 bases de datos fueron consolidadas en una base de datos única, en donde se muestran las variables mencionadas agrupadas por día, y se limitan exclusivamente al turno A de operación, que abarca desde las 5 de la mañana hasta las 1 de la tarde. Este enfoque permite tener una visión clara y detallada de las actividades que tuvieron lugar durante ese período en particular, que también corresponde al periodo de tiempo en el que se extraen las muestras de pulpa que son enviadas a ensayos de laboratorio. De esta manera, se podrán comparar de manera más fehaciente los resultados obtenidos en planta con los resultados de los ensayos de laboratorio.

4.1.2 Base de datos de laboratorio

Los datos de laboratorio a usar provienen de ensayos que se realizan diariamente a muestras de pulpa provenientes de las tres plantas. Estas muestras son captadas en la mañana de cada día, generalmente entre las 08:00 y 09:00 horas, desde el cajón de alimentación de cada uno de los circuitos. Estas muestras son acondicionadas a un pH y porcentaje de sólidos estándar, para luego ser sometidas a un proceso de flotación “Batch”, desde donde se recupera concentrado en las marcas de tiempo de 1, 3, 7.5 y 12 minutos, reportando para cada una de estas la masa de concentrado, ley y recuperación acumulada

De esta base de datos se extraen, principalmente, los siguientes datos:

- **Rec_Cu_min_X:** Recuperación acumulada de cobre en X marca de tiempo (1, 3, 7.5, 12 minutos), medido en [%]
- **%_malla_65#:** Porcentaje de material retenido en malla N 65#, medido en [%]
- **%_sólidos:** Porcentaje de sólidos de la pulpa, medido en [%]

4.1.3 Base de datos final

Para cumplir con el objetivo de este trabajo, el primer paso es tener una base de datos que permita comparar resultados de flotación de planta con resultados de flotación en laboratorio, es por esto que, tanto la base de datos de planta como la base de datos de laboratorio son consolidadas en una base de datos final, la que posee 315 registros que cubren el periodo entre el 01 de enero del 2021 y el 09 de noviembre del 2021. Esta base de datos consolidada contiene todos los datos relevantes para llevar a cabo este estudio.

4.2 Estudio exploratorio de datos

En este apartado se darán a conocer estadísticas básicas de los datos más relevantes recopilados, pasando por condiciones operacionales, resultados de laboratorios, recuperaciones, entre otros.

4.2.1 Condiciones operacionales de planta

Las condiciones operacionales corresponden a aquellas variables y parámetros que se controlan o ajustan para lograr una recuperación y calidad óptimas del concentrado de mineral. A continuación, se darán a conocer estadísticas básicas relacionadas a estas variables.

Flujo de aire

Con respecto al flujo de aire de las celdas, se puede observar que, en todas las líneas de flotación de las tres plantas, las primeras celdas son las que presentan un mayor flujo de aire. Esta es una práctica común en la industria de la flotación, que lleva por objetivo maximizar la recuperación de cobre en las primeras celdas, a costa de disminuir la selectividad en esas celdas.

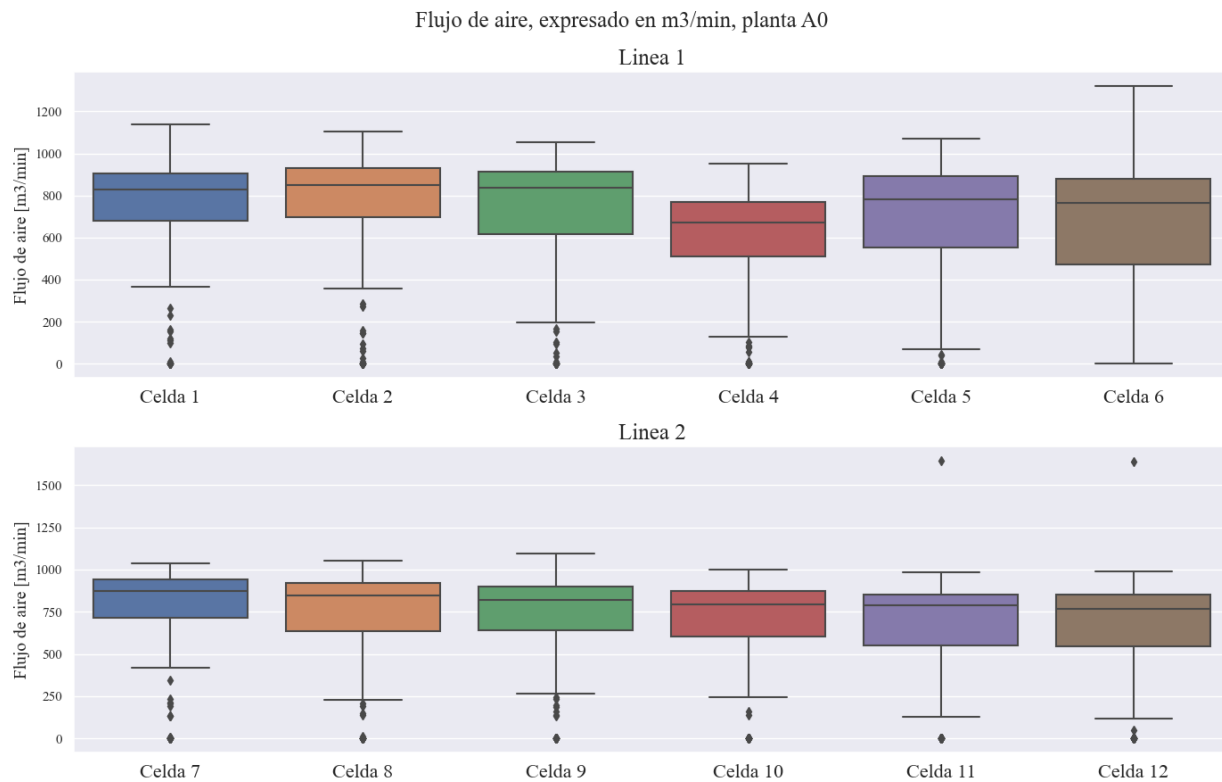


Figura 15. Flujo de aire, planta A0

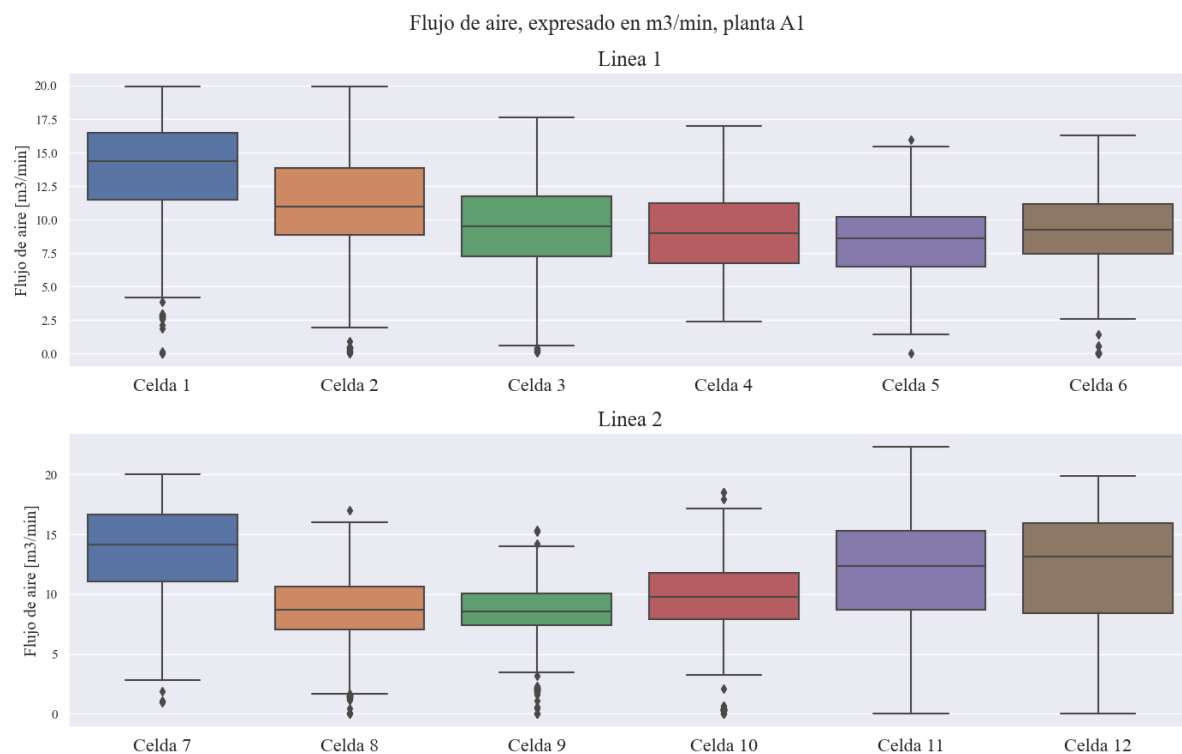


Figura 16. Flujo de aire, planta A1

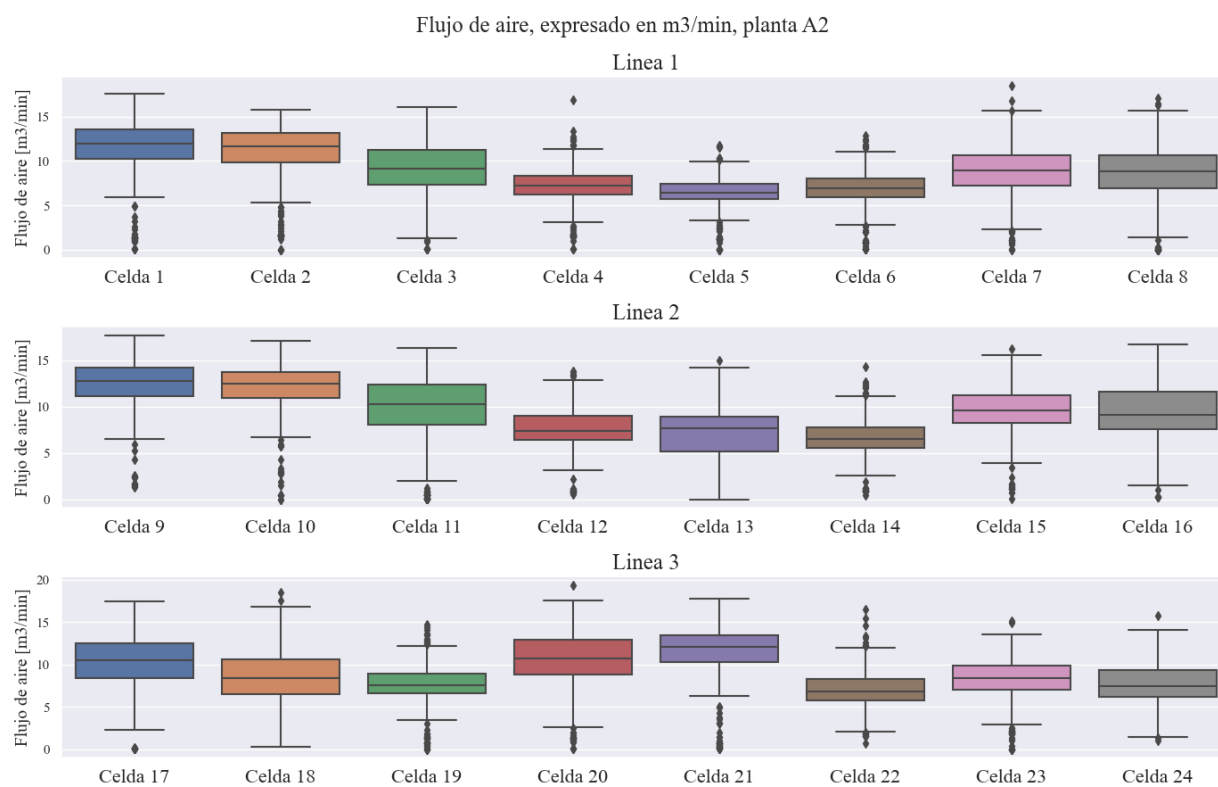


Figura 17. Flujo de aire, planta A2

Nivel de espuma

En cuanto al nivel de espuma, se observa que tanto en las plantas A1 como A2 existe una tendencia a mantener lechos de espuma bajos en las celdas iniciales, elevándose a medida que se avanza por la línea de flotación. Esto se debe a que en las primeras celdas de cada línea se prioriza la recuperación de mineral, lo que se logra con alturas de espuma bajas, mientras que en las celdas finales se busca mejorar la selectividad del proceso, por lo que es necesario aumentar el nivel de espuma. En cuanto a la celda A0, se ven lechos de espuma similares entre todas las celdas, exceptuando las finales de cada línea, en donde el nivel de espuma disminuye.

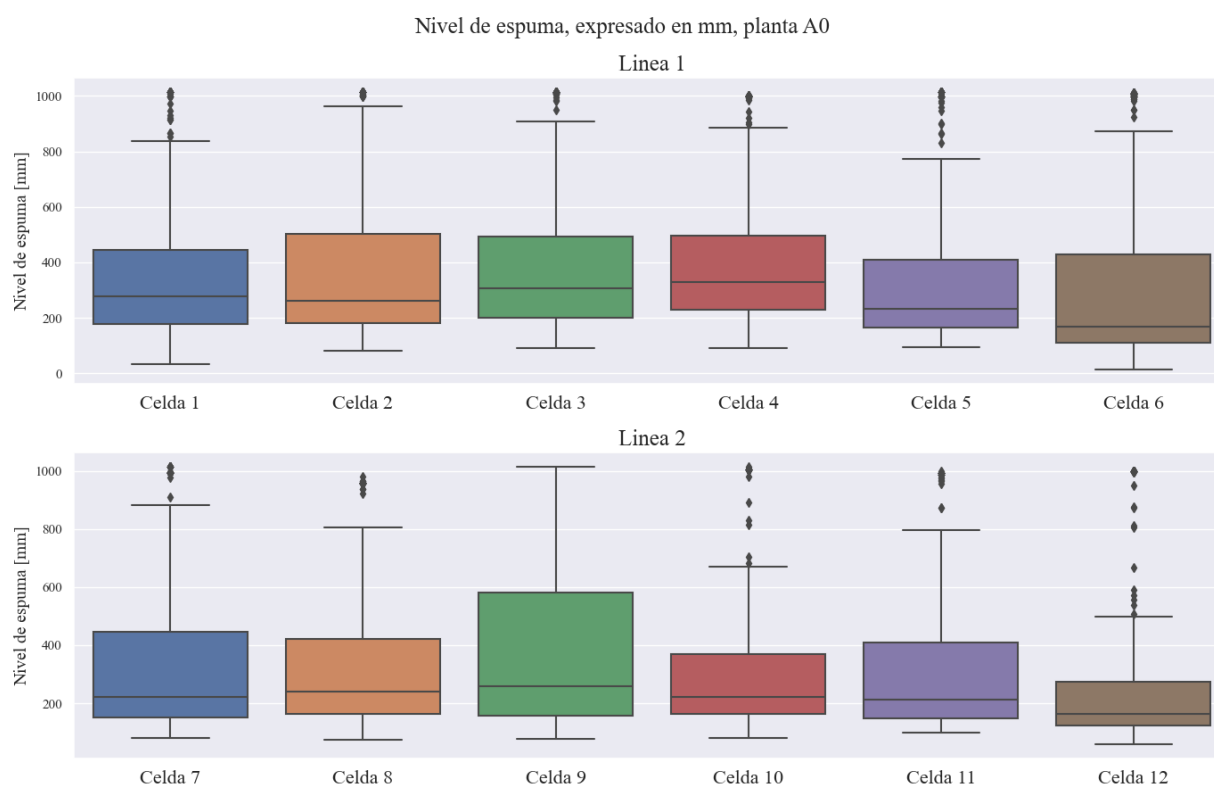


Figura 18. Nivel de espuma, planta A0

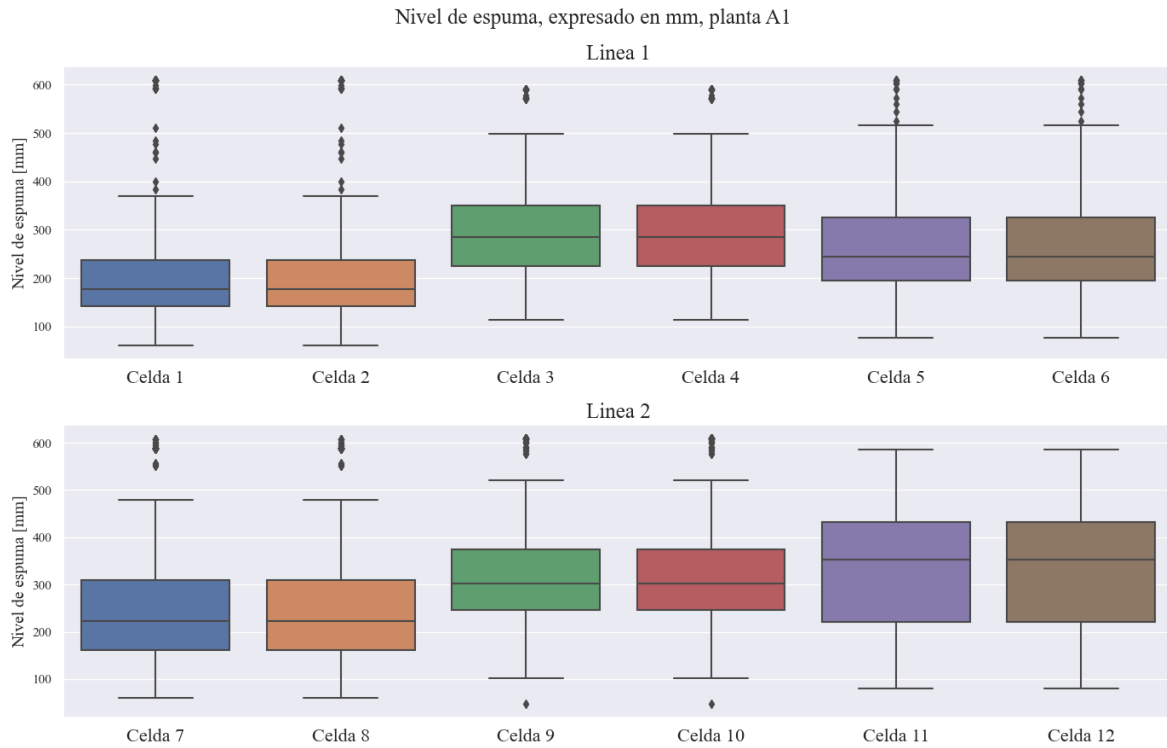


Figura 19. Nivel de espuma, planta A1

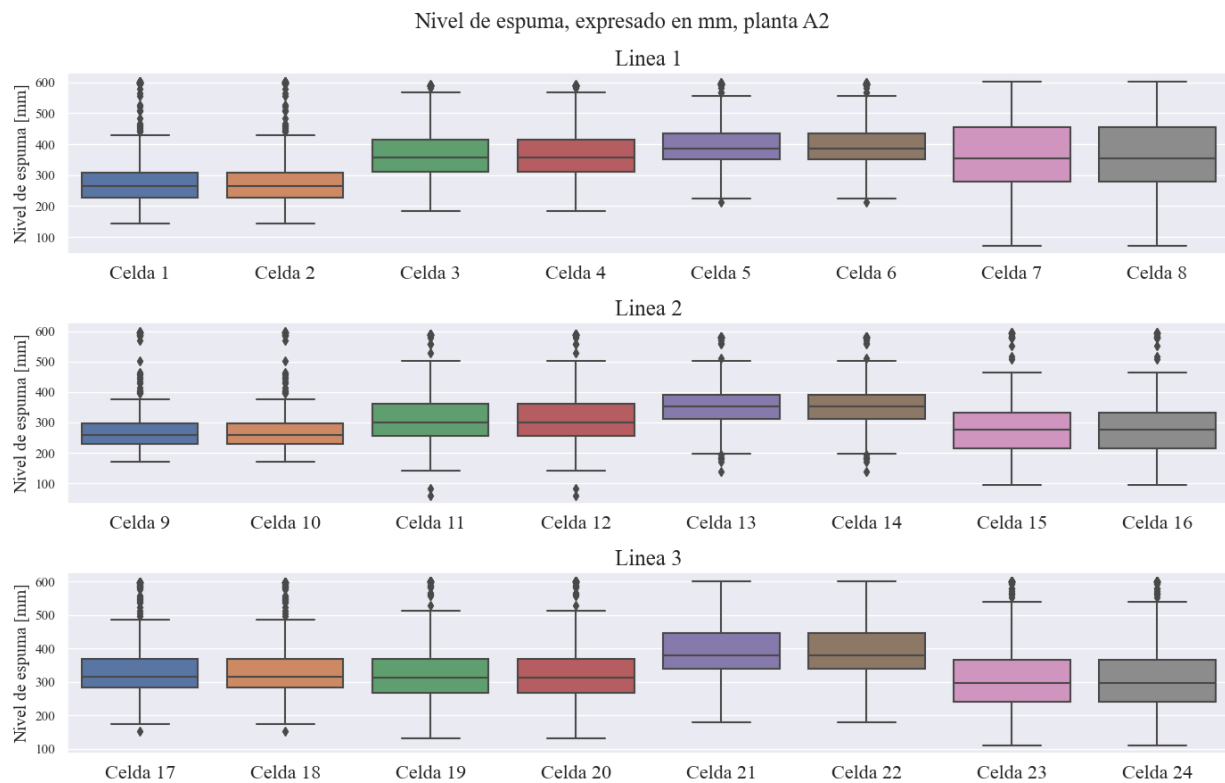


Figura 20. Nivel de espuma, planta A2

Velocidad de espuma

La velocidad de espuma es utilizada como indicador de que una celda esta efectivamente rebosando espuma con concentrado. Los datos mostrados en las Figura 21, Figura 22 y Figura 23 dan cuenta que, en general, las celdas de todas las plantas se encuentran rebosando, ya que poseen una velocidad de rebose mayor a 5 mm/s.

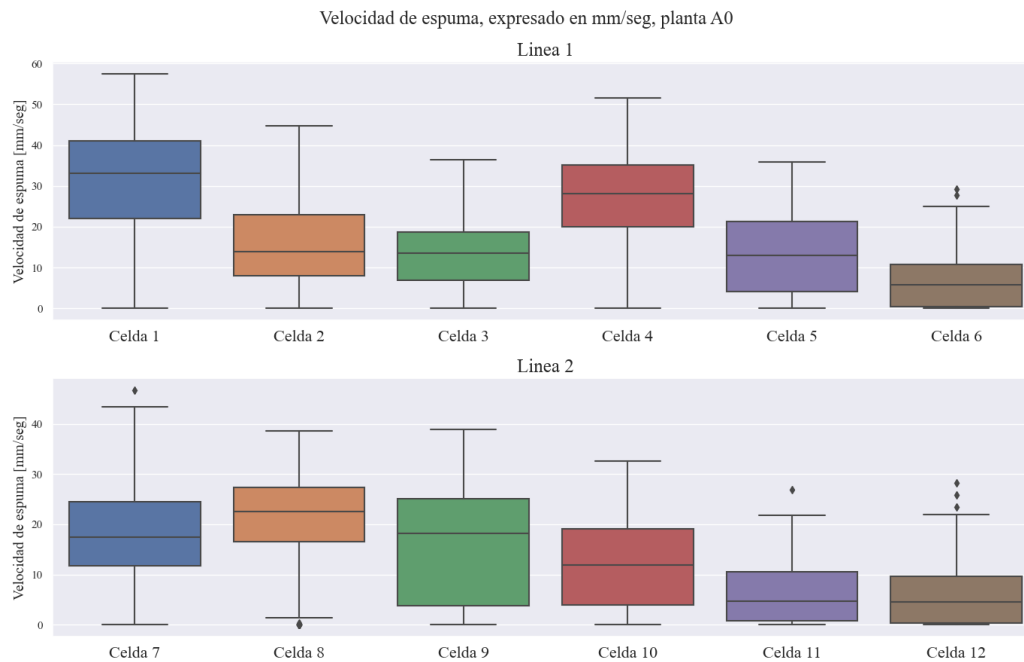


Figura 21. Velocidad de espuma, planta A0

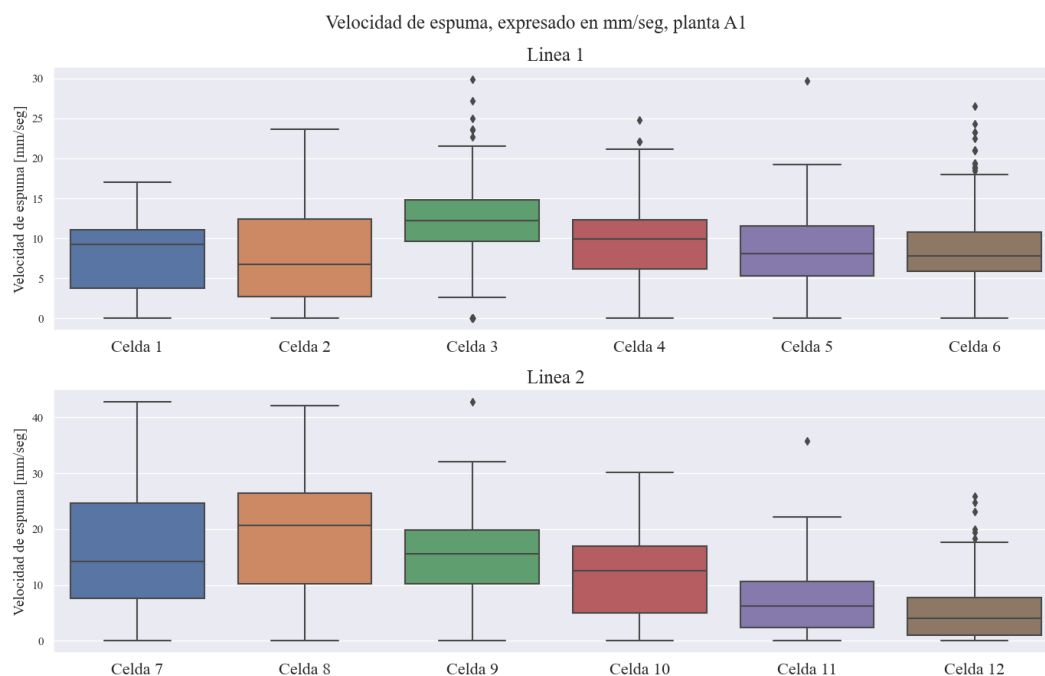


Figura 22. Velocidad de espuma, planta A1

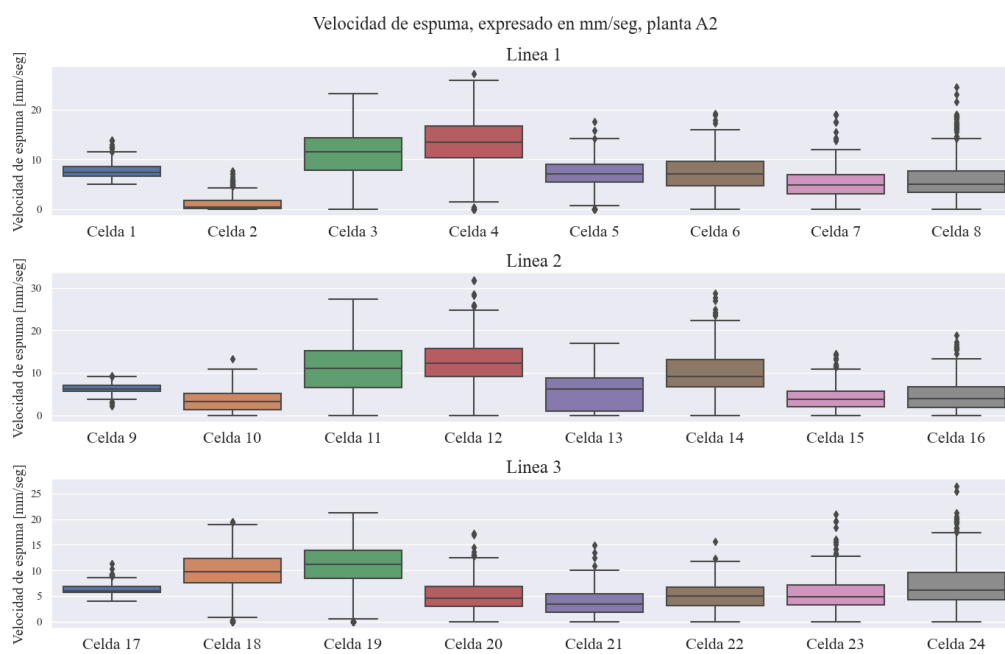


Figura 23. Velocidad de espuma, planta A2

Porcentaje de sólidos

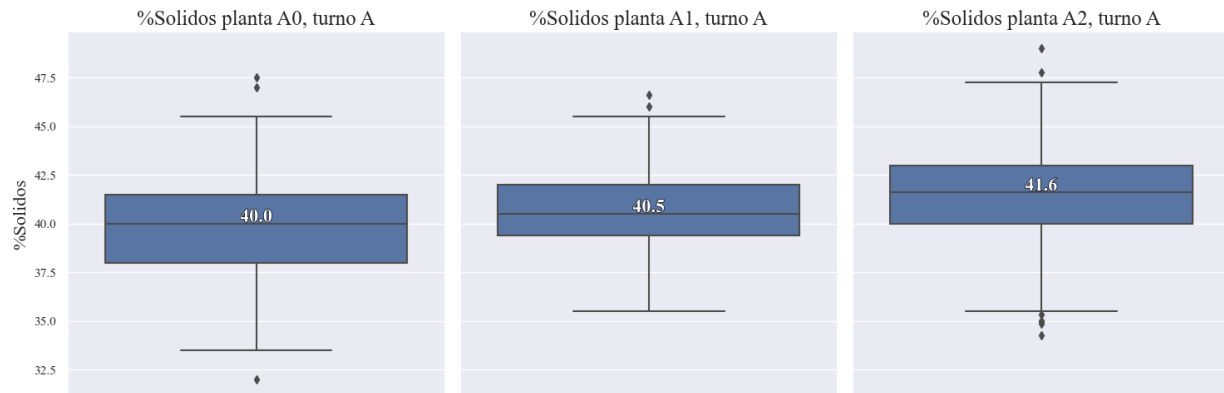


Figura 24. Porcentaje de sólidos en planta

En cuanto al porcentaje de sólidos en la pulpa, se observa que la planta A2 es la planta que recibe la pulpa con mayor porcentaje de sólidos, con una mediana de 41.6%, seguido de la planta A1, con un 40.5%, y la planta A0, con una mediana de 40.0%. En general, la mayor la pulpa que alimenta a las plantas A0 y A1 se mantiene dentro del estándar de operación que se utiliza en planta (%Sólidos < 42%), mientras que la planta A2 presenta en ocasiones valores superiores al estándar.

Porcentaje retenido en malla #65

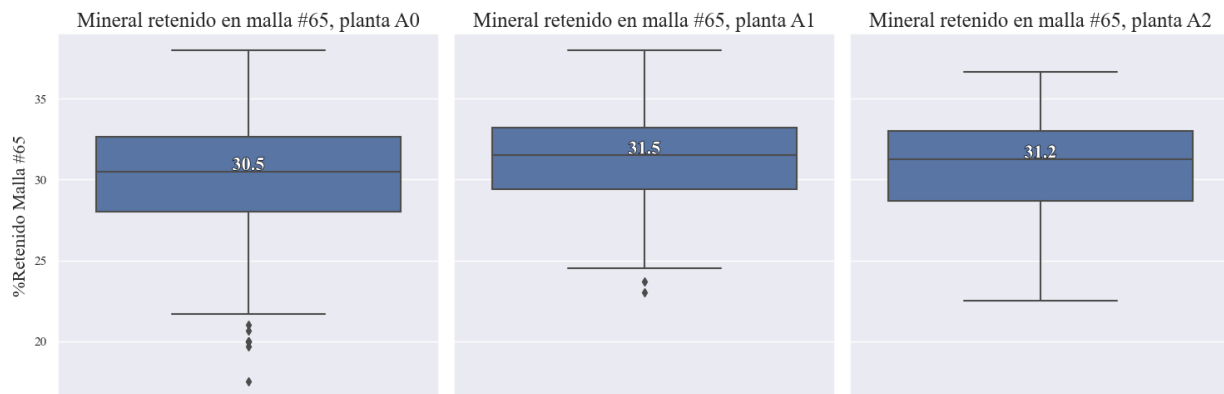


Figura 25. Porcentaje de mineral retenido en la malla #65

Con respecto a la fracción de mineral retenido en la malla #65, en la Figura 25 se observa que, en general, la mediana de este valor se mantiene relativamente constante entre todas las plantas, manteniendo un valor cercano a 31%.

Tasa de alimentación

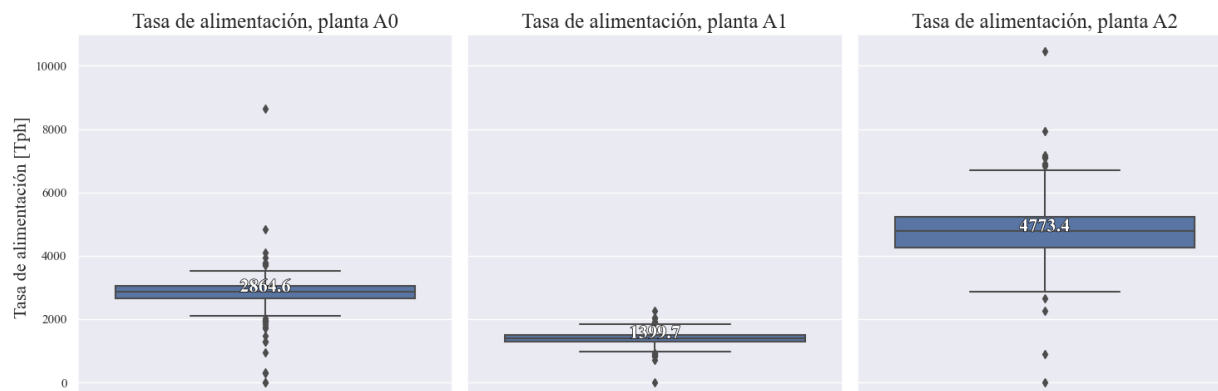


Figura 26. Tasa de alimentación de pulpa a planta, medido en toneladas por hora

A partir de la Figura 26, se puede establecer que las tasas de alimentación de cada una de las plantas durante el periodo de estudio concuerdan con las tasas definidas en el plan de producción de los molinos. También, es posible observar que la planta A2 corresponde a la que más mineral procesa, con una mediana de 4773.4 [tph], seguido de la planta A0, que procesa 2864.6 [tph], y la planta A1, que procesa una mediana de 1399.7 [tph].

Recuperación

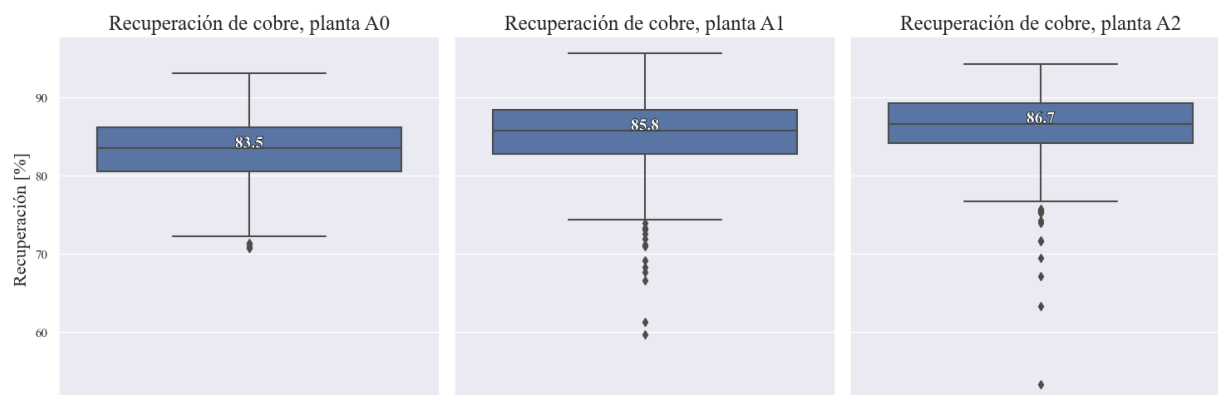


Figura 27. Recuperación de cobre en planta

Con respecto a la recuperación de las plantas, a partir de la Figura 27 se observa que la planta con mayor recuperación global corresponde a la planta A2, mostrando una mediana del 86.7%, seguido de la planta A1, con un 85.8%, y la planta A0, con una mediana de 83.5%.

4.2.2 Características del mineral

Origen del mineral

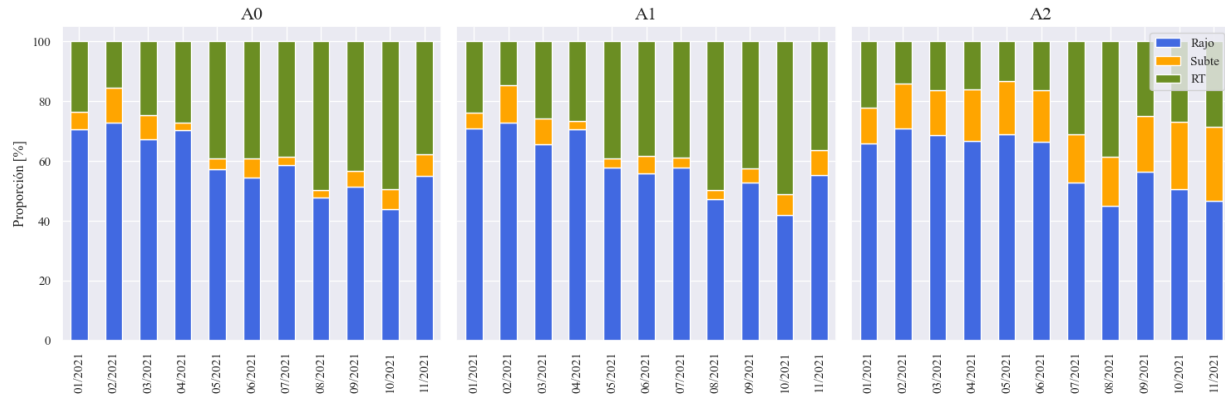


Figura 28. Origen del mineral que alimenta a las distintas plantas de flotación

Con respecto al origen del mineral que alimenta a las distintas plantas, la Figura 28 muestra que el mineral puede provenir de tres fuentes distintas: Chuquicamata Rajo, Chuquicamata Subterránea y Radomiro Tomic. De esta figura se observa cómo es que a partir de febrero del 2021 comienza a aumentar la proporción de mineral que es alimentada desde Radomiro Tomic. Además, se observa que tanto la planta A0 como A1 poseen las mismas proporciones de mineral, además de ser las que más mineral proveniente de Radomiro Tomic reciben. Por otra parte, se observa que la planta A2 recibe pulpa con mayor proporción de mineral de Chuquicamata Subterránea, en comparación con las plantas A0 y A1.

Mineralogías

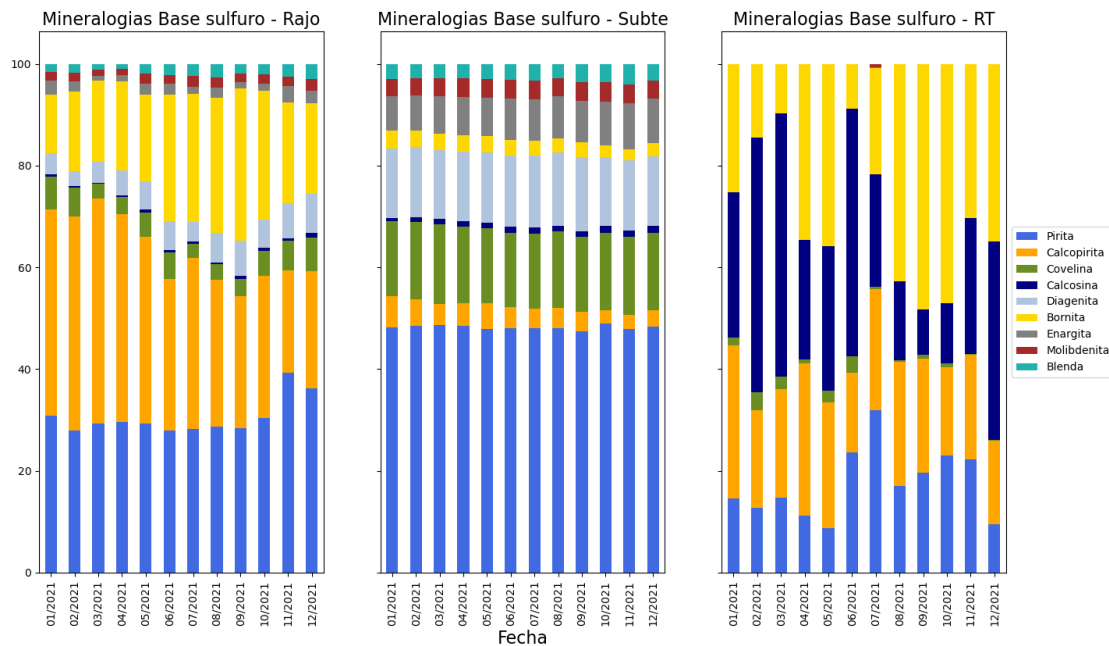


Figura 29. Mineralogías en Base Sulfuro, Chuquicamata Rajo, Chuquicamata subterránea y Radomiro Tomic

En relación con las características mineralógicas del mineral proveniente de los distintos orígenes, la Figura 29 demuestra que el mineral proveniente de Chuquicamata Rajo se caracteriza por tener una alta proporción de Calcopirita y Bornita. Por otro lado, el mineral de Chuquicamata Subterráneo posee la mayor proporción de Pirita, Covelina, Digenita y Enargita. Finalmente, el mineral proveniente desde Radomiro Tomic se caracteriza por tener una mayor proporción de Calcosina, en comparación con los otros orígenes.

4.2.3 Resultados de laboratorio

Recuperación acumulada

Los ensayos de flotación realizados en Chuquicamata consideran la extracción de concentrado desde una celda de flotación Batch en las marcas de tiempo de 1 minuto, 3 minutos, 7.5 minutos y 12 minutos, determinando la recuperación acumulada de cobre obtenida en cada una de estas.

A continuación, se dan a conocer las recuperaciones acumuladas obtenidas en las distintas marcas de tiempo para los ensayos de las tres plantas distintas:

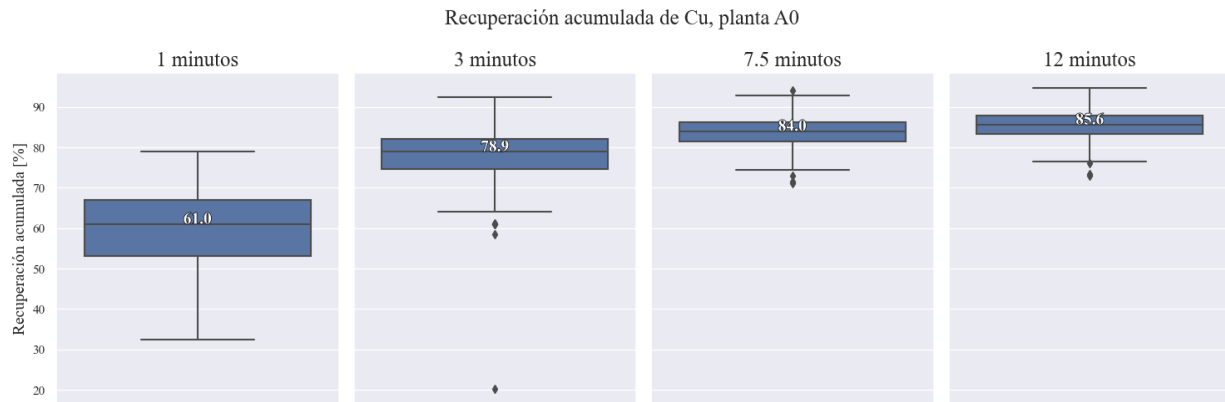


Figura 30. Recuperación de Cu acumulada en flotación de laboratorio, planta A0

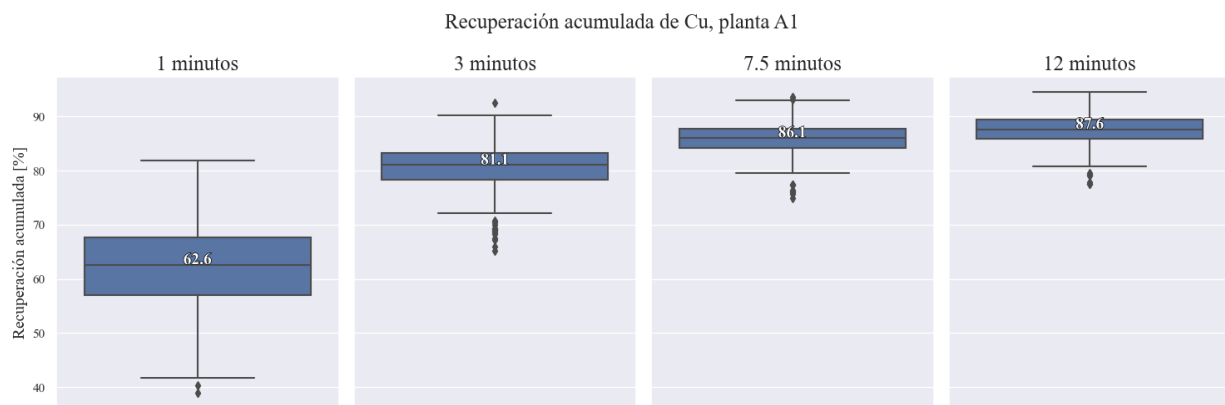


Figura 31. Recuperación de Cu acumulada en flotación de laboratorio, planta A1

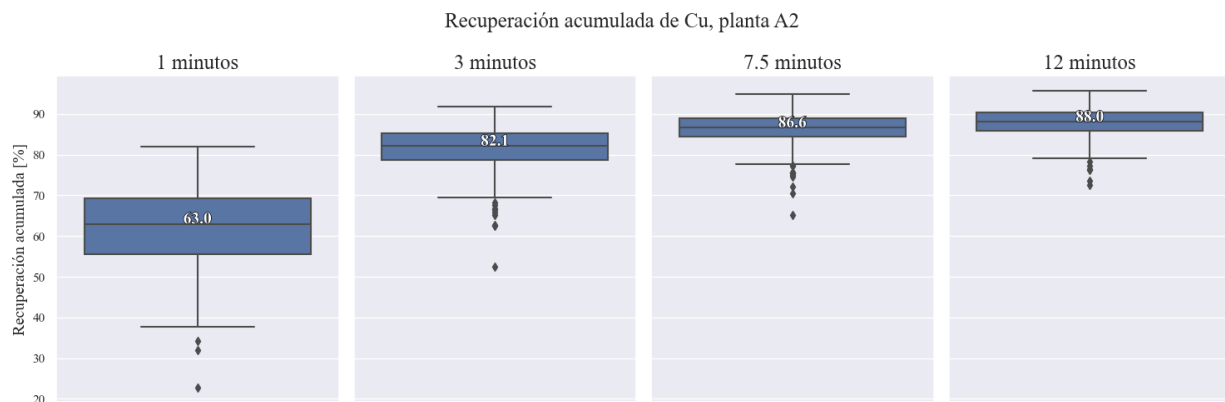


Figura 32. Recuperación de Cu acumulada en flotación de laboratorio, planta A2

Los datos recopilados dan cuenta de que el primer minuto de flotación es el que más recuperación inmediata de cobre presenta y, a medida que avanza el tiempo, se recupera cobre a una menor tasa, efecto que es más notable entre los minutos 7.5 y 12.

4.3 Estimación del tiempo de residencia

4.3.1 Operatividad de plantas

Para poder estimar el tiempo de residencia del mineral dentro de los distintos circuitos de flotación, se recurre a la Ecuación (1) la cual necesita de un volumen efectivo del circuito y un flujo de alimentación de pulpa. Para calcular el volumen efectivo de los circuitos, el primer paso corresponde a verificar que celdas del circuito están efectivamente funcionando. Para discriminar las celdas operativas de las no operativas, se utilizan ciertos criterios considerados por los operadores de las plantas, estos corresponden a:

- Flujo de aire ≥ 5 [m³/min]
- Altura de espuma ≥ 10 [mm]
- Velocidad de espuma ≥ 1 [mm/s]

Tomando en consideración estos filtros, se procede a estimar la cantidad de celdas funcionando en cada una de las plantas de flotación.

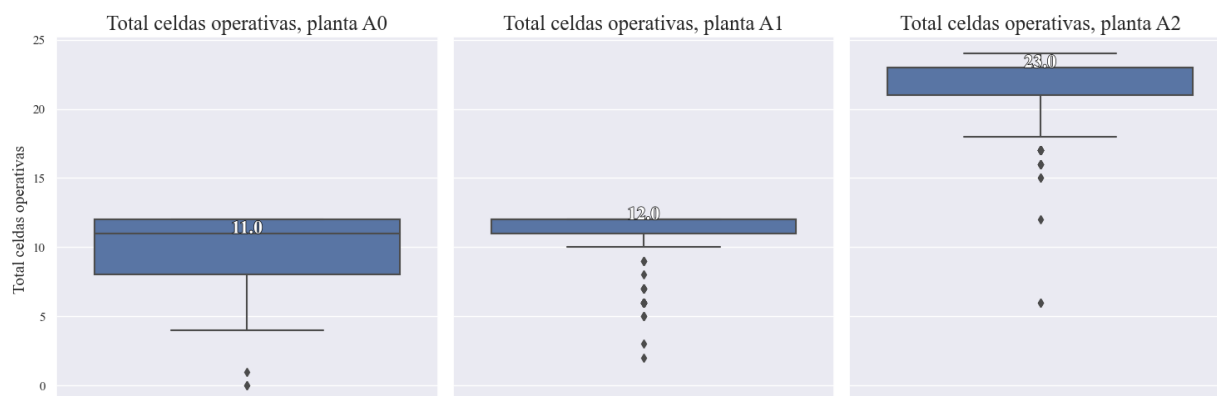


Figura 33. Número total de celdas operativas por planta

Se observa que, dentro del periodo de tiempo estudiado, la planta A1 presenta el mayor porcentaje de operatividad, con una mediana del 100%, seguido la planta A2, con 96%, y la planta A0. con una mediana de 92%.

De esta manera, las celdas que si se encuentran operando pueden ser consideradas dentro del cálculo del volumen efectivo del circuito.

4.3.2 Tiempo de residencia

Continuando con el cálculo del tiempo de residencia, este es calculado para cada uno de los circuitos haciendo uso de la Ecuación (3). Para esto, son consideradas únicamente las celdas que

se encuentran operativas, y se hace uso de los datos de Flujo volumétrico de pulpa y Altura de espuma provenientes de planta, junto con las siguientes variables fijas:

Tabla 4. Características de las celdas de flotación y variables fijas usadas para determinar el volumen efectivo de las celdas

Variable	Unidad	A0	A1	A2
Volumen	m ³	300	160	160
Área	m ²	49	39	39
Altura Celda	m	6.1	4.1	4.1
Hold Up Gas	%	10	10	10

De esta forma, se obtienen los siguientes resultados para el tiempo de residencia de cada una de las plantas:

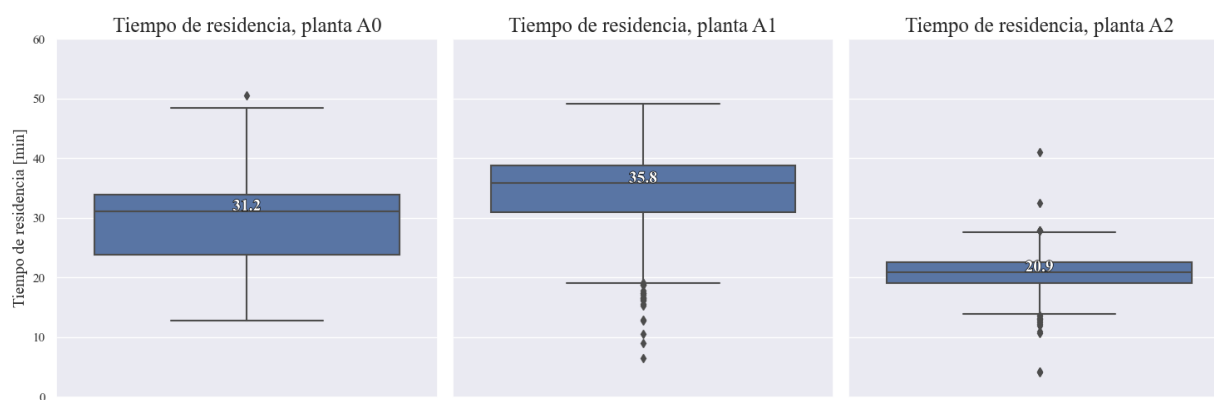


Figura 34. Tiempo de residencia en plantas de flotación Rougher

Desde la Figura 34, es posible observar que la planta con menor tiempo de residencia corresponde a la planta A2, con una mediana de solo 20.9 [min], seguido de la planta A0, con 31.2 [min] y la planta A1, con una mediana de 35.8 [min]. El menor tiempo de residencia de la planta A2 es explicado por el gran volumen de pulpa que ingresa al circuito y el bajo volumen disponible de celdas por el que puede circular esta pulpa.

Otra observación importante tiene que ver con los tiempos de residencia de la planta A0 y A1, en donde esta última tiene un tiempo de residencia mayor. Teniendo en consideración que ambas plantas reciben pulpas con características mineralógicas similares, se aprecia que la planta A1, con mayor tiempo de residencia tiene, en general, una mayor recuperación de Cobre en comparación con la planta A0, que posee un menor tiempo de residencia.

4.4 Cinética de flotación de laboratorio

Con el fin de poder entender el comportamiento del mineral en la flotación realizada en pruebas de laboratorio, se tomaron los resultados de los distintos ensayos realizados durante el periodo de estudio y fueron ajustados a un modelo de cinética de flotación de Klimpel para celdas del tipo “Batch”, considerando una distribución rectangular de la constante de flotación. Como resultados de estos ajustes se obtuvieron múltiples valores para la constante de flotación y recuperación máxima.

4.4.1 Recuperación máxima

Para el cálculo de la recuperación máxima se configuró un valor máximo logable del 95%, que corresponde al valor máximo de recuperación observado desde los datos de planta. Los resultados obtenidos para la constante de recuperación máxima en laboratorio son mostrados a continuación:

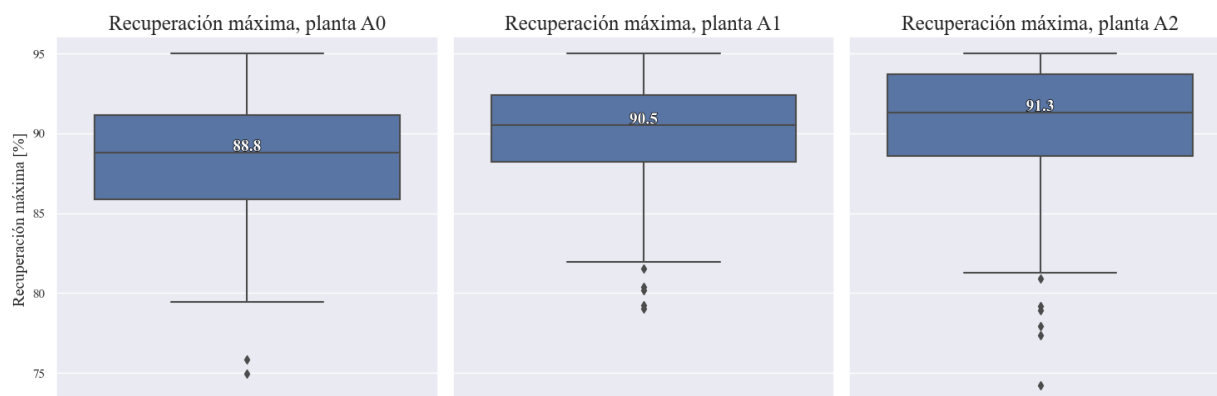


Figura 35. Constante de recuperación máxima obtenida en los ensayos de laboratorio

A partir de la Figura 35, se observa que la planta con mayores recuperaciones máximas logables corresponde a la planta A2, cuya mediana para la constante de recuperación máxima es de 91.3%, seguido de la planta A1, con una mediana de 90.5 y, finalmente, la planta A0, con una mediana de 88.8%.

4.4.2 Constante cinética de flotación

Los resultados obtenidos para las constantes de flotación para ensayos de laboratorio son mostrados a continuación:

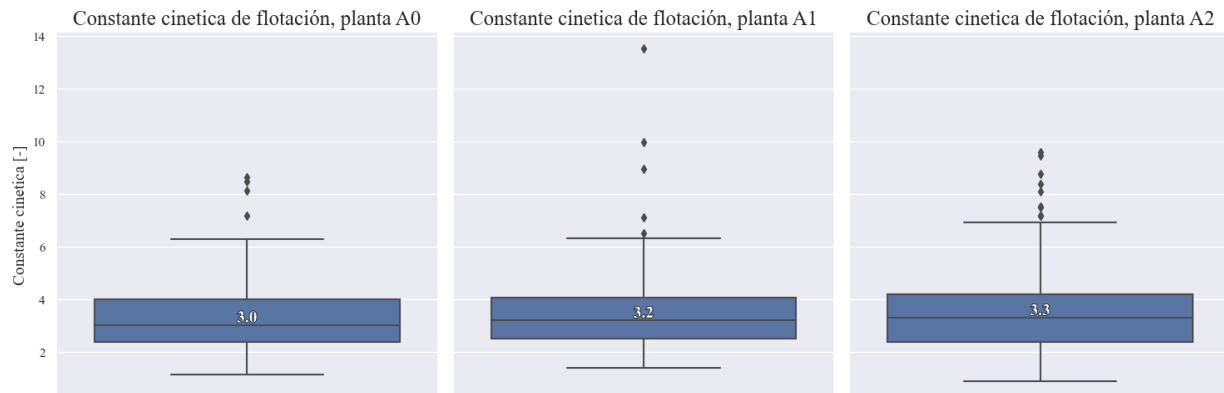


Figura 36. Constante cinética para flotación de laboratorio

Considerando que la constante cinética de flotación representa la velocidad de flotación de las partículas dentro del sistema y, a partir de la Figura 36, es posible ver que la planta A2 corresponde a la planta que más rápido logra flotar el mineral, con una constante cinética de mediana 3.3, seguido de la planta A1, con una constante de 3.2 y, finalmente, la planta A0 siendo la más lenta, con una constante de 3.0.

4.5 Factor de escalamiento cinético

Se procede a calcular dos factores de escalamiento, el primero denominado “Actual”, que considera un tiempo de residencia en laboratorio de 7.5 minutos, que corresponde al tiempo al que, hoy en día, se cree que la recuperación en laboratorio iguala a la recuperación de planta. El segundo factor de escalamiento se denomina “teórico”, y considera un tiempo de residencia en laboratorio tal que la recuperación de laboratorio sea efectivamente lo más cercana posible a la recuperación en planta. Este nuevo tiempo de residencia en laboratorio se calcula a partir del ajuste del modelo de cinética de Klimpel con los parámetros obtenidos en la Sección 4.4 de este documento.

4.5.1 Factor de escalamiento actual

Los resultados obtenidos para el factor de escalamiento “Actual” son mostrados a continuación:

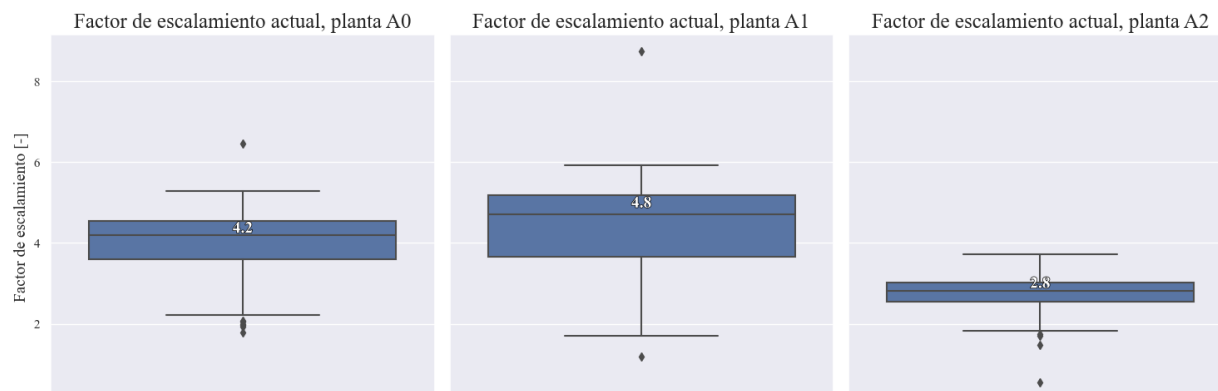


Figura 37. Factor de escalamiento "Actual"

En la Figura 37, se puede ver que la planta A2 posee el menor factor de escalamiento, con una mediana de 2.8, seguido de la planta A0, siendo este 4.2 y la planta A1, con una mediana de 4.8. El bajo factor de escalamiento de la planta A2 se explica por el hecho de que en todas las plantas se está considerando un tiempo de residencia en laboratorio de 7.5 minutos, por lo que, siguiendo la lógica de la Ecuación (11), el bajo tiempo de residencia en planta del circuito A2 implicaría un bajo factor de escalamiento para esta planta, en comparación a las otras plantas, que poseen un mayor tiempo de residencia en planta.

4.5.2 Factor de escalamiento teórico

Los resultados obtenidos para el factor de escalamiento “teórico” son mostrados a continuación:

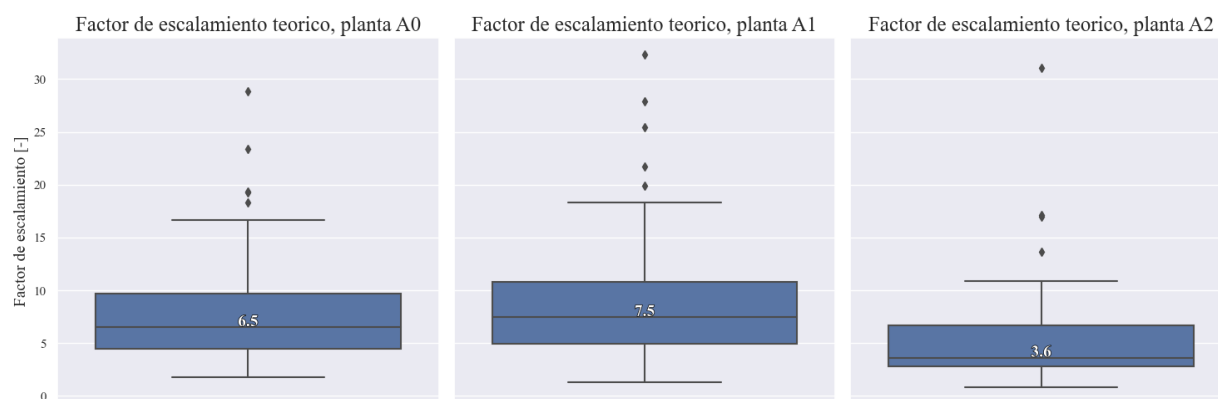


Figura 38. Factor de escalamiento "Teórico"

Al solo variar el tiempo de residencia de laboratorio entre los resultados de factor de escalamiento “actual” y “teórico”, se puede deducir que el mayor valor del factor de escalamiento “teórico” se debe a que, en general, el tiempo de residencia en flotación de laboratorio al que se obtiene una recuperación similar a la de planta es menor a los 7.5 minutos que hoy en día son considerados por

los operadores de planta, provocando que el factor de escalamiento “teórico” sea mayor al “actual” en todas las plantas.

4.5.3 Propuesta de factor de escalamiento

En la actualidad, se considera que los resultados de flotación obtenidos en planta son comparables con los obtenidos en ensayos de laboratorio a los 7.5 minutos de flotación. A continuación, se busca comprobar si es que este criterio resulta ser certero, o si es que es posible proponer un nuevo punto de comparación entre los resultados de planta y laboratorio que resulte ser mejor que el criterio utilizado actualmente.

Para llevar a cabo lo anterior, inicialmente se comparan los resultados de recuperación obtenidos en planta con los de recuperación obtenidos en ensayos de laboratorio al minuto 7.5, calculando la RECM (Raíz del Error Cuadrático Medio). Estos resultados son mostrados a continuación:

Tabla 5. Raíz del error cuadrático medio calculado entre recuperaciones de planta y laboratorio

Planta	RECM
A0	1.407
A1	1.329
A2	1.202

Luego, con los datos de ensayos de flotación disponibles para cada planta, particularmente los relacionados con cinética de flotación, se calculan recuperaciones de laboratorio asociadas a distintos factores de escalamiento, para así, mediante el uso de RECM, se pueda encontrar un factor de escalamiento tal que la discrepancia entre las recuperaciones de laboratorio y planta sea mínima.

Para esto, se comienza por tomar los tiempos de residencia en planta calculados y se hace variar el factor de escalamiento entre los valores de 1 y 10, en aumentos de 0.1. Para cada uno de estos factores se calcula un tiempo de residencia en laboratorio nuevo y se estima una recuperación en esa marca de tiempo a partir de los modelos de cinética de flotación y constantes calculadas. Finalmente, se comparan las nuevas recuperaciones de laboratorio obtenidas para cada factor de escalamiento con la recuperación en planta de cada día mediante RECM y se escoge el factor de escalamiento que lleve asociado el menor RECM

Los factores de escalamiento encontrados junto a su respectiva RECM son mostrados a continuación.

Tabla 6. Factores de escalamiento propuestos junto a su RECM

Planta	Factor de escalamiento	RECM
A0	5.1	1.17
A1	5.6	1.187
A2	3.0	1.156

Al comparar los resultados obtenidos en la Tabla 5 y Tabla 6 se observa que, las recuperaciones de laboratorio encontradas a partir del uso del factor de escalamiento propuesto presentan un menor RECM en comparación con las recuperaciones de laboratorio iniciales que se obtienen al fijar la marca de tiempo a los 7.5 minutos. Lo anterior indica que el uso de estos factores de escalamiento resulta ser mejor a la hora de comparar los resultados de recuperación obtenidos en planta con los obtenidos en laboratorio, a diferencia de continuar con la metodología de comparar con la recuperación observada a los 7.5 minutos de flotación.

4.6 Efectos de la mineralogía sobre el factor de escalamiento

Entre los diversos factores que pueden influir en el proceso de flotación, el tipo de mineral con que se está alimentando a la planta es uno de los que más puede influir a la cinética de un proceso de flotación. La composición química y la estructura cristalina del mineral pueden afectar la adsorción de los reactivos de flotación y, por lo tanto, la eficacia del proceso. Asimismo, las propiedades superficiales de los distintos minerales pueden variar, lo que afecta la interacción con las burbujas de aire y, en última instancia, la cinética de flotación. Por estas razones, a continuación, se analizará si es que, en este trabajo, la mineralogía de la pulpa con que se alimenta a las distintas plantas de flotación tiene algún efecto sobre el factor de escalamiento de estas.

Para lograr lo anterior, los datos serán agrupados según su mineralogía en clústers, a partir del algoritmo k-Means, procedimiento que será explicado en más detalle a continuación.

4.6.1 Análisis de componentes principales

Las variables de interés para este análisis corresponden a las que tengan relación con la mineralogía de las pulpas. En este caso se trabajará con los minerales Calcopirita, Covelina, Calcosina, Pirita, Enargita, Blenda y Digenita.

Estos variables serán sometidas a un análisis de componentes principales, cuya finalidad es reducir la dimensionalidad de los datos, a través de combinaciones lineales hechas a partir de los datos originales que representen de la mejor manera posible la variabilidad presente en los datos.

El análisis de componentes principales para el caso de la Tolva convencional (que alimenta tanto a la planta A0 como A1), mostrados en la Tabla 7, permite observar que los dos primeros componentes principales explican el 86% de la varianza, y que los tres primeros componentes principales explican el 96.7% de la varianza total de la muestra. Para determinar la cantidad de componentes principales a utilizar en análisis posteriores, se consideró la Figura 39, en donde se puede ver la formación de un codo en la tercera componente principal, por lo que se escoge utilizar tres componentes principales.

Tabla 7. Componentes principales junto a sus respectivas varianzas explicadas y acumuladas. Datos de la Tolva Convencional

	CP_1	CP_2	CP_3	CP_4	CP_5	CP_6	CP_7
A0_Base_Cp_A	0.079	-0.962	0.241	-0.082	0.039	0.031	0.022
A0_Base_Cv_A	0.211	0.044	-0.058	-0.810	-0.352	-0.412	-0.029
A0_Base_Cc_A	-0.102	0.245	0.953	-0.123	0.075	0.016	0.025
A0_Base_Py_A	0.945	0.080	0.123	0.284	-0.054	-0.036	-0.030
A0_Base_En_A	0.124	0.047	-0.041	-0.344	-0.142	0.888	-0.230
A0_Base_Bl_A	0.074	0.033	-0.043	-0.110	0.000	0.195	0.970
A0_Base_Dg_A	0.160	0.049	-0.109	-0.332	0.920	-0.026	-0.051
Varianza Explicada	51.5%	34.5%	10.6%	1.7%	1.2%	0.3%	0.2%
Varianza Acumulada	51.5%	86.0%	96.7%	98.3%	99.5%	99.8%	100.0%

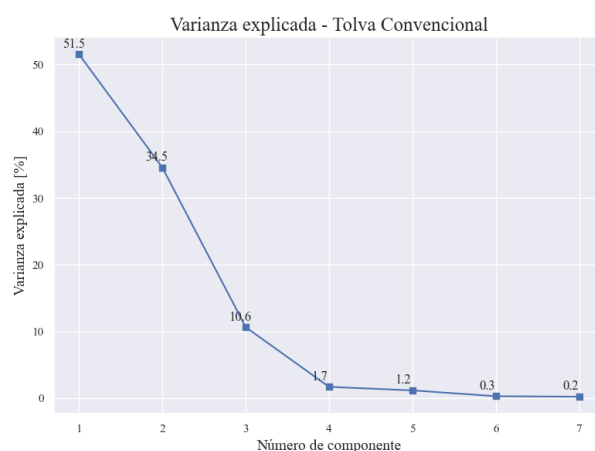


Figura 39. Varianza por componente principal. Tolva convencional

Los componentes principales obtenidos para la tolva SAG se encuentran en la Tabla 8, en donde se puede observar que los dos primeros componentes explican un 89.6% de la varianza, y que los tres primeros componentes explican un 96.2% de la varianza total. La elección de la cantidad de componentes principales a utilizar se hizo a partir de la Figura 40, en donde se puede observar la formación de un codo en el tercer componente, por lo que se escogieron los tres primeros componentes principales para llevar a cabo el análisis.

Tabla 8. Componentes principales junto a sus respectivas varianzas explicadas y acumuladas. Datos de la Tolva SAG

	CP_1	CP_2	CP_3	CP_4	CP_5	CP_6	CP_7
A2_Base_Cp_A	-0.374	0.901	0.165	0.130	0.035	0.036	0.027
A2_Base_Cv_A	0.239	0.046	-0.056	0.682	-0.538	-0.419	0.085
A2_Base_Cc_A	-0.033	-0.220	0.954	0.178	0.085	0.020	0.043
A2_Base_Py_A	0.854	0.370	0.175	-0.315	0.017	-0.038	-0.037
A2_Base_En_A	0.147	0.008	-0.033	0.317	-0.234	0.834	-0.357
A2_Base_Bl_A	0.075	-0.003	-0.044	0.018	-0.070	0.356	0.928
A2_Base_Dg_A	0.211	0.008	-0.163	0.534	0.801	-0.010	0.029
Varianza explicada	60.6%	29.0%	6.6%	1.9%	1.3%	0.3%	0.2%
Varianza Acumulada	60.6%	89.6%	96.2%	98.1%	99.4%	99.8%	100.0%

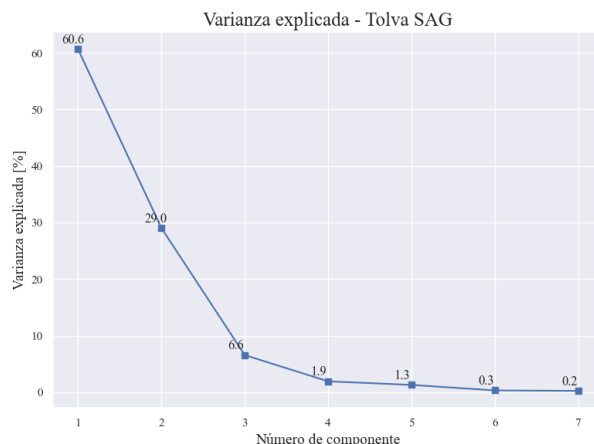


Figura 40. Varianza acumulada por componente principal. Tolva SAG

Al analizar los datos presentados en la Tabla 7, se observa que los coeficientes del primer componente principal, que explica el 51.5% de la varianza, indican que a medida que el valor de esta aumenta, también aumenta la presencia de Pirita y, en menor medida, Covelina en la pulpa (Figura 41)

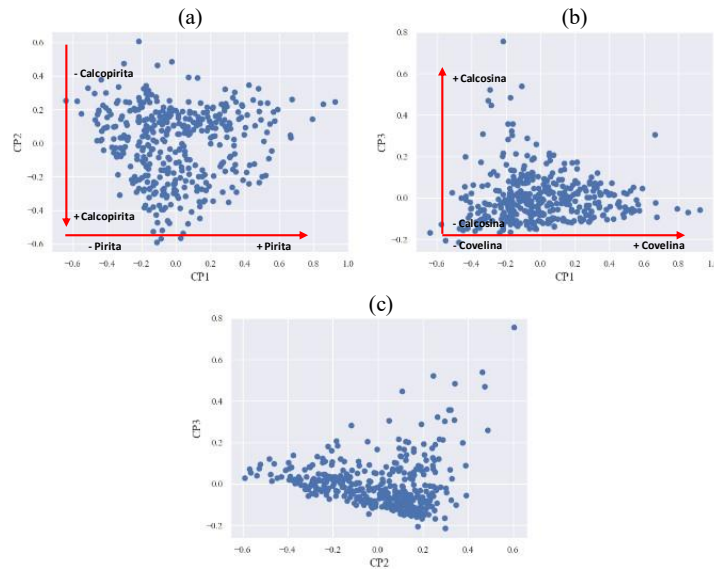


Figura 41. Resultados del PCA, Tolva Convencional. (a): Componentes 1 y 2, (b): Componentes 1 y 3, (c): Componentes 2 y 3

Con respecto a la segunda componente principal, que explica un 34.5% de la varianza, se observa que, a mayores valores de esta, disminuye la presencia de Calcopirita en la pulpa.

Finalmente, en cuanto a la tercera componente principal, que explica un 10.6% de la varianza, se observa que un aumento del valor de esta indica una mayor ley de Calcosina en la pulpa.

Ahora, en cuanto a los datos presentes en la Tabla 8, que hacen referencia a los componentes principales de la Tolva SAG, se puede ver que los coeficientes asociados a la primera componente principal, que explica un 60.6% de la varianza total, indican que un mayor valor de este implica una mayor concentración de Pirita y, en menor medida, de Covelina en la pulpa.

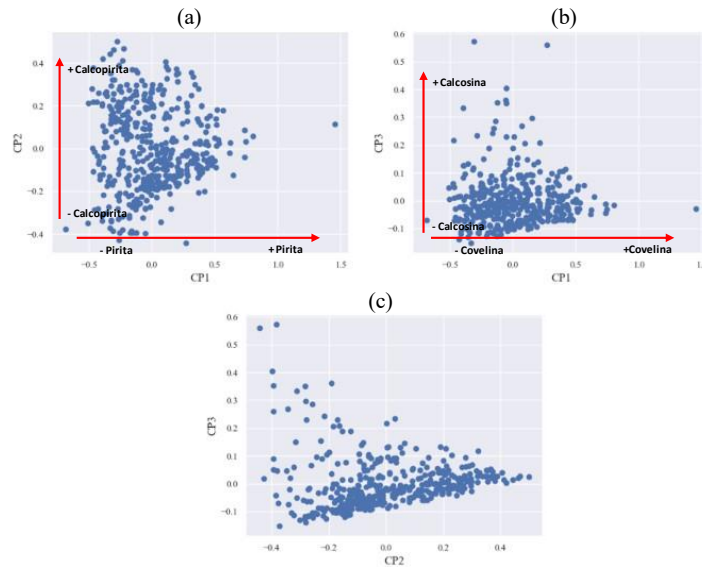


Figura 42. Resultados del PCA, Tolva SAG. (a): Componentes 1 y 2, (b): Componentes 1 y 3, (c): Componentes 2 y 3

En cuanto al segundo componente principal, que explica un 29.0% de la varianza total, sus coeficientes indican que, a mayores valores del componente, mayor es la ley de Calcopirita en la pulpa.

Por último, se observa que el tercer componente principal, el cual solo explica el 6.6% de la varianza, muestra una tendencia en la que a medida que este valor aumenta, también lo hace la concentración de Calcosina en la pulpa.

4.6.2 Clustering

El agrupamiento de datos en clusters, o clustering, es un proceso mediante el cual un conjunto de n datos se divide en k grupos. El objetivo de este proceso es generar grupos en donde la similitud entre los datos dentro del mismo grupo sea máxima y, a su vez, minimizar las similitudes entre grupos distintos. Para efectos de este trabajo, se llevará a cabo un agrupamiento por clústers, utilizando el algoritmo k-Means, el cual busca minimizar la suma de cuadrados de las distancias intra-clúster.

Los clústers definidos en esta sección agruparán pulpas de mineralogías similares, grupos con los cuales más adelante se podrá estudiar el efecto que tiene la mineralogía sobre los factores de escalamiento cinético.

Por defecto, este algoritmo no calcula la cantidad de clústers o grupos óptimos para el análisis, es por esto que es necesario utilizar alguna métrica para definir este número. En este caso, se utilizará

el “método del codo”, en donde se gráfica el WCSS (Within Cluster Square Sum) por cantidad de clusters. Valores bajos de WCSS indican que los datos dentro de cada clúster están más cerca unos de otros y más separados de los datos de otros clústers, lo que sugiere que los datos se agrupan de manera más coherente y compacta.

En la Figura 43 se muestran los resultados del cálculo de WCSS para distintos números de clústers para los datos de la Tolva Convencional. Se observa que el valor del WCSS comienza a disminuir a menor razón a partir de los tres clústers, lo que da a entender que tres clústers son suficientes para clasificar los datos.

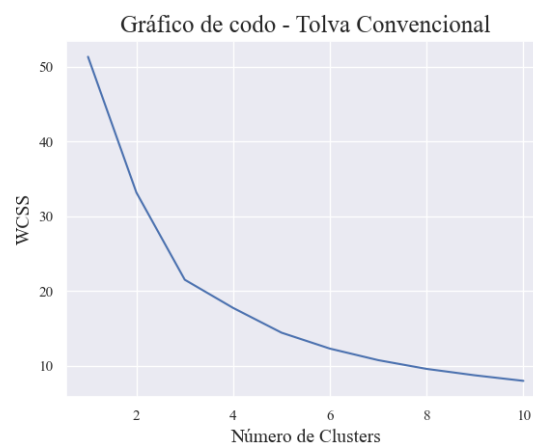


Figura 43. Gráfico de codo. Tolva convencional

Por otra parte, en la Figura 44 se realiza el mismo análisis del valor de WCSS contra el número de clústers, pero para los datos de la Tolva SAG. Se observa que el codo del gráfico comienza a formarse a partir de los tres clústers, lo que indica que tres clústers son suficientes para clasificar los datos.

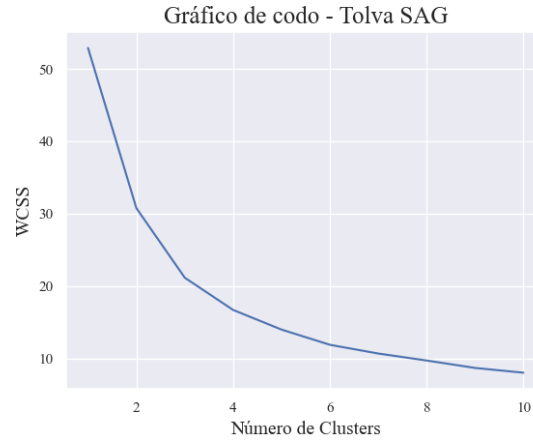


Figura 44. Gráfico de codo. Tolva SAG

Los clústers obtenidos tanto para la Tolva convencional como Tolva SAG serán mostrados a continuación.

4.6.3 Clústers – Tolva Convencional

En la Figura 45 se puede ver la distribución de los Clústers obtenidos para los datos de la Tolva Convencional.

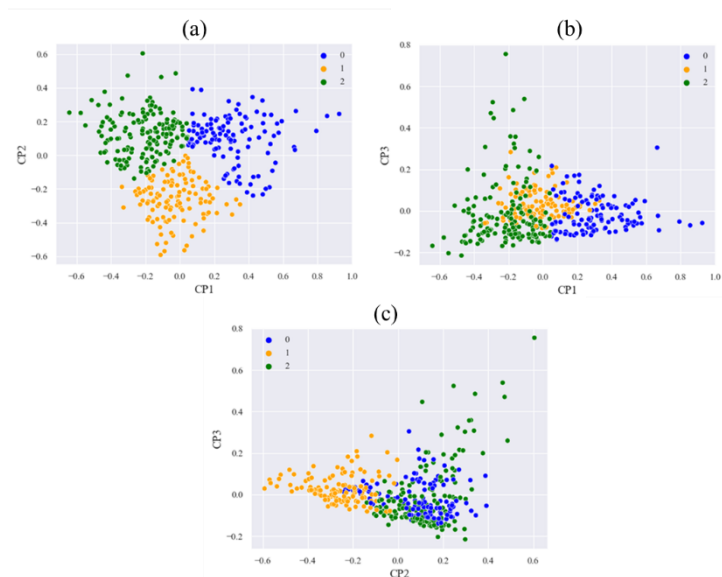


Figura 45. Resultados de clustering. Tolva Convencional. (a): Vista componentes 1 y 2, (b): Vista componentes 1 y 3, (c): Vista componentes 2 y 3

A continuación, se muestran las estadísticas básicas de los tres clústers definidos para la Tolva Convencional:

Tabla 9. Estadísticas básicas, Clúster 0, Tolva convencional

	Count	Mean	Std	Min	25%	50%	75%	Max
Calcopirita	118	0.469	0.139	0.164	0.376	0.439	0.521	0.809
Covelina	118	0.176	0.069	0.007	0.140	0.166	0.214	0.372
Calcosina	118	0.078	0.079	0.004	0.018	0.048	0.116	0.315
Pirita	118	0.955	0.169	0.685	0.841	0.933	1.042	1.547
Enargita	118	0.095	0.046	0.001	0.069	0.088	0.124	0.219
Blenda	118	0.070	0.026	0.006	0.052	0.065	0.082	0.202
Digenita	118	0.160	0.067	0.005	0.121	0.153	0.194	0.363

Tabla 10. Estadísticas básicas, Clúster 1, Tolva convencional

	Count	Mean	Std	Min	25%	50%	75%	Max
Calcopirita	120	0.798	0.122	0.556	0.716	0.795	0.859	1.112
Covelina	120	0.098	0.052	0.023	0.056	0.083	0.131	0.228
Calcosina	120	0.071	0.070	0.000	0.019	0.050	0.096	0.362
Pirita	120	0.615	0.133	0.313	0.515	0.608	0.705	0.971
Enargita	120	0.039	0.025	0.004	0.020	0.032	0.057	0.123
Blenda	120	0.030	0.017	0.006	0.017	0.027	0.038	0.114
Digenita	120	0.086	0.030	0.030	0.066	0.081	0.103	0.196

Tabla 11. Estadísticas básicas, Clúster 2, Tolva convencional

	Count	Mean	Std	Min	25%	50%	75%	Max
Calcopirita	158	0.402	0.109	0.127	0.321	0.403	0.483	0.648
Covelina	158	0.072	0.044	0.000	0.033	0.067	0.104	0.205
Calcosina	158	0.143	0.174	0.002	0.030	0.074	0.178	0.996
Pirita	158	0.472	0.141	0.057	0.367	0.488	0.587	0.721
Enargita	158	0.034	0.026	0.000	0.013	0.032	0.049	0.153
Blenda	158	0.034	0.021	0.000	0.018	0.034	0.050	0.113
Digenita	158	0.079	0.044	0.000	0.048	0.076	0.110	0.192

4.6.4 Clústers – Tolva SAG

En la Figura 46 se puede ver la distribución de los Clústers obtenidos para los datos de la Tolva SAG.

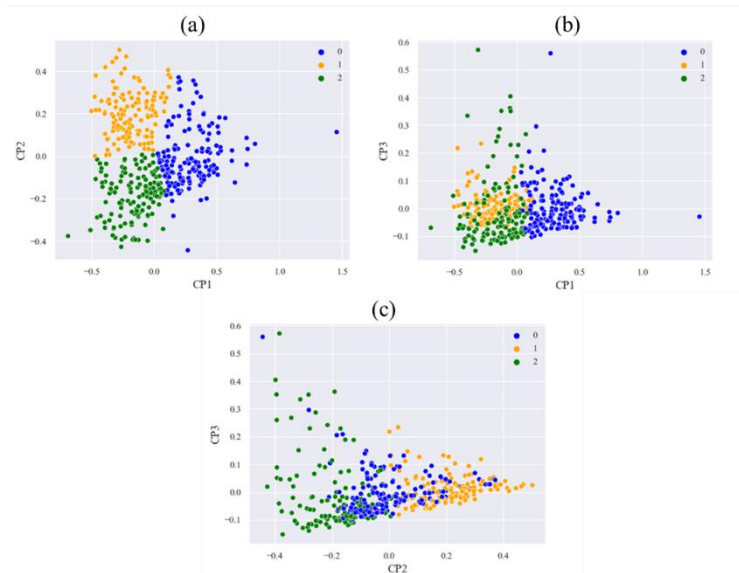


Figura 46. Resultados de clustering. Tolva SAG. (a): Vista componentes 1 y 2, (b): Vista componentes 1 y 3, (c): Vista componentes 2 y 3

A continuación, se muestran las estadísticas básicas de los tres clústers definidos para la Tolva SAG:

Tabla 12. Estadísticas básicas, Clúster 0, Tolva SAG

	Count	Mean	Std	Min	25%	50%	75%	Max
Calcopirita	161	0.429	0.128	0.140	0.335	0.409	0.504	0.806
Covelina	161	0.219	0.071	0.071	0.173	0.217	0.249	0.613
Calcosina	161	0.066	0.082	0.006	0.020	0.039	0.079	0.710
Pirita	161	1.025	0.171	0.774	0.893	1.016	1.129	1.971
Enargita	161	0.118	0.047	0.021	0.088	0.108	0.140	0.409
Blenda	161	0.076	0.025	0.025	0.059	0.074	0.089	0.194
Digenita	161	0.204	0.078	0.065	0.152	0.199	0.245	0.736

Tabla 13. Estadísticas básicas, Clúster 1, Tolva SAG

	Count	Mean	Std	Min	25%	50%	75%	Max
Calcopirita	129	0.800	0.112	0.559	0.723	0.783	0.865	1.108
Covelina	129	0.122	0.058	0.024	0.077	0.108	0.165	0.259
Calcosina	129	0.051	0.058	0.003	0.013	0.029	0.065	0.316
Pirita	129	0.694	0.141	0.397	0.586	0.679	0.802	1.034
Enargita	129	0.051	0.028	0.004	0.028	0.049	0.072	0.133
Blenda	129	0.037	0.020	0.009	0.021	0.032	0.049	0.112
Digenita	129	0.107	0.035	0.031	0.083	0.107	0.131	0.233

Tabla 14. Estadísticas básicas, Clúster 2, Tolva SAG

	Count	Mean	Std	Min	25%	50%	75%	Max
Calcopirita	133	0.434	0.099	0.248	0.362	0.418	0.511	0.699
Covelina	133	0.104	0.048	0.000	0.066	0.106	0.141	0.233
Calcosina	133	0.112	0.133	0.006	0.026	0.058	0.134	0.727
Pirita	133	0.569	0.148	0.032	0.457	0.578	0.693	0.812
Enargita	133	0.050	0.028	0.000	0.031	0.047	0.068	0.155
Blenda	133	0.044	0.022	0.000	0.028	0.043	0.059	0.116
Digenita	133	0.109	0.047	0.000	0.081	0.108	0.134	0.241

4.6.5 Factor de escalamiento según grupo mineralógico

Ya con los datos separados en clústers según su mineralogía, se procede a ver el efecto de estos grupos sobre el valor del Factor de escalamiento teórico, mostrados en la Figura 47

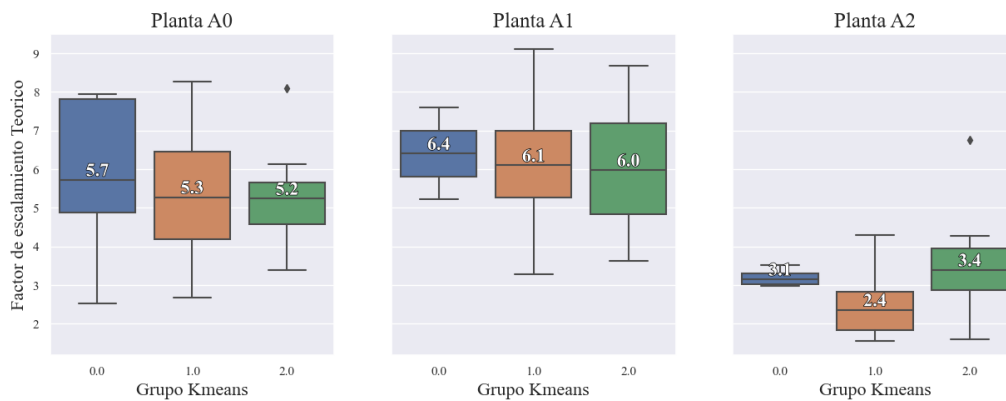


Figura 47. Factor de escalamiento teórico según grupo Kmeans

Se observa que en la planta A0 el grupo mineral 0 posee el mayor factor de escalamiento entre los tres grupos minerales, seguido del grupo 1 y 2. Esta tendencia se mantiene en la planta A1, con la diferencia de que, en general, los factores de escalamiento tienden a ser mayores en comparación con los de la planta A0. Por otra parte, en la planta A2 la tendencia cambia respecto de las otras dos plantas, siendo el factor de escalamiento mas alto el del grupo mineral 2, seguido del 1 y 0.

Las tendencias similares vistas entre la planta A0 y A1 pueden ser explicadas por el hecho de que ambas son alimentadas por la misma tolva (Convencional). Ahora, si bien los grupos minerales definidos para la Tolva Convencional poseen mineralogías similares a las de los grupos definidos para la Tolva SAG, las tendencias vistas para los factores de escalamiento de las plantas A0 y A1 no se replican en la planta A2, la cual es alimentada por mineral de otra tolva (SAG). Lo anterior

indica que, la diferencia en cuanto a tendencias podría deberse a factores distintos de la mineralogía de la pulpa con que se alimenta a las plantas.

Un estudio realizado por Paulina Vallejos (2022) señala que el factor de escalamiento depende también del tamaño de las partículas y grado de liberación del mineral. Tanto el mineral de la Tolva Convencional como SAG pasan por procesos distintos de molienda, cumpliendo con distintos estándares de tamaño y liberación, por lo que es de esperar que haya diferencias en las curvas granulométricas de ambas pulpas y, por ende, diferencias entre las tendencias de los factores de escalamiento, observados en la Figura 47. En este estudio solo se dispone del dato de porcentaje de mineral retenido en la malla #65, pero no de una curva granulométrica completa para las pulpas, por lo que este análisis no puede ser realizado de manera significativa.

5. Conclusiones

El presente trabajo logra determinar un factor de escalamiento nuevo para cada una de las plantas de flotación de División Chuquicamata, que resultan ser más precisos a la hora de comparar los resultados de recuperación obtenidos en laboratorio con los obtenidos en planta, esto en comparación al método utilizado actualmente, que solo compara los resultados obtenidos en planta con los obtenidos a los 7.5 minutos de flotación en laboratorio.

Los datos recopilados en este estudio fueron filtrados de acuerdo a criterios utilizados actualmente por las plantas operacionales, esto con el fin de reunir únicamente datos de días en donde las distintas plantas operaron en condiciones óptimas y fueron alimentadas de pulpas con buenas condiciones para llevar a cabo el proceso de flotación.

Los datos filtrados permitieron calcular el tiempo de residencia de la pulpa para cada uno de los distintos circuitos de flotación, obteniendo medianas de 31.2, 35.8 y 20.9 minutos para las plantas A0, A1 y A2, respectivamente.

A partir de los tiempos de residencia y las curvas de cinética de flotación calculadas a partir de los ensayos de laboratorio, se calculan factores de escalamiento para cada una de las plantas. Haciendo uso de la Raíz del Error Cuadrático Medio como métrica de precisión, se estima que los factores de escalamiento más efectivos a la hora de escalar los resultados de laboratorio a planta son 5.1, 5.6 y 3.2 para las plantas A0, A1 y A2, respectivamente. Estos valores presentan un RECM más bajo del que se obtiene al escalar los resultados usando como método de escalamiento el comparar los resultados de flotación de planta con los obtenidos en laboratorio al minuto 7.5.

Con respecto al efecto que posee la mineralogía sobre el factor de escalamiento, luego de clasificar las pulpas que alimentan a cada planta en distintos grupos mediante el algoritmo k-means, se concluye que la relación existente entre mineralogía y factor de escalamiento se conserva en las plantas A0 y A1, que son alimentadas con la misma pulpa, pero esta relación no se observa en la planta A2, que posee tendencias distintas a la de las demás plantas. Se recomienda complementar este análisis con datos de granulometría de la pulpa, con el fin de saber si esta variable tiene incidencia sobre el factor de escalamiento y, de ser así, cuantificar este efecto.

6. Referencias

- Aleksi Peltola, A. R. (2008). On lifetime costs of flotation operations. *Minerals Engineering* 21, 846-850.
- Ata, S. (2012). Phenomena in the froth phase of flotation - A review. *International Journal of Mineral Processing* 102-103, 1-12.
- Diego Mesa, P. R.-P. (2019). Scale-up in froth flotation: A state-of-the-art review. *Separation and Purification Technology* 210, 950-962.
- Erico Tabosa, K. R. (2016). The effect of cell hydrodynamics on flotation performance. *International Journal of Mineral Processing* 156, 99-107.
- J. Yianatos, & P. Vallejos. (2022). A scale-up approach for industrial flotation cells based on particle size and liberation data. *Minerals Engineering* Vol. 184.
- LIU, J. (2013). Flow velocity measurement and analysis based on froth image SIFT features and Kalmna filter for froth flotation. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2378-2396.
- Matamoros, C. (2018). *Evaluación de características de transporte de espuma en celdas de flotación*.
- Saeed, M. (2021). *Exploring effects of hydrodynamic flotation variables on their respective metallurgical responses through laboratory scaling up*.
- Urra, E. (2016). *Adición de un nuevo colector en el banco de flotación primaria - Cuantificación contextual del mejoramiento potencial en el desempeño de la flotación en las concentradoras "Laguna seca" y "Los Colorados"*.
- Wills, B. A. (2006). *Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Seventh Edition*. Elsevier Science & Technology Books.
- Xie, G. (2016). Kinetics of flotation. Order of process, rate constant distribution and ultimate recovery.
- Yianatos, J. (2005). *Flotación de minerales*.