



Escuela de
**Ingeniería
Química**

**TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN METALURGIA EXTRACTIVA**

**OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ESPESADOR:
INTEGRACIÓN DE SUS PARÁMETROS OPERATIVOS Y DE DISEÑO**

**Candidatos: Alexandra Camila Quilodran Barria
Fernanda Patricia Flores Henríquez**

Profesor guía: Freddy Lucay

Valparaíso, diciembre 2024

Queremos expresar nuestro más sincero y profundo agradecimiento a la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso ya la Escuela de Ingeniería Química, por brindarnos las herramientas y el conocimiento que hicieron posible la realización de esta tesis. Gracias por ser el pilar académico que nos acompañó en este camino.

A nuestro director de tesis, Freddy Lucay, queremos agradecerle de corazón por su guía inigualable, su paciencia y dedicación constante. Su apoyo nos dio la confianza y claridad necesarias para superar cada desafío.

A José Retamal, Ingeniero Civil Metalúrgico, por su generosa contribución técnica y por hacer de este proceso una experiencia enriquecedora, llena de aprendizajes que llevaremos siempre con nosotros.

A nuestros profesores de metalurgia, quienes nos acompañaron a lo largo de estos años con su sabiduría y dedicación, dejando en nosotros no solo conocimiento, sino también un ejemplo de esfuerzo y pasión por la ingeniería.

- *Fernanda Flores*

Quiero agradecer a mis padres Lorena Henríquez y Fernando Flores, hermano Julián Flores y a mi pareja Kevin Galleguillos, por su apoyo incondicional, amor y comprensión durante los momentos más difíciles.

Finalmente, a mis amigos cercanos y colegas que me animaron y brindaron su ayuda, mi más sincero agradecimiento.

- *Alexandra Quilodran*

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, Alexander y Sandra, por su apoyo incondicional durante todos estos años. Gracias a ustedes, hoy puedo cerrar esta etapa tan importante de mi vida. A mis hermanas, Constanza y Karla, por su amor, comprensión y constante apoyo, siempre fueron mi refugio en los momentos difíciles.

A mis compañeros y amigos que conocí a lo largo de estos años, gracias por permitirme ser yo misma, por su cariño y por hacer este viaje una experiencia maravillosa. Me llevo recuerdos invaluable que siempre estarán conmigo. Les deseo todo el éxito del mundo a mis futuros colegas.

A mis amigos de la vida: Valentina, Javiera, Paula y Claudio. Gracias por estar siempre, por dedicarme tiempo, por sus palabras de aliento, que fueron fundamentales en esta etapa. Su fe en mí me dio la fuerza para seguir adelante. Los quiero mucho.

Por último, quiero dedicar unas palabras a Diego. Llegaste a mi vida de forma inesperada y te convertiste en una hermosa coincidencia. Gracias por creer en mí y en todo lo que soy capaz de lograr. Eres un ejemplo inspirador de que, con esfuerzo y determinación, los sueños se pueden lograr. Te deseo todo el éxito en la vida.

Hoy cerramos esta etapa con el corazón lleno de gratitud y alegría. Nos sentimos profundamente felices de haber alcanzado esta meta, sabiendo que todo el esfuerzo, cada desafío y cada momento compartido han valido la pena. ¡Gracias a todos los que formaron parte de este hermoso viaje!

RESUMEN

La recuperación de agua en la industria minera es un proceso crucial para gestionar los recursos hídricos de manera eficiente y sostenible. Este proyecto se centra en el diseño e implementación de un equipo de sedimentación a escala de laboratorio, específicamente un espesador, para mejorar la eficiencia de este proceso. La sedimentación utiliza la gravedad para aumentar la concentración de sólidos y recuperar el líquido sobrenadante, un proceso que puede variar según el diseño y los equipos empleados. El proyecto comenzará con la caracterización del mineral para comprender su composición mineralógica, seguida de pruebas preliminares para determinar los parámetros óptimos para la recuperación de sólidos. Se procederá al diseño y la impresión 3D del espesador, realizando pruebas piloto para optimizar el proceso de sedimentación y asegurar un funcionamiento eficiente del equipo. Este estudio utilizará diversas fuentes bibliográficas, análisis y pruebas experimentales para establecer los parámetros más efectivos, buscando contribuir al desarrollo de tecnologías sostenibles en el manejo de agua en la minería.

Palabras clave: espesador, optimizar, impresión 3D.

ABSTRACT

Water recovery in the mining industry is a crucial process for managing water resources efficiently and sustainably. This project focuses on the design and implementation of a laboratory-scale sedimentation device, specifically a thickener, to improve the efficiency of this process. Sedimentation uses gravity to increase the concentration of solids and recover the supernatant liquid, a process that can vary depending on the design and equipment used. The project will begin with the characterization of the ore to understand its mineralogical composition, followed by preliminary tests to determine the optimal parameters for solids recovery. The design and 3D printing of the thickener will then proceed, along with pilot tests to optimize the sedimentation process and ensure the efficient operation of the equipment. This study will utilize various bibliographic sources, analyses, and experimental tests to establish the most effective parameters, aiming to contribute to the development of sustainable technologies in water management within the mining industry.

Keywords: thickener, optimize, 3D printing.

Optimization of Thickener Performance: Integration of Operational and Design Parameters

1. Contenido

RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
1. CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
NOMENCLATURAS	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	2
1.3. ESTADO DEL ARTE	3
1.4. HIPÓTESIS	9
1.5. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	9
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	9
2. MARCO REFERENCIAL	10
2.1. MINERÍA EN CHILE Y PROCESAMIENTO DE MINERALES	10
2.2. SEDIMENTACIÓN	10
2.3.1. <i>Curva de sedimentación</i>	11
2.4. MÉTODO DE DISEÑO DE ESPESADORES	12
2.5. EQUIPOS.....	13
2.5.1. <i>Clasificación de equipos</i>	13
2.6. APLICACIÓN DE SEDIMENTACION	16
2.7. IMPRESIÓN 3D	16
2.7.1. <i>Métodos de impresión 3D</i>	16
2.7.2. <i>Software para diseño 3D</i>	17
2.8. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DoE)	17
2.9. MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA (RSM)	18
3. METODOLOGÍA.....	19
3.1. DISEÑO SEDIMENTADOR	19
3.1.1. <i>Caracterización del mineral</i>	19

3.1.2.	<i>Análisis granulométrico</i>	19
3.1.3.	<i>Análisis de digestión ácida</i>	20
3.1.4.	<i>Análisis de difracción de rayos X (DRX)</i>	21
3.1.5.	<i>Preparación floculante SUPERFLOC A-110</i>	21
3.1.6.	<i>Ensayos de sedimentación</i>	22
3.2.	PROTOTIPO	23
3.2.1.	<i>Diseño e impresión 3D</i>	23
3.3.	OPTIMIZACIÓN	24
3.3.1.	<i>Pruebas operacionales</i>	24
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	26
4.1.	CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE	26
4.1.1.	<i>Análisis granulométrico</i>	26
4.1.2.	<i>Análisis de digestión ácida</i>	28
4.1.3.	<i>Análisis de Difracción de Rayos X</i>	29
4.2.	ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN	31
4.3.	DISEÑO E IMPRESIÓN DEL EQUIPO	33
4.4.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DoE)	35
4.5.	PRUEBAS OPERACIONALES	37
4.6.	METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA	42
4.7.	ANÁLISIS DE COSTOS	49
5.	CONCLUSIONES	51
6.	RECOMENDACIONES O SUGERENCIAS	53
7.	BIBLIOGRAFÍA	55
8.	ANEXOS	- 1 -

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 ZONAS DE SEDIMENTACIÓN EN UN ESPESADOR INDUSTRIAL. RECUPERADO DE HTTP://OPAC.PUCV.CL/PUCV_TXT/TXT-5500/UCF5592_01.PDF	11
FIGURA 2.2 SEDIMENTADOR DE ALTA DENSIDAD. RECUPERADO DE HTTPS://PAPERS.ACG.UWA.EDU.AU/P/1104_02_SCHOENBRUNN	14
FIGURA 2.3 SEDIMENTADOR DE ALTA CAPACIDAD. RECUPERADO DE HTTPS://WWW.FLSMIDTH.COM/-/MEDIA/BROCHURES/BROCHURES-PRODUCTS/THICKENING/THICKENERS-AND-CLARIFIERS_BROCHURE_ES.PDF	14
FIGURA 2.4 SEDIMENTADOR CONVENCIONAL CON PUENTE. RECUPERADO DE HTTPS://WWW.FLSMIDTH.COM/-/MEDIA/BROCHURES/BROCHURES-PRODUCTS/THICKENING/THICKENERS-AND-CLARIFIERS_BROCHURE_ES.PDF	15
FIGURA 2.5 CLARIFICADOR. RECUPERADO DE HTTPS://WWW.FLSMIDTH.COM/-/MEDIA/BROCHURES/BROCHURES-PRODUCTS/THICKENING/THICKENERS-AND-CLARIFIERS_BROCHURE_ES.PDF	16
FIGURA 3.1 METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA.	19
FIGURA 3.2 DISPOSICIÓN DE TAMICES RO-TOAP. ELABORACIÓN PROPIA.	20
FIGURA 3.3 ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA.	23
FIGURA 3.4 DISTRIBUCIÓN EN LA TOMA DE MUESTRAS. ELABORACIÓN PROPIA.	25
FIGURA 4.1 CURVA GRANULOMÉTRICA. ELABORACIÓN PROPIA.	27
FIGURA 4.2 MUESTRA UTILIZADA PARA EL ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X. ELABORACIÓN PROPIA.	29
FIGURA 4.3 RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS X. ELABORACIÓN PROPIA.	30
FIGURA 4.4 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DEL RELAVE. ELABORACIÓN PROPIA.	31
FIGURA 4.5 PROYECCIÓN DIGITAL DEL CLARIFICADOR 3D. ELABORACIÓN PROPIA.	33
FIGURA 4.6 CLARIFICADOR 1 IMPRESO EN 3D. ELABORACIÓN PROPIA.	34
FIGURA 4.7 CLARIFICADOR 2 IMPRESO EN 3D. ELABORACIÓN PROPIA.	35
FIGURA 4.8 DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS EN DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE). ELABORACIÓN PROPIA.	36
FIGURA 4.9 GRÁFICO DE RESPUESTA TRIDIMENSIONAL DE LA MUESTRA R1. ELABORACIÓN PROPIA.	43
FIGURA 4.10 SUPERFICIE DE RESPUESTA EN 3D DE LA MUESTRA R1. ELABORACIÓN PROPIA.	43
FIGURA 4.11 GRÁFICO DE RESPUESTA TRIDIMENSIONAL DE LA MUESTRA R2. ELABORACIÓN PROPIA.	45
FIGURA 4.12 SUPERFICIE DE RESPUESTA EN 3D DE LA MUESTRA R2. ELABORACIÓN PROPIA.	45
FIGURA 4.13 DIAGRAMA DE PARETO R1. ELABORACIÓN PROPIA.	46
FIGURA 4.14 DIAGRAMA DE PARETO R2. ELABORACIÓN PROPIA.	47

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1 TAMICES UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS GRANULOMETRICO DEL RELAVE. ELABORACIÓN PROPIA.....	20
TABLA 4.1 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS. ELABORACIÓN PROPIA.....	26
TABLA 4.2 RESULTADOS ABSORCIÓN ATÓMICA. ELABORACIÓN PROPIA.	28
TABLA 4.3 RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X. ELABORACIÓN PROPIA.	29
TABLA 4.4 DISEÑOS DE EXPERIMENTOS DoE. ELABORACIÓN PROPIA.....	36
TABLA 4.5 PRUEBAS DE DISEÑO DE EQUIPO PILOTO 3D. ELABORACIÓN PROPIA.	38
TABLA 4.6 RESULTADOS PRUEBAS OPERACIONALES. ELABORACIÓN PROPIA.....	39
TABLA 4.7 VALORES OBTENIDOS EN SUPERFICIE DE RESPUESTA R1. ELABORACIÓN PROPIA.....	44
TABLA 4.8 VALORES OBTENIDOS EN SUPERFICIE DE RESPUESTA R2. ELABORACIÓN PROPIA.....	46
TABLA 4.9 COSTOS DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO. ELABORACIÓN PROPIA.	49
TABLA 8.1 DATOS PARA PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN CON 0.2 Cp. ELABORACIÓN PROPIA.	A-1
TABLA 8.2 DATOS PARA PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN CON 0.3 Cp. ELABORACIÓN PROPIA.	A-1
TABLA 8.3 DATOS PARA PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN CON 0.4 Cp. ELABORACIÓN PROPIA.	A-1
TABLA 8.4 ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN CON 0.2.ELABORACIÓN PROPIA.	A-2
TABLA 8.5 ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN CON 0.3. ELABORACIÓN PROPIA.....	A-2
TABLA 8.6 ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN CON 0.4. ELABORACIÓN PROPIA.....	A-3
TABLA 8.7 PARÁMETROS DE LOS ENSAYOS OPERACIONALES. ELABORACIÓN PROPIA.....	A-3

NOMENCLATURAS

Abreviatura	Significado	Traducción
CFD	Computational Fluid Dynamics	Dinámica de fluidos computacional
CDF-DEM	Computational Fluid Dynamics and Discrete Element Method	Dinámica de fluidos computacionales y métodos de elementos discretos
DoE	Diseño de experimentos	-
RSM	Response Surface Methodology	Método de superficie de respuesta
Rpm	Revoluciones por minuto	-
Cp	Concentración de sólidos	-
DRX	Difracción de rayos x	-
PLA	Filamentos de ácido poliláctico	

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el agua es un recurso vital tanto a nivel social como industrial. En la industria minera, la recirculación del agua cobra una importancia aún mayor en un escenario de estrés hídrico, ya que gran parte del procesamiento de minerales se realiza en forma de pulpa. Para enfrentar este desafío, la sedimentación se presenta como un proceso fundamental, ya que permite separar los sólidos de los líquidos, facilitando la recirculación y reutilización del agua en la cadena productiva del cobre.

El proceso metalúrgico comienza con la etapa de conminución, donde se reduce el tamaño del mineral extraído de la mina con el fin de liberar las partículas de metal valioso. Posteriormente, en la etapa de clasificación, las partículas se separan según su tamaño antes de pasar por la etapa de flotación, donde se busca aumentar la concentración de dicho metal mediante burbujas de aire en un medio acuoso. De aquí se obtiene una cola la cual es una mezcla de mineral estéril con alta proporción de agua, que se envía a la etapa de sedimentación, donde se separa los sólidos de los líquidos con el objetivo de recuperar la mayor cantidad de agua posible.

En los últimos años el rendimiento de sedimentación ha disminuido debido a la explotación de yacimientos más complejos, que generan minerales blandos que producen partículas ultrafinas en la conminución. Estas partículas sedimentan lentamente, lo que afecta negativamente la tasa de recirculación del agua. Para contrarrestar este efecto, es necesario emplear reactivos como floculantes y coagulantes. Además, la concentración de sólidos en las colas y la velocidad del rastrillo en los sedimentadores influyen significativamente en la recirculación del agua, ya que afectan la suspensión de estas partículas ultrafinas.

La alta presencia de material ultrafino en la recirculación impacta de manera adversa los procesos metalúrgicos, ya que reduce el volumen efectivo de los equipos, aumenta el consumo de reactivos en la flotación y modifica las propiedades reológicas de las pulpas. Todo lo anterior evidencia que la optimización del proceso de sedimentación representa un desafío significativo, cuya superación podría contribuir a la sostenibilidad de la industria minera mediante una gestión más eficiente del agua y la reducción de costos operacionales.

1.1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Es fundamental enfocar los esfuerzos en mejorar el rendimiento de los procesos de sedimentación en la industria minera, especialmente debido al incremento de las partículas ultrafinas resultantes de minerales más complejos y la necesidad de recircular agua en un escenario de estrés hídrico. Este proyecto se centrará en analizar factores que impactan en la sedimentación, especialmente en el contexto de la recirculación de agua, y en proponer estrategias para optimizar este proceso mediante el ajuste de parámetros operativos claves como: la concentración de sólidos en las colas, la velocidad del rastrillo en el sedimentador y la dosificación de floculantes.

1.2. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

La sedimentación juega un rol importante en la recirculación del agua. Sin embargo, es crucial mencionar los problemas que pueden surgir en el proceso. Uno de ellos es la generación de partículas ultrafinas, que sedimentan lentamente y requieren la adición de reactivos como floculantes y coagulantes. Esto eleva los costos en las operaciones y potencialmente podría mejorar la sostenibilidad en la industria minera. Identificar las dosis óptimas de estos reactivos y diseñar un sedimentador que refleje las condiciones industriales permitirá mejorar la eficiencia del proceso.

En este proyecto se utilizó relave obtenido de la planta concentradora Black Colt, ubicada en el sector Los Comunes, provincia de Petorca, en la región de Valparaíso.

Optimizar el proceso de sedimentación es muy importante en la industria minera, ya que impacta directamente en la eficiencia operativa y el manejo sostenible del agua. Este proyecto justifica su importancia buscando soluciones que mejoren su eficiencia operativa. La implementación de un equipo de sedimentación fabricado por impresión 3D permite desarrollar prototipos de espesadores a pequeña escala, lo que facilita la realización de pruebas experimentales controladas y la rápida iteración de diseños. Esto ofrece una ventaja significativa en términos de costo y tiempo frente a métodos de fabricación tradicionales. Además, el uso de técnicas de optimización representa una oportunidad para mejorar la eficiencia del proceso, reducir costos y contribuir al desarrollo sostenible de la industria.

Este proyecto se centrará en el diseño, implementación y optimización de un espesador a escala de laboratorio utilizando la tecnología de impresión 3D como una herramienta clave para replicar de manera precisa un equipo similar al que se emplea en la industria. Incluye la caracterización del mineral, pruebas experimentales y el desarrollo de un modelo de optimización para mejorar la

recuperación de sólidos y la eficiencia del proceso de sedimentación. Aunque este estudio se realiza a escala de laboratorio, los resultados pueden ser escalados y aplicados a operaciones a mayor escala en la industria minera.

1.3. ESTADO DEL ARTE

Debido a la escasez de recursos hídricos la adopción del reciclaje de agua en la industria minera surge como una solución fundamental para conservar el agua y establecer concentradores de cero emisiones. No obstante, esta medida puede generar repercusiones significativas en el rendimiento y mantenimiento de las concentradoras debido a las variaciones en la calidad del agua de proceso. Además de reducir los costos operativos, el reciclaje de agua desempeña un papel crucial en la disminución del riesgo de contaminación y los impactos ambientales (Le, Mäkelä, Schreithofer, & Dahl, 2020).

Para satisfacer estas demandas, las empresas mineras a nivel mundial están comenzando a implementar soluciones tecnológicas que se centran en la reutilización del agua en circuitos internos. Un procedimiento estándar utilizado en las plantas de procesamiento de minerales es la recirculación del agua directamente desde las operaciones de espesamiento y filtración al proceso. El desarrollo continuo de la tecnología para la recuperación de aguas de proceso a partir de relaves debe ser objeto de un análisis más amplio en cuanto a los parámetros de calidad del agua obtenida en estos procesos (Witecki, Polowczyk, & Kowalczyk, 2022).

Una investigación dentro del área operacional postuló una evaluación reológica donde se propuso un modelo matemático que estableció una relación entre los parámetros de circulación y la concentración final en el flujo inferior, así como el límite elástico. Mediante experimentos de espesamiento y circulación a escala de laboratorio se comprobó la eficacia de las unidades de circulación para regular el contenido de sólidos como también las propiedades reológicas del flujo inferior. Con esto se observó que, al aumentar la altura de la circulación y el caudal, se produce una disminución en el contenido de sólidos, se sugirió realizar más experimentos y pruebas de campo para poder mejorar la eficiencia y el rendimiento del equipo (Li, et al., 2021).

En la industria se encuentran distintos tipos de espesadores, uno de ellos son los de alta densidad. Se han realizado diversos estudios en estos espesadores en uno de ellos se determinó que la tecnología de pastas y relaves espesados (PTT) presenta ventajas como la conservación de agua, la seguridad de las presas y el cuidado en el medio ambiente. Durante el proceso de preparación y

espesamiento, las partículas ultrafinas de relaves tienden a aglomerarse en flóculos suspendidos, obstruyendo el flujo de agua y afectando la concentración en el espesador. En este estudio operacional se utilizó tecnología de tomografía computarizada para mejorar la densidad del flujo en un espesador cónico profundo. Se encontró que, manteniendo la velocidad del rastrillo a 2 rpm, la concentración de relaves aumentó significativamente. Sin embargo, se necesitan más experimentos a gran escala para comprender mejor la filtración del agua en la estructura porosa de los flóculos y el mecanismo de deshidratación (Jiao, Wu, Wang, Chen, Li, et al., 2021). Otra visión en la extensión operacional de sedimentación fue la conectividad de poros y mecanismo de deshidratación de lecho de relaves en el proceso de espesamiento de cono profundo con rastrillo. El análisis mediante el comportamiento de partículas porosas se ve satisfactorio donde representa una eficiencia en el proceso de sedimentación e incluso en la liberación del agua encapsulada además del dimensionamiento representativo que se plantea en el proyecto. Se queda un vacío en la posibilidad de si existe el mismo comportamiento al someterlo a un espesador piloto, dado que no cumple con la estructura adecuada o recomendada el rastrillo, por lo que el movimiento centrífuga no podría representarse como el espaciador para homogeneizar el suelo del concentrado sólido (Chen, Jin, Jiao, Yang, & Liu, 2020). Siguiendo con los espesadores de alta densidad se realizó un experimento a modo de laboratorio donde se utilizó la simulación CDF (Dinámica de fluidos computacional) del espesamiento de lechadas de relave del espesador, este modelo era de 120 litros, con un tanque cónico, un pozo de alimentación y cuatro rastrillos que se mueven a una velocidad de 10 rpm. El pozo de alimentación es esencial para disipar la energía cinética del flujo de entrada, promoviendo la mezcla y la dilución de sustancias para una floculación eficaz. El espesamiento optimo implica un flujo suave y una baja energía cinética en el cuerpo del espesador. Sin embargo, para maximizar el rendimiento, a veces es necesario aumentar el flujo, lo que resulta en una mayor energía cinética que debe ser disipada. Si la velocidad de alimentación es demasiado alta, el tiempo de residencia de la corriente de alimentación se reduce, lo que afecta negativamente la disipación de energía y el rendimiento del espesador (Wang et al., 2021). No obstante, este estudio operacional no presenta las características específicas del mineral a tratar, por lo que es posible seguir optimizando este proceso. Un estudio similar enfocado en un modelo 3D CDF-DEM (Dinámica de fluidos computacionales y métodos de elementos discretos) describe con precisión la generación de revoque durante la separación solido-liquido. A pesar de ser innovador por su modelación en 3D solo se enfocó en la generación de torta en el proceso de sedimentación dentro de un estanque de espesamiento, quedando con la incertidumbre de los resultados que se podrán obtener al someter

dicho modelo en los procesos de relave o también la inyección de precisión para la velocidad de sedimentación para obtener unos resultados más eficientes en la recuperación de agua (Puderbach, Schmidt, & Antonyuk, 2021).

Los relaves floculados son residuos sólidos de minerales o partículas ultrafinas que se han aglomerado en forma de flóculos suspendidos en agua durante el proceso de preparación y espesamiento en la industria minera. Estos flóculos pueden causar obstrucciones en el flujo de agua y pueden ser perjudiciales para la mejora de la concentración en un espesador. La floculación es un proceso utilizado para agrupar partículas finas en flóculos más grandes, lo que facilita su separación del agua y su posterior tratamiento o disposición. Con respecto a esto se han realizado distintos análisis e investigaciones. Se estudió el efecto de los floculantes residuales en el agua circulante sobre la deshidratación del mineral de hierro de Gol-e-Gohar. Este proceso analizó cuatro parámetros clave, incluido el contenido de sólidos, el pH, el tipo de floculante y sus dosis, en el espesante de mineral de hierro, aunque tuvo excelentes resultados con la dosis exacta de floculante para evitar residuos en el agua circulante si presenta una limitación como proyecto en el mineral que se trató dejando una gran incertidumbre en el comportamiento que tendría este proceso en presencia de otro tipo de mineral (Bahmani-Ghaedi, Hassanzadeh, Sam, & Entezari-Zarandi, 2022).

Se postulo también un modelado dinámico y de simulación de unidades de espesamiento de relaves para el desarrollo de estrategias de control con la intención de analizar la dinámica de una suspensión floculada en un clarificador-espesador para tener como variables controladas el límite elástico de descarga y la distribución del tamaño de partículas. A pesar de que el modelo matemático presenta un sistema dinámico completo incluyendo la reología y sedimentación de relaves este presenta ciertas limitaciones investigativas en la práctica, debido a que no se logró demostrar de manera experimental la eficiencia que tendría dicho modelo (Yuan, Hu, Wu, & Ban, 2020).

También se realizaron investigaciones enfocadas en examinar las propiedades de floculación, sedimentación y espesamiento de los residuos en un espesador de cono profundo. Se empleó la simulación de dinámica de fluidos computacional para analizar la distribución de tamaños de partículas y la concentración del sub-flujo en el mencionado espesador. Se llevaron a cabo análisis para evaluar cómo la velocidad de rotación del rastrillo, la velocidad de alimentación y la concentración de lodo de los residuos afectan estos procesos. Esto permitió determinar los parámetros óptimos clave en cuanto a floculación, sedimentación y espesamiento de los residuos en

el espesador de cono, que resultaron en una velocidad de rotación del rastrillo de 17 r/min, una velocidad de alimentación de 3,25 m³/h y una concentración de lechada de residuos del 20% (Wu et al., 2019). Sin embargo, es importante señalar que, al igual que en investigaciones previas, no se realizó una caracterización del mineral a procesar en el espesador. Esto es relevante porque el contenido de agua en el mineral desempeña un papel crítico en estos procesos. La caracterización proporciona información sobre el contenido inicial de agua en el mineral y permite evaluar si es necesario deshidratar el mineral antes de introducirlo en el espesador ajustando el pH de la solución y la dosis de floculante [(Arjmand, Massinaei, & Behnamfard, 2019).

Por otra parte, se investigó el comportamiento que presentaban diferentes tipos de floculantes con el mineral presente en la minera “*BlackColt*” siendo el más eficiente el SUPERFLOC A-110 en una dosificación de 20 ml a modo experimental, sin embargo, carece de información en la prueba industrial.(P. Aravena Toloza & A. Hernández Muñoz, 2023).

Con respecto a la búsqueda de optimización en la etapa de espesamiento se han generado diferentes investigaciones que involucran parámetros como por ejemplo, se analizó el efecto de la dilución de la alimentación sobre el rendimiento del espesador para relaves de flotación de cobre, pero a pesar de enfocar su investigación en mejorar el rendimiento del espesador generando un menor consumo de floculante y un mayor flujo de sedimentación presenta ineficiencia en el proceso debido a que este proceso no se puede utilizar para todo tipo de material, excluye relaves que generen el tratamiento de separación magnética de hierro o el proceso de flotar carbón debido a su baja concentración de sólidos (Garmsiri & Nosrati, 2019).

Así mismo se estudió la optimización quimio-métrica de un proceso de floculación de relaves de sulfuro de cobre en presencia de arcillas donde se presenta el comportamiento del espesamiento en presencia de minerales no valiosos finos y refinos además del reciclaje incompleto de agua. A pesar de estudiar la mineralogía determinada por difracción de rayos X, distribución de tamaño e incluso determinar el tipo y dosis de floculante presenta cierta debilidad en la manera en la cual se ejecutó el proyecto de manera piloto, el vaso de precipitado no es representativo para el proceso de espesamiento, el rastrillo fue reemplazado por aspas metálicas que no logran abarcar toda la zona que sedimenta, generando ciertos errores en la distribución de concentrado sólido en el inferior de dicho vaso (Castillo, Ihle, & Jeldres, 2019).

Retomando las propiedades de floculación se realizó un análisis que se enfocó en mejorar la eficiencia de sedimentación de relaves floculados sin clasificar, optimizando la colisión de la partícula en el pozo de alimentación. Presente a la motivación de querer reducir la adición de floculante y generar una mayor eficiencia de costos de producción presenta ciertos vacíos debido a su desarrollo de manera piloto en un tubo vertical insertando en su interior unas aspas cuadradas con un ángulo de 90° no logrando ser un análisis operacional concreto del proceso debido a que el tipo de equipo no es representativo de una celda de espesamiento como también el tipo de rastrillo que utilizan ya que tiene un trabajo de agitación y no uno de espaciamiento o emparejamiento del concentrado de sólido además presenta un cierto ángulo con respecto al suelo del estanque del espesamiento (Jiao et al., 2022). Con respecto al bloqueo de rastrillos en un estudio a una mina de plomo y zinc en China, demostraron que tanto la densidad del lecho, el coeficiente de fricción entre la interacción lecho-pared del cono, velocidad de rotación (torque) y el ángulo del cono son los factores primordiales que influyen la potencia motriz del rastrillo, el estudio investigó dado un modelamiento e incluso ejecutado a nivel industrial para determinar dichas observaciones pero dejando de lado variables como presencia del floculante, coagulante, flujo de alimentación y el agua clarificada para obtener así una optimización de todo el sistema del equipo de espesamiento (Ruan, Wang, Wu, Yin, & Jin, 2019).

También otras opciones de parámetros operacionales postularon sobre el mecanismo a microescala de filtración de agua sellada y espesamiento de lecho de relaves en espesador cortado con rastrillo. Este tipo de proceso investiga qué cantidad de agua atrapada está directamente influenciada por la tasa de floculación y el tamaño de los flóculos, pero presentando las mismas ineficiencias representativas del equipo de espesamiento que el estudio presentado anteriormente (Jiao, Wu, Wang, Chen, Wang, et al., 2021).

Se realizó un estudio de estrategia integral del análisis de un espesamiento, que nos dice que, al poder ajustar las simulaciones, se abre la posibilidad de mejorar el proceso al tener en cuenta la complejidad de las muestras en el plan de explotación. Esto brinda al operador la capacidad de tomar decisiones fundamentadas para evitar problemas como el atasco del espesador, el daño a los brazos de los rastrillos debido a un alto torque, la concentración insuficiente de sólidos en el flujo y la superación del límite elástico en el flujo. No obstante, no se señala con exactitud cómo fueron las pruebas experimentales de laboratorio (Ruiz, Montes-Quiroz, & Andrade Corbalan, 2021).

En el proceso de sedimentación no solo es importante conocer las cantidades de floculantes a utilizar o el tipo de este, también debemos conocer el tipo de dispersante ya que es fundamental para evitar que las partículas se aglomeren y se sedimenten, manteniéndolas en suspensión de manera uniforme en el líquido. HJ Haselhuhn y SK Kawatra focalizaron su investigación en un parámetro de diseño donde llevaron a cabo la concepción y construcción de un espesador de lodo continuo a escala piloto. Este diseño se estructuró en un tanque de alimentación mixto, una columna y dos bombas peristálticas. Se evaluaron seis dispersantes distintos, revelándose que 60 el silicato de sodio no demostró eficacia. En contraste, el henicosapolifosfato de sodio mostró la curva más favorable de grado en función de la recuperación, especialmente en el caso del hierro. Los dispersantes desempeñan un papel crítico en los procesos de sedimentación, ya que mejoran la separación entre sólidos y líquidos, aumentan la eficiencia del espesador y optimizan las características reológicas de la pulpa. Por esta razón, es esencial determinar con precisión qué tipo de dispersante resultará más eficaz al llevar a cabo un procedimiento de sedimentación (Haselhuhn & Kawatra, 2017).

De tal manera conocer el mantenimiento operacional de los espesadores es de vital importancia, por esto Jari Ruuska desarrollo un análisis de datos para un espesante de pasta de una industria específica para identificar los factores que influyen en estos fenómenos. Cabe señalar que no se especifica características del agua que queda en el clarificador (Ruuska et al., 2020).

Con todos los antecedentes recopilados podemos decir que diversas investigaciones han buscado mejorar la sedimentación y deshidratación de relaves mediante tecnologías como ultrasonidos, tomografía computarizada y modelos matemáticos. Sin embargo, muchos estudios carecen de representatividad en equipos reales de espesamiento, lo que genera incertidumbre en su aplicabilidad.

Se han explorado por una parte modelos de simulación y técnicas de floculación e incluso proyectar y construir diferentes diseños de espesadores para optimizar el proceso de sedimentación, pero la falta de caracterización mineral limita su generalización. Los estudios también han analizado la influencia de variables como pH, tipo y dosis de floculante y velocidad de rotación del rastrillo en la eficiencia del espesamiento. Aunque estos métodos muestran mejoras, su aplicabilidad practica aun requiere validación en equipos con condiciones representativas. Además, se ha estudiado el efecto de dispersantes en la sedimentación, destacando su importancia en la separación de sólidos y líquidos, pero debido a la gran variedad de minerales presentes suelen dificultar su eficiencia.

En general, las investigaciones buscan mejorar la eficiencia de los espesadores, enfocándose tanto en los parámetros de diseño como en los operacionales para reducir las pérdidas hídricas. Esto resulta en un beneficio en la reducción del impacto ambiental, pero la validación del equipo en condiciones reales y la consideración de la variabilidad mineralógicas son pasos críticos para su implementación efectiva, aspectos que han sido poco abordados, dejando una brecha en el conocimiento existente.

1.4. HIPÓTESIS

Se optimizará operacionalmente el proceso de sedimentación por medio de la metodología de superficie de respuesta.

1.5. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.5.1. Objetivo General

Optimizar la concentración de sólidos en la descarga de sedimentación mediante la integración de un prototipo impreso en 3D y la metodología de superficie de respuesta.

1.5.2. Objetivos Específicos

Caracterizar química, granulométrica y superficialmente el relave.

Realizar ensayos experimentales para determinar curva de sedimentación, definir variables como: concentración de sólidos, velocidad de sedimentación y dosis de floculante.

Diseñar, imprimir y puesta en marcha de prototipo de sedimentación.

Optimizar la concentración de sólidos en la descarga del sedimentador usando un diseño de experimento y técnicas de optimización.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MINERÍA EN CHILE Y PROCESAMIENTO DE MINERALES

La minería en Chile ha sido un pilar fundamental en la economía del país, destacando la producción de cobre. Desde la segunda mitad del siglo XX, Chile se ha consolidado como el principal productor mundial de cobre.

El cobre extraído en Chile representa aproximadamente el 10,3% del Producto Interno Bruto (PIB) como promedio en los últimos años y casi la mitad de las importaciones del país. (R. Monsalve Helfant & F. Donoso Rojas, 2022).

Sin embargo, la minería en Chile enfrenta desafíos importantes, como la escasez de agua, especialmente en regiones del norte donde se concentran las principales operaciones mineras, y la presión por reducir su huella ambiental.

En el procesamiento de minerales, el objetivo principal es extraer y purificar metales valiosos a partir de minerales extraídos. Este proceso se lleva a cabo a través de varias etapas metalúrgicas interconectadas, que van desde la preparación inicial del mineral hasta la recuperación final del metal. Entre estas etapas, la creación de la pulpa, la generación de corrientes de concentrado y el manejo de colas de relave son esenciales, y la sedimentación juega un papel crucial en el tratamiento de los relaves

2.2. SEDIMENTACIÓN

La sedimentación es un proceso geo-metalúrgico natural donde partículas sólidas, siendo más densas que el líquido en el que están suspendidas se deposita en el fondo debido a la gravedad. Este proceso está afectado por la densidad de las partículas, la velocidad del flujo y el caudal del líquido. La viscosidad del líquido también juega un papel crucial: a mayor viscosidad, menor es el movimiento de las partículas. Las partículas aceleran las moléculas del líquido, transmitiendo su movimiento a capas más distantes, influenciado por la viscosidad.

En el contexto del procesamiento minero, los sedimentadores tratan flujos que provienen de etapas de conminución y flotación. La conminución genera partículas finas al reducir el tamaño del mineral mediante trituración y molienda, lo que incrementa la proporción de partículas ultrafinas en el sistema, afectando la sedimentación. Posteriormente, el proceso de flotación separa las partículas

de valor económico de los minerales de ganga, dejando un flujo de relaves que incluye una mezcla de partículas sólidas y agua.

En este flujo de relaves, las partículas que no fueron recuperadas en la flotación, junto con los productos de la conminución, se dirigen a los espesadores o sedimentadores, donde es necesario facilitar la sedimentación de estas partículas finas. Debido a la presencia de partículas ultrafinas y coloidales, la sedimentación que se da de manera natural puede ser insuficiente, requiriendo el uso de floculantes y coagulantes para aglomerar las partículas y acelerar su sedimentación. En la figura 2.1 podemos observar las zonas de sedimentación en un espesador industrial.

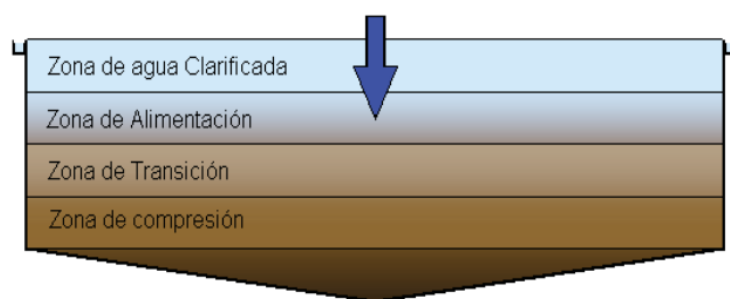


Figura 2.1. Zonas de sedimentación en un espesador industrial. (P.Gómez Paredes, 2012)

2.3.1. Curva de sedimentación

La curva de sedimentación implica crear un gráfico que representa cómo las partículas sólidas en una suspensión se separan del líquido con el tiempo, basado en sus características específicas. Esta curva muestra la relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas y el tiempo transcurrido, proporcionando datos sobre la efectividad del proceso de sedimentación y el comportamiento de las partículas en diferentes condiciones. En el diseño de la curva, se consideran factores como la densidad de las partículas, la viscosidad del líquido y las características del mineral a tratar. La finalidad de una prueba de sedimentación es medir la velocidad con la que las partículas se depositan a lo largo del tiempo y determinar la concentración en peso de los sólidos durante un periodo extenso, simulando cómo se comportarían en un espesador industrial.

Todo lo anterior se basa en la ley de Stokes para la velocidad de sedimentación (v):

$$v = \frac{2}{9} \times \frac{(r^2 \times (\rho_p - \rho_f) \times g)}{\mu} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- v es la velocidad de sedimentación (m/s)
- r es el radio de la partícula (m)
- ρ_p es la densidad de la partícula (kg/m^3)
- ρ_f es la densidad del fluido (kg/m^3)
- g aceleración gravitacional (m/s^2)
- μ es la viscosidad dinámica del fluido ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

2.4. MÉTODO DE DISEÑO DE ESPESADORES

Los métodos de diseño de espesadores, que se detallan a continuación, implican una serie de pasos técnicos para calcular el diseño óptimo de estos equipos. Estos pasos incluyen la recolección y análisis de datos relacionados con las propiedades de la pulpa, como densidad, tamaño de partículas, concentración de sólidos y viscosidad del líquido, así como la definición de condiciones operativas como caudal y características esperadas del espesador.

- **Mishler:** Este método utiliza los datos iniciales recopilados para desarrollar un modelo matemático que facilita el diseño del espesador. El modelo proporciona herramientas para dimensionar el tanque del espesador y configurar el sistema de rastras. El enfoque se basa en la relación entre la tasa de sedimentación y las características de la pulpa, lo que permite determinar los parámetros críticos del diseño.
- **Método Kynch:** Basado en la teoría de sedimentación, este analiza el comportamiento de las partículas en suspensión a lo largo del tiempo bajo la influencia de la gravedad. Se genera un análisis detallado de la tasa de sedimentación a partir de la curva de sedimentación y la clasificación de partículas. Este análisis permite calcular el volumen necesario del sedimentador y definir las dimensiones y configuración del tanque, optimizando la eficiencia del proceso de sedimentación.
- **Método Talmage y Fitch:** Esta técnica emplea gráficos y correlaciones empíricas para determinar el área requerida del sedimentador y evaluar la eficiencia del proceso de sedimentación. Con los datos iniciales, se calcula la tasa de sedimentación

a partir de gráficos específicos que estiman la velocidad de sedimentación y la capacidad del sedimentador. El cálculo del área de sedimentación se basa en el caudal de entrada y la concentración de sólidos. Finalmente, el diseño del sedimentador incluye la configuración del estanque y el diseño del sistema de rastras, asegurando una separación eficaz.

- Método Coe & Clevenger: Este método se centra en calcular el tamaño adecuado del espesador necesario para alcanzar la densidad deseada en el lodo tratado, teniendo en cuenta las características específicas del material y las condiciones operativas como area de espesador, altura de espesador y tiempo de retención.

2.5. EQUIPOS

La sedimentación clásica se basa en la acción de las fuerzas gravitacionales y se lleva a cabo en equipos denominados espesadores. Estos equipos tienen una forma cilíndrica y se alimentan desde la parte superior del tanque a través de una entrada central conocida como “feed well”. Los espesadores cuentan con dos salidas: una en el centro del fondo del tanque para la descarga de la pulpa espesa, y otra en la periferia superior para el vertido del líquido claro que se rebalsa. La salida periférica se mantiene a baja velocidad para evitar el arrastre de partículas en suspensión. Una rastra, situada en el centro del tanque y operada a bajas revoluciones por minuto, transporta el mineral hacia la zona de descarga.

2.5.1. Clasificación de equipos

Alta densidad: es un equipo industrial diseñado para la separación eficiente de sólidos de líquidos en aplicaciones mineras. Este tipo de sedimentador maneja pulpas con alta concentración de sólidos, optimizando la separación en un espacio compacto. A continuación, se puede observar en la figura 2.2 un sedimentador de alta densidad.



Figura 2.2. Sedimentador de Alta densidad. (Schoenbrunn, 2011)

Alta capacidad: diseñado para la separación eficiente de sólidos y líquidos en grandes volúmenes. Este equipo está optimizado para procesar pulpas con alta densidad de sólidos, mejorando la eficiencia del proceso de sedimentación en un diseño compacto. A continuación, en la figura 2.3 se puede observar un sedimentador de alta capacidad.



Figura 2.3. Sedimentador de alta capacidad. (FLSmidth, 2024)

Convencional con puente: es un equipo cilíndrico en minería que utiliza un puente central para soportar el sistema de rastras y otros mecanismos. Permite la sedimentación de sólidos por gravedad en el fondo del tanque, mientras el líquido clarificado se recoge en la parte superior. La estructura del puente optimiza el acceso y la eficiencia del proceso de sedimentación. A continuación, se presenta en la figura 2.4 un sedimentador convencional con puente.



Figura 2.4. Sedimentador convencional con puente. (FLSmidth, 2024).

Clarificador: es un equipo industrial especializado en la separación de sólidos suspendidos de líquidos mediante sedimentación. Este dispositivo optimiza la calidad del efluente al permitir que las partículas sólidas se asienten en el fondo del tanque, mientras el líquido clarificado se recoge en la parte superior. El clarificador consta de un tanque, típicamente cilíndrico o rectangular, equipado con un sistema de rastras para la recolección y transporte de los sólidos sedimentados, y mecanismos de rebose para la extracción del líquido clarificado. A continuación, se presenta en la figura 2.5 un clarificador.



Figura 2.5. Clarificador. (FLSmidth, 2024)

2.6. APLICACIÓN DE SEDIMENTACION

En las aplicaciones industriales y mineras, la sedimentación se emplea para concentrar sólidos y recuperar agua, optimizando así la eficiencia en el tratamiento de pulpas y líquidos.

Por otro lado, también se puede generar prototipos de diseño piloto 3D que sean representativos de los equipos a nivel industrial para determinar los parámetros que entreguen el máximo funcionamiento del proceso de sedimentación.

2.7. IMPRESIÓN 3D

La impresión en 3D, es un proceso de producción en el que un objeto tridimensional es creado a partir de un modelo digital. Esta tecnología funciona agregando material capa por capa hasta formar el objeto final, permite la creación de formas complejas y personalizadas que serían difíciles o imposibles de lograr con métodos de fabricación tradicionales. Su aplicación abarca desde prototipos y piezas industriales hasta productos finales. (I. Gibson, D. Rosen, & B. Stuker., 2015).

2.7.1. Métodos de impresión 3D

- Fabricación de filamento fundido (FFF) o modelado por deposición fundida (FDM): Este es uno de los métodos más comunes, en el cual un filamento de plástico se funde y se deposita capa por capa para formar el objeto.

- Fabricación con filamento continuo (CFF): Similar al modelado por deposición fundida (FDM), pero utiliza filamentos continuos de materiales compuestos, como fibras de carbono, para crear piezas más resistentes.
- Estereolitografía (SLA): utiliza un láser ultravioleta para solidificar resina líquida, capa por capa creando piezas con alta precisión y detalle.
- Sintetizado selectivo por láser/fusión selectiva por láser (SLS/SLM, también conocidos como DMLS en el caso del metal): este método emplea láser para sintetizar o fundir polvo de material, creando la pieza directamente a partir de un modelo 3D. Cuando se utiliza con metal, se conoce como Direct Metal Laser Sintering (DMLS).
- Procesamiento directo de luz (DLP): similar a la estereolitografía (SLA), pero utiliza un proyector de luz para solidificar una capa completa de resina líquida en un solo paso, lo que acelera el proceso.
- Fabricación aditiva por difusión atómica (ADAM, también conocida como deposición de polvo aglomerado): también conocida como deposición de polvo aglomerado, este método combina la impresión de polvo metálico con una capa aglutinante que se sintetiza para crear la pieza final.

2.7.2. Software para diseño 3D

Existen muchos softwares utilizados para el diseño en 3D entre ellos podemos nombrar los siguientes:

- Inventor Professional: amplio software de Autodesk para diseño mecánico y simulación, ideal para proyectos industriales.
- AutoCAD: herramienta de diseño y dibujo 2D y 3D ampliamente utilizada en ingeniería, arquitectura y fabricación.
- Fusion 360: software de diseño integrado en la nube, ideal para prototipo rápido y diseño de productos.

2.8. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DoE)

En muchas ocasiones, se utiliza el Diseño de experimentos (DoE) en las pruebas empíricas, este se caracteriza por manejar un número limitado de variables de entrada y trabajar con un pequeño conjunto de muestras, las cuales poseen una alta representatividad. Estos tipos de DoE son

especialmente útiles en ensayos donde se requiere un número reducido de muestras, ya sea por razones económicas o porque el experimento así lo demanda. Este método se utiliza por lo general en experimentos de laboratorio, ayudando a minimizar las muestras utilizadas. Dentro de sus diseños de experimentos clásicos están: Diseño de Box-Behnken, Diseño Factorial 2^k y Diseño Central Compuesto.

2.9. MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA (RSM)

Es una técnica estadística y matemática utilizada para modelar y analizar problemas en los que una respuesta de interés es influenciada por varias variables. Su objetivo principal es optimizar esta respuesta, identificando las mejores condiciones operacionales.

Sus características principales son:

- **Diseño Experimental:** se basa en la implementación de experimentos bien planificados que permiten recoger datos de forma eficiente. Estos datos se utilizan para ajustar un modelo que relaciona las variables de entrada con la respuesta.
- **Modelos Polinomiales:** generalmente, se emplean modelos polinomiales de segundo orden para aproximar la relación entre la respuesta y las variables independientes. Esto permite capturar la curvatura de la superficie de respuesta y optimizarla.
- **Optimización:** una de las principales ventajas de este método es su capacidad para identificar las condiciones óptimas de operación, donde la respuesta deseada se maximiza o minimiza. También permite la evaluación de interacciones entre variables, lo que puede ser crítico para entender la complejidad del proceso.

3. METODOLOGÍA

La metodología para optimizar el proceso de sedimentación mediante un prototipo de espesador impreso en 3D se desarrolló integrando enfoques de diseño, pruebas experimentales y modelado. Para lograrlo, se establecieron tres pilares fundamentales: diseño del sedimentador, fabricación del prototipo y optimización del proceso. A continuación, se detallan los elementos clave de esta metodología, la cual se muestra en la Figura 3.1.

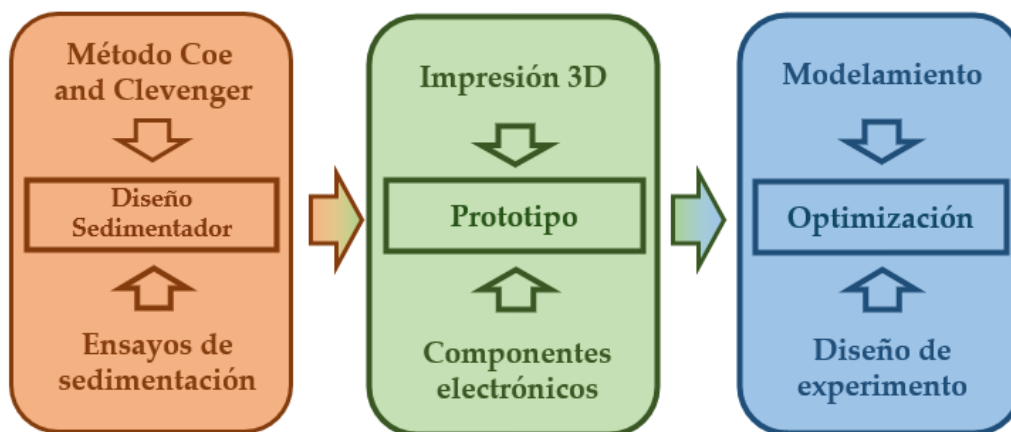


Figura 3.1. Metodología para la optimización del proceso de sedimentación. (Elaboración propia)

3.1. DISEÑO SEDIMENTADOR

3.1.1. Caracterización del mineral

El relave proporcionado por la planta concentradora Black Colt fue sometido a un análisis granulométrico, digestión ácida y difracción de rayos X (DRX) con el fin de caracterizar su composición y entender su comportamiento durante la etapa de sedimentación. Estos análisis permitieron evaluar la distribución de tamaños de partículas, la composición química y la estructura cristalina del relave, proporcionando datos clave para ajustar los parámetros operativos del proceso de sedimentación y optimizar el diseño del espesador.

3.1.2. Análisis granulométrico

Se realizó un proceso de roleo y cuarteo del relave para asegurar una muestra representativa y homogénea del material a analizar. Posteriormente, se llevó a cabo el tamizado con diferentes aberturas, organizados de mayor a menor tamaño, como se muestra en la Tabla 3.1. Las aberturas

de las mallas fueron medidas en micrones. Una vez ordenados, los tamices se colocaron en la plataforma de vibración del equipo “Ro-Tap”, como se observa en la Figura 3.2.

Tabla 3.1. Tamices utilizados para el análisis granulométrico del relave. (Elaboración propia)

# Tamiz	Diámetro (pulgada)	Marca	Abertura (micrones)
70	8	Gran Test by Pinzuar Ltda	212
140	8	Dual Manufacturing Co	106
200	8	Gran Test by Pinzuar Ltda	75
270	8	Gran Test by Pinzuar Ltda	53
400	8	Gran Test by Pinzuar Ltda	38



Figura 3.2. Disposición tamices Ro-Tap. (Elaboración propia)

3.1.3. Análisis de digestión ácida

El análisis de digestión ácida se llevó a cabo siguiendo el protocolo de la Escuela de Ingeniería Química de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. En primer lugar, se pesaron 2,5 gramos de relave previamente homogenizado, los cuales se colocaron en un vaso precipitado de 250 ml. A continuación, se añadieron 10 mL de ácido clorhídrico (HCl) concentrado y 15 mL de mezcla

sulfonítrica. La muestra fue calentada en una placa calefactora a 90°C, cubriéndola con un vidrio de reloj para evitar la evaporación.

Una vez que la muestra alcanzó un estado siruposo, se incorporaron 100 mL de agua destilada y 2 ml de ácido sulfúrico H_2SO_4 al 10% p/p. Luego, se dejó la mezcla en ebullición durante 5 a 10 minutos, manteniendo la tapa de vidrio reloj para controlar las pérdidas por evaporación.

Después de este periodo, la solución fue enfriada y filtrada a través de papel filtro. Finalmente, la muestra fue transferida a un matraz volumétrico de 250 mL, ajustando el volumen final con agua destilada.

Después de este periodo, la solución fue enfriada y filtrada a través de papel filtro. Finalmente, la muestra fue transferida a un matraz volumétrico de 250 mL, ajustando el volumen final con agua destilada.

La ecuación a continuación se utilizó para determinar la ley de relave:

$$Ley \% = \frac{\text{concentración}_{EAA} * 250 * \text{factor de dilución}}{\text{peso de la muestra} * 10000} \quad \text{Ecuación 2}$$

Para determinar la ley de cobre en el relave se utilizó la ecuación 2, siguiendo el protocolo de la Escuela de Ingeniería Química de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Se utilizó un factor de dilución de 1 ya que la muestra no fue diluida por los profesionales del laboratorio.

3.1.4. Análisis de difracción de rayos X (DRX)

Para el análisis de difracción de rayos X (DRX), se tomó una muestra de relave de 2,5 gramos la cual fue enviada a un laboratorio de servicio analíticos (LSA) ubicado en la Facultad de Ciencias de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

3.1.5. Preparación floculante SUPERFLOC A-110

En cuanto al floculante SUPERFLOC A-110 cabe destacar que éste fue seleccionado en base a la investigación (P. Aravena Toloza & A. Hernández Muñoz, 2023). En la preparación, se pesaron 2.5 gramos del floculante. Posteriormente, se añadieron 497,5 mL de agua desionizada en un vaso

precipitado. Utilizando un agitador mecánico, el agua fue agitada a 420 RPM, mientras el floculante se fue incorporando poco a poco, hasta formar una solución homogénea.

Una vez disuelto el floculante, se redujo la velocidad de agitación a 200 RPM y se continuó mezclando durante una hora. La solución resultante fue transferida a un matraz volumétrico de 500 mL y se ajustó el volumen. La concentración final del floculante fue de 0,5% mg/mL.

3.1.6. Ensayos de sedimentación

Para los ensayos de sedimentación, se utilizaron vasos precipitados de 1 litro para medir la altura de sedimentación de la pulpa de relave, registrando los datos durante 360 segundos con intervalos de 30 segundos. La metodología para la determinación de la concentración de sólidos a una dosis establecida de floculante fue la siguiente:

Se añadieron 224,70 gramos de relave (equivalente al 20% de concentración de sólidos) en un vaso precipitado y se aforó con agua desionizada hasta alcanzar los 1000 mL. Posteriormente, se inyectaron 20 mL de floculante utilizando una jeringa, y la pulpa se mezcló en un vaso precipitado de 1 litro. Se tomó la altura inicial de sedimentación en el tiempo 0 segundos y se registraron las diferentes alturas cada 30 segundos, todo lo anterior se representa en la figura 4.3. El mismo procedimiento se repitió con 359,22 gramos de relave (30% de concentración de sólidos) y con 512,79 gramos (40% de concentración de sólidos). Con los datos obtenidos, se calcula la velocidad de sedimentación.

A continuación, en la figura 3.3 se puede observar las probetas en las que se realizó el ensayo de sedimentación.

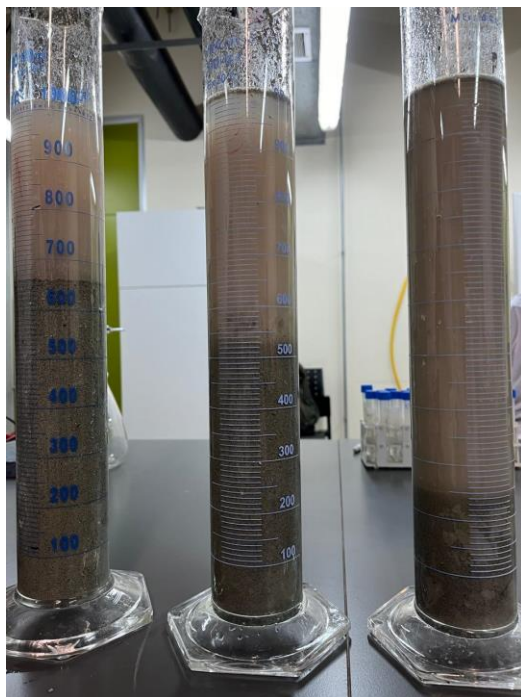


Figura 3.3. Ensayos de sedimentación. (Elaboración propia)

3.2. PROTOTIPO

3.2.1. Diseño e impresión 3D

A partir de la curva de sedimentación y utilizando el método de Coe & Clevenger, se calculó el dimensionamiento del espesador, estos datos se mostrarán en el capítulo de resultados y discusiones, obteniendo tanto la altura como el diámetro del equipo. Posteriormente, utilizando el programa “Inventor Professional 2024”, se proyectó el diseño en 3D del espesador de acuerdo con el dimensionamiento previamente calculado. La construcción física del prototipo se realizó mediante impresión 3D, utilizando filamentos de PLA, lo que permitió fabricar tanto el cuerpo del espesador como los diferentes moldes para los rastrillos. Una vez ensamblado el equipo, se realizaron pruebas de filtrado hasta obtener las condiciones óptimas para su funcionamiento. Cabe destacar que se realizaron dos impresiones de espesadores siendo el primero un modelo básico que posteriormente fue perfeccionado y corregido en su estructura.

Además, se integraron componentes eléctricos, como un panel y un motor eléctrico para controlar el movimiento del rastrillo, permitiendo monitorear las revoluciones por minuto (RPM) y asegurar el correcto desempeño del equipo.

3.3. OPTIMIZACIÓN

3.3.1. Pruebas operacionales

Se considero esta etapa una de las más importante, ya que el proceso Batch proporcionó las muestras necesarias para obtener resultados representativos del proceso mediante un balance de masa. Es por esto, que se tomaron tres variables predominantes: la concentración de sólidos en la alimentación (Cp), la dosis de floculante (mL) y la velocidad del rastrillo (RPM). Para determinar el número de pruebas necesarias y las variaciones en los parámetros, se utilizó la metodología de diseño de experimentos (DoE) mediante el método Box-Behnken en el programa MiniTab. El análisis arrojó 13 pruebas experimentales a diferencia de haber utilizado el método factorial que arroja 27 pruebas experimentales. Esto con el fin de disminuir los costos operativos y el tiempo de ejecución. La metodología experimental adoptada se llevó a cabo de la siguiente manera: en primer lugar, se ensambló el equipo básico junto con un sedimentador mejorado, asegurando las conexiones eléctricas necesarias para el funcionamiento del rastrillo en sentido antihorario a velocidades de 2,0 y 2,25 RPM. En un procedimiento paralelo, se agregaron cantidades específicas de agua destilada, definidas a través del diseño experimental (DoE), manteniendo constantes los volúmenes para dos ensayos. Estas cantidades de agua fueron mezcladas con dos masas de relave, alcanzando concentraciones de sólidos del 25% y, en un segundo experimento, del 30%. De esta forma, se generaron dos pulpas que fueron introducidas en cada uno de los prototipos de sedimentador.

El reactivo orgánico SUPERFLOC A-110 se incorporó de manera gradual en ambos equipos, utilizando una dosificación inicial de 15 mL, seguida de una prueba adicional con 20 mL. Cada prototipo operó durante un período de 1 hora. Las muestras obtenidas de la zona de descarga fueron pesadas y, posteriormente, secadas en una estufa a 100 °C. Tras un día en el horno, las muestras se volvieron a pesar para determinar la cantidad de sólidos retenidos.

Por otra parte, la metodología operacional de puesta en marcha fue la siguiente: primero, se ensambló el equipo con la conexión eléctrica, ajustando el movimiento del rastrillo en sentido antihorario a velocidades de 1,75; 2,00; 2,25 RPM. En un recipiente, se agregaron cantidades de agua destilada según las medidas definidas por el DoE. Luego, se pesó una cantidad de relave con concentraciones de sólidos de 20%, 30% y 35% y se mezcló con agua medida para generar la pulpa.

El floculante, previamente preparado, se inyecta de manera gradual en la pulpa mediante una jeringa, en cantidades de 15, 20 y 25 mL. La pulpa fue introducida de manera homogénea por la

abertura superior del prototipo de espesador, mientras se iba agregando el floculante poco a poco. El prototipo se operó durante un periodo de 1 hora.

Posteriormente, se reconocieron muestras de la descarga y tres muestras adicionales de diferentes zonas del sedimentador (centro, rastrillo y borde de la carcasa), tal como se observa en la figura 3.4 que en conjunto se denominaran como muestra superior. Las muestras obtenidas se masaron antes de ser llevadas al proceso de secado. Los frascos que contenían las muestras fueron colocados en una estufa a 100°C con el fin de evaporar el agua residual, y luego se volvieron a masar para determinar la cantidad de sólido dentro de ellos.

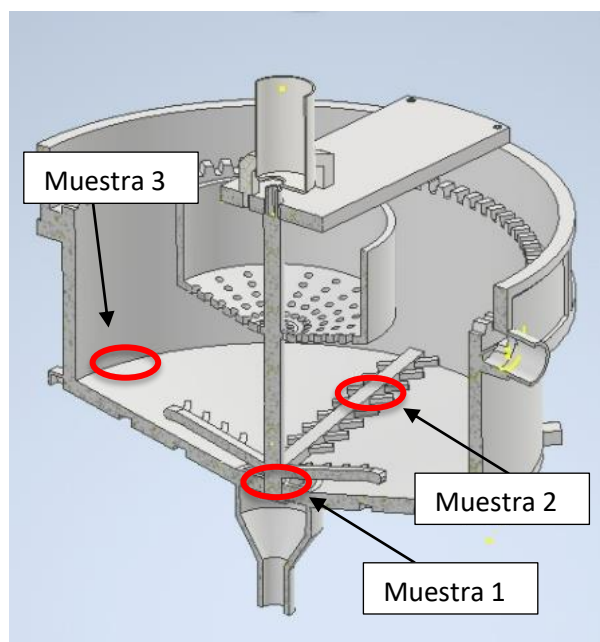


Figura 3.4. Distribución en la toma de muestras (Elaboración Propia)

Finalmente, se elaboró una tabla con los resultados obtenidos de la concentración de sólidos. Una vez completadas las pruebas operativas, los datos recolectados fueron ingresados al programa MiniTab, utilizando la herramienta de superficie de respuesta se obtuvo un modelo matemático de optimización para el prototipo de sedimentador diseñado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a lo largo de esta tesis. Se abordan la caracterización química, granulométrica, así como los ensayos de sedimentación realizados. También se describe el proceso de diseño e impresión 3D del equipo, el diseño experimental llevado a cabo, las pruebas operativas en el prototipo, y la aplicación de la metodología de superficie de respuesta para optimizar el proceso.

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE

4.1.1. Análisis granulométrico

Del análisis granulométrico realizado en laboratorio se obtuvo la distribución de tamaños de partículas de la muestra del relave. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 4.1 a continuación.

Tabla 4.1. Distribución de tamaño de partículas. (Elaboración propia)

Malla Tyler	Abertura [mm]	Masa retenida [g]	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
#70	0,212	1623,2	48,484	48,484	51,515
#140	0,106	566,0	16,906	65,390	34,609
#200	0,075	518,6	15,490	80,880	19,119
#270	0,053	488,4	14,588	95,468	4,531
#400	0,038	113,2	3,381	98,850	1,149
Base		38,5	1,149	100	0
Total		3347,91	100	100	0

La muestra está distribuida en un rango de tamaños de partículas desde las partículas más gruesas a las más finas, el mayor porcentaje de material retenido se encuentra en la malla #70. A medida que se reduce, el tamaño de las partículas el porcentaje retenido disminuye gradualmente. A partir de los datos obtenidos, se generó la siguiente curva granulométrica (figura 4.1)

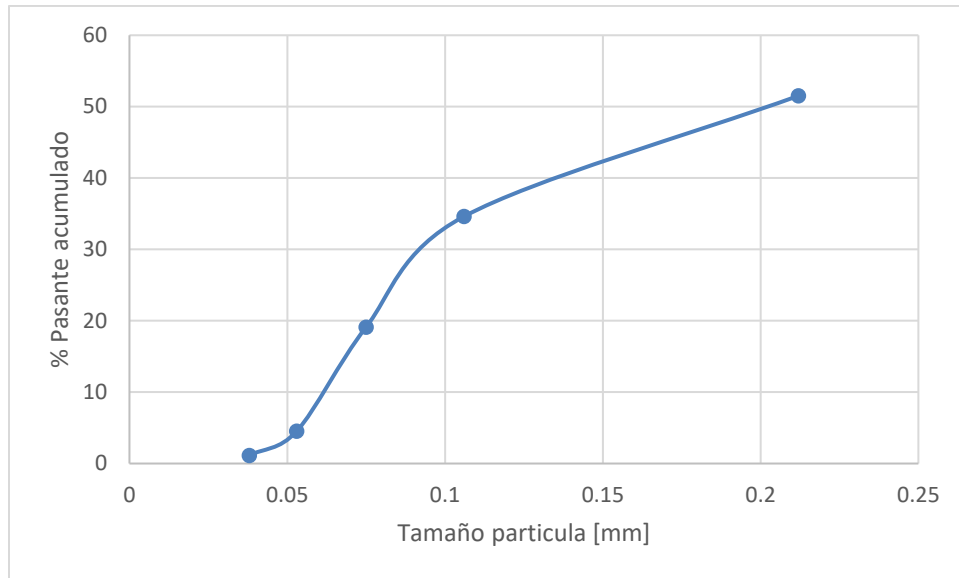


Figura 4.1. Curva granulométrica. (Elaboración propia)

En esta curva:

- El eje horizontal representa los tamaños de partículas en la muestra, con valores desde menos de 0,05 mm hasta aproximadamente 0,2 mm.
- El eje vertical muestra un porcentaje acumulado de partículas más pequeñas o iguales a cada tamaño específico en el eje horizontal.

La gráfica de la curva granulométrica muestra el porcentaje acumulado de material pasante en función del tamaño de partícula (en milímetros). La distribución sugiere que la mayor parte del material está compuesta por partículas relativamente finas, con un porcentaje acumulado que alcanza aproximadamente el 50% en un tamaño cercano a 0,2 mm. Este perfil indica una distribución significativa de partículas de diferentes tamaños, aunque con una tendencia hacia los tamaños más finos < 10 μ m lo cual es característico de muchos relaves mineros. En otras palabras, en una muestra de 3.348 kg aproximadamente presente en la alimentación 38.5 gramos son ultrafinos.

La caracterización del relave es fundamental para entender la distribución de tamaños de las partículas, lo cual es crucial para el proceso de sedimentación. La presencia de partículas ultrafinas suele dificultar el proceso de sedimentación, ya que estas partículas tienden a permanecer en suspensión más tiempo, lo que incrementa la necesidad de una mayor dosis de floculantes y un tiempo de sedimentación más largo para lograr una separación eficiente.

Con la curva granulométrica obtenida, se procedió a realizar los ensayos de sedimentación, lo que permite definir variables críticas para el proceso, como la concentración de sólidos y la dosis óptima de floculante. Además, estos datos permiten calcular la velocidad de sedimentación para distintas concentraciones de partículas, lo que es clave para optimizar las condiciones de operación y mejorar la eficiencia del proceso de sedimentación en el prototipo.

Este análisis es un paso inicial y fundamental para el objetivo del proyecto, que es optimizar la concentración de sólidos en la descarga del sedimentador. La información granulométrica obtenida proporciona las bases para ajustar las variables operacionales de manera que se mejore la eficiencia del proceso de sedimentación.

4.1.2. Análisis de digestión ácida

La muestra obtenida mediante digestión ácida fue sometida a un análisis de absorción atómica. Los resultados obtenidos en este análisis se muestran en la Tabla 4.2 a continuación.

Tabla 4.2. Resultados absorción atómica. (Elaboración propia)

Muestra	mg/L Cu	% Ley Cu
A-340(M1)	5,11	0,049
A-341(M2)	7,27	0,072

Del análisis de las muestras se presentan las leyes de cobre de 0,049% y 0,072%, lo que indica una ligera variación en el contenido de cobre entre las diferentes muestras. Esta variación podría deberse a la heterogeneidad del material, a una falta de homogeneización o dilución adecuada, o a posibles diferencias en el procedimiento de muestreo y preparación que podrían haber ocasionado pequeñas contaminaciones.

Aunque la presencia de cobre en el relave este en baja concentración, puede influir en el comportamiento de sedimentación. La carga superficial y las propiedades químicas de las partículas de cobre pueden afectar la eficiencia de los floculantes y la formación de flóculos, impactando directamente la velocidad de sedimentación.

4.1.3. Análisis de Difracción de Rayos X

La muestra, identificada como LSA-DRX-024-24-03, fue analizada por el laboratorio de Servicios Analíticos (LSA) ubicado en la Facultad de Ciencias de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, en la Figura 4.2 se puede observar la muestra utilizada en el análisis de difracción de rayos x (DRX).

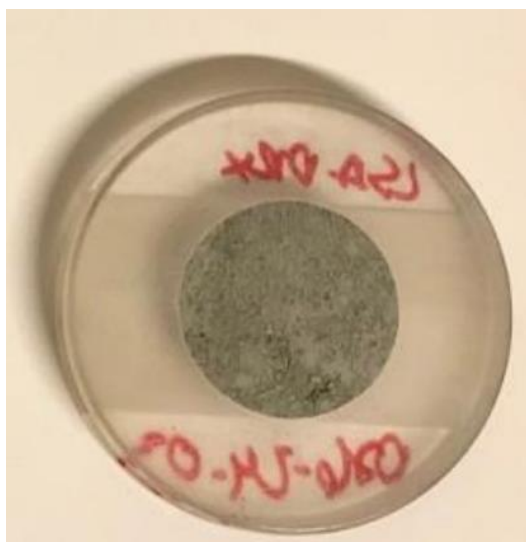


Figura 4.2. Muestra utilizada para el análisis de Difracción de Rayos X

Este análisis permite identificar minerales presentes en una muestra según sus patrones de difracción, los cuales se ilustran en la Figura 4.3. Los porcentajes correspondientes a cada mineral se detallan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Resultados de Difracción de Rayos X. (Elaboración propia)

N°	Color	Patrón	Nombre	Fórmula	Análisis S-Q
1	Rojo	PDF 70-3752	Albita	$(Na_{0,98}Ca_{0,02})(Al_{1,02}Si_{2,98}O_8)$	17,46%
2	Azul	PDF 86-2237	Cuarzo	SiO_2	10,77%
3	Verde	PDF 41-1486	Anortita	$CaAl_2Si_2O_8$	49,70%
4	Fucsia	PDF 03-0596	Calcita	$CaCO_3$	5,01%
5	Café	PDF 89-8572	Feldespatopotasio	$K(AlSi_3O_8)$	16,13%
6	Naranja	PDF 42-1340	Pirita	FeS_2	0,93%

LSA-DRX-076-24-03 (Coupled TwoTheta/Theta)

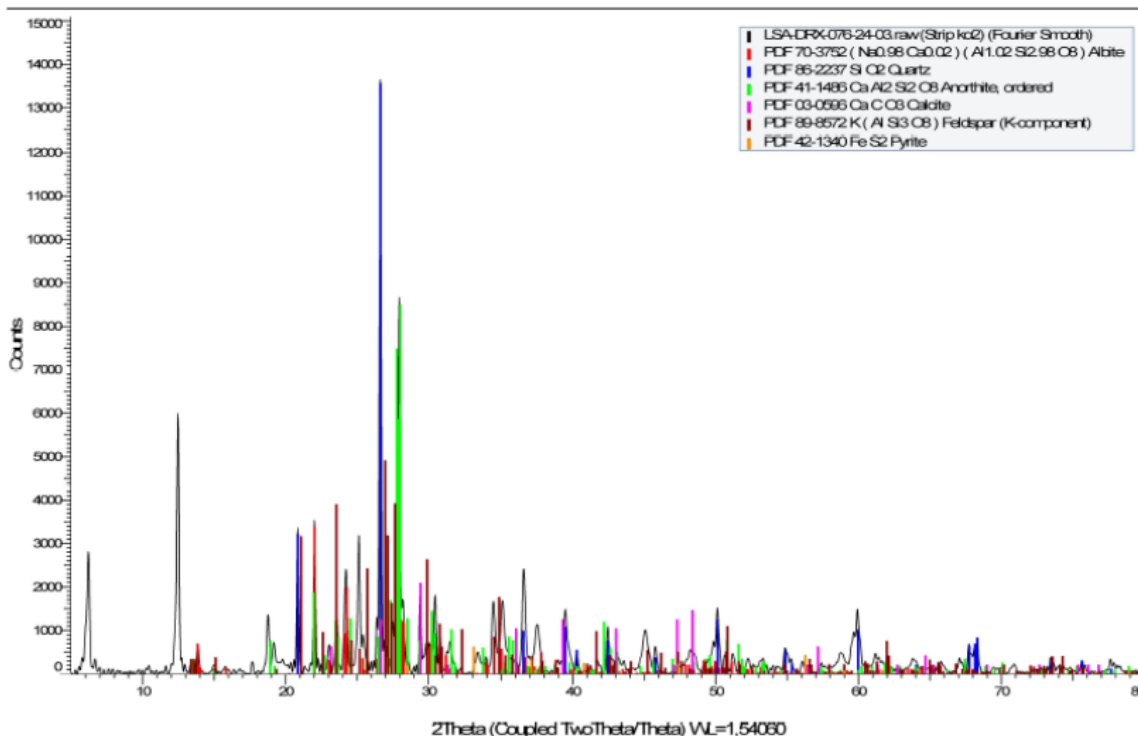


Figura 4.3. Resultados Difracción de Rayos X.

Los minerales principales de la muestra son anortita, albita y feldespato de potasio, las cuales son rocas ígneas que comúnmente se encuentran en los relaves. La baja presencia de pirita sugiere que no se trata de un material con alto contenido de sulfuros.

Según el análisis de DRX y la mineralogía del relave al estar en presencia de silicatos como: anortita, albita y feldespato de potasio, se podría indicar dificultades en la sedimentación debido a su baja reactividad con floculantes convencionales. Al analizar la tabla 4.3, se observa que la anortita es el mineral predominante. Este mineral tiende a tener una carga superficial negativa en medios acuosos, lo que puede afectar la eficiencia en el proceso de floculación. Dependiendo del tipo de floculante utilizado, la interacción con la anortita puede variar: algunos floculantes con carga similar podrían generar repulsión entre partículas, dificultando la formación de flóculos, mientras que otros podrían facilitar su aglomeración.

Además, en términos de turbidez, la anortita podría contribuir a la formación de flóculos pequeños y ligeros, lo cual complicaría la sedimentación al aumentar la turbidez del agua y dificultar su

clarificación.

Es muy importante adaptar las variables del proceso, como dosis de floculantes y concentración de sólidos para evitar ineficiencias en el proceso.

4.2. ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN

Antes de realizar las pruebas experimentales, se definieron los parámetros del ensayo de sedimentación a las concentraciones de sólidos del 20%, 30% y 40%, utilizando el floculante Superfloc A-110 al 20 mL de dosificación. Los resultados de estos ensayos se presentan en las tablas 8.1, 8.2 y 8.3 las cuales se encuentran en el anexo.

Durante los ensayos de sedimentación, se registraron cambios en la altura del sedimento a cada 30 segundos, a concentraciones de sólidos del 20%, 30% y 40%, a lo largo de un periodo total de 360 segundos. Los resultados correspondientes se encuentran en las tablas 8.4, 8.5 y 8.6 en el anexo.

Finalmente, se realizó un análisis basado en estos resultados, representado en la figura 4.4. Esta figura muestra la velocidad de sedimentación del relave en un período total de 360 segundos, para concentraciones de sólidos de 0.2, 0.3 y 0.4, ilustradas mediante curvas de diferentes colores.

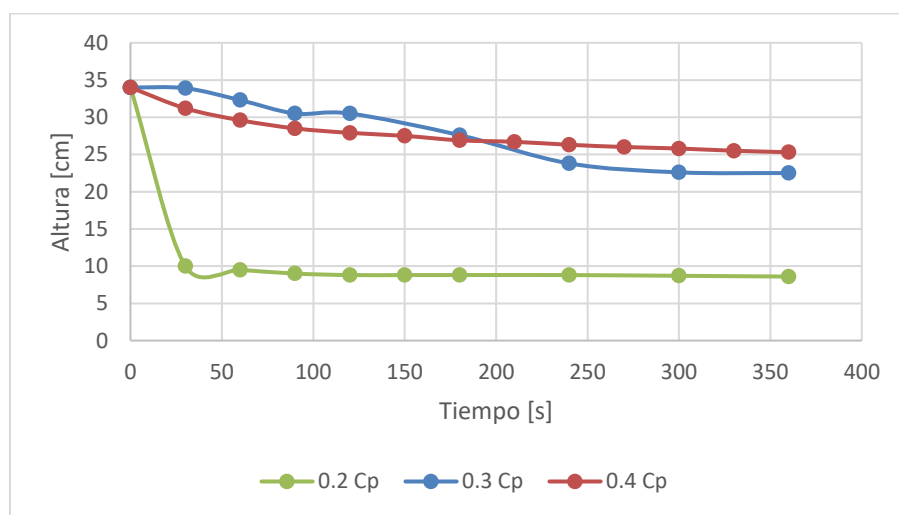


Figura 4.4. Velocidad de sedimentación del relave.

Los resultados obtenidos en el ensayo de sedimentación indican que la concentración de sólidos del 20%, en combinación con una dosificación del 20 mL de floculante Superfloc A-110, optimiza el

proceso de sedimentación en comparación con concentraciones de sólidos más altos. Tal como se muestra en la figura 4.4, esta condición, representada por la curva verde, demuestra un comportamiento de sedimentación superior frente a las concentraciones del 30% y 40%.

El comportamiento favorable de la concentración de sólidos del 20% puede explicarse en función de la viscosidad de la suspensión. A esta menor concentración, la suspensión tiene una viscosidad baja, lo que permite que las partículas de relave se muevan con mayor facilidad en el medio acuoso, favoreciendo su decantación. La menor viscosidad reduce la resistencia al flujo de agua, y, por lo tanto, facilita que las partículas se sedimenten rápidamente hacia el fondo, optimizando la separación de fases en el proceso.

Por el contrario, al aumentar la concentración de sólidos al 30% y 40%, la viscosidad de la suspensión aumenta considerablemente, lo que resulta en una mezcla más densa y en una mayor resistencia al movimiento de las partículas. Esto se traduce en una reducción de la eficiencia de sedimentación, ya que el proceso se vuelve mas lento y las partículas encuentran mayores dificultades para sedimentarse. Esta diferencia de comportamiento sugiere que la cantidad de sólidos en suspensión es un factor crítico que afecta directamente la velocidad y la eficiencia de la sedimentación.

Estos resultados destacan la importancia de encontrar un equilibrio entre la concentración de sólidos y la dosificación de floculante para maximizar la eficiencia del proceso. Con una concentración de sólidos del 20%, no solo se minimiza la resistencia interna de fluido, sino que también se optimiza la acción del floculante, que actúa de manera mas efectiva en suspensiones de menor viscosidad, formando flóculos que sedimentan con mayor rapidez y eficiencia.

Los ensayos también sugieren que, en situaciones con altos niveles de sólidos, podrían ser necesarias modificaciones adicionales, como el ajuste de la dosificación de floculante o la velocidad del rastrillo, para contrarrestar los efectos de una mayor viscosidad.

4.3. DISEÑO E IMPRESIÓN DEL EQUIPO

Antes de proceder con la proyección y ejecución del dimensionamiento del equipo, se adoptó el Método Coe & Clevenger como base teórica para encontrar el dimensionamiento del espesador, utilizando la Ecuación 3 de área unitaria. Como parte del proceso, se estableció dos condiciones claves para el diseño del espesador: un valor de C_p under de 0.65 y un C_p de alimentación del 0.32. Con estas condiciones definidas y a través de cálculos matemáticos, se determinó que el espesador debía tener un área de 0.08591 m^2 para cumplir con los requisitos establecidos.

$$AU_0 = \frac{S}{F} = \frac{1}{\rho_s |V_s(\varphi_k)|} \left(\frac{1}{\varphi_k} - \frac{1}{\varphi_D} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Mediante la utilización de “*inventor profesional*” se proyectó el dimensionamiento del equipo piloto que se observa en la figura 4.5 en dos partes ya que presentaba una mayor exactitud y se lograría construir de manera digital todos los detalles que tendría el clarificador.

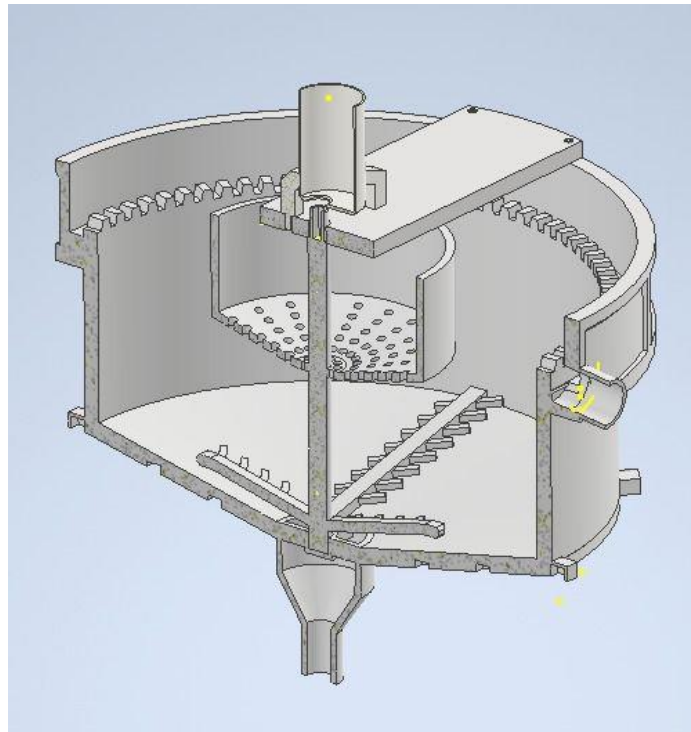


Figura 4.5. Proyección digital del Clarificador 3D. (Elaboración propia)

Finalmente, en la etapa de impresión se utilizaron filamentos de PLA para construir dos clarificadores de manera más detallada y una estructura más lisa. Como se mencionó anteriormente, ambos clarificadores fueron ensamblado y montado uniendo ambas partes para tener una mejor nivelación del rodamiento del rastrillo. En la figura 4.6 se muestra el primer clarificador impreso, donde la forma de zona inferior es cónica, esté presenta solo dos rastras que giran sobre una abertura de eje muy diminuta, además de tener una abertura pequeña de descarga en la parte inferior del equipo. Mientras que en la figura 4.7 se puede observar el equipo rediseñado e impreso, el cual presenta un cono de distribución de pulpa además de cuatro rastrillos de diferentes tamaños y un puente de estabilidad para el movimiento de las rastras, este equipo fue el que se utilizó para llevar a cabo este proyecto, se deja en evidencia que la impresión se logró de manera eficiente.

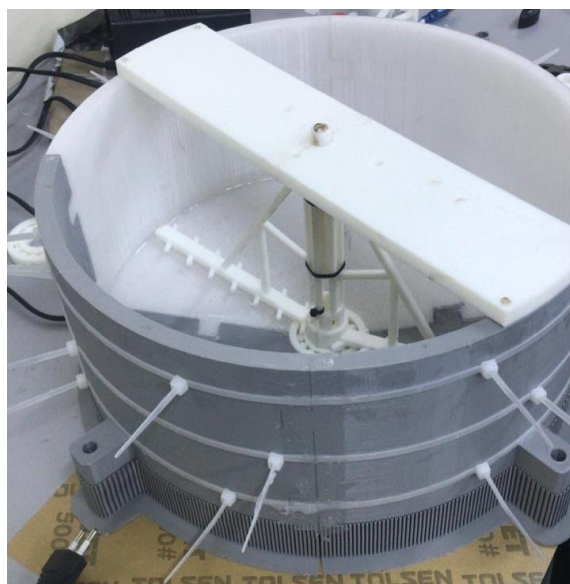


Figura 4.6. Clarificador 1 impreso en 3D. (Elaboración propia)



Figura 4.7. Clarificador 2 impreso en 3D. (Elaboración propia)

El diseño e impresión del clarificador en 3D mediante la teoría y herramientas digitales fue un paso fundamental para asegurar la funcionalidad y precisión del equipo. Este equipo es esencial para realizar las pruebas experimentales con resultados confiables.

4.4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DoE)

Para optimar el proceso de sedimentación, se llevó a cabo un Diseño de Experimentos (DoE), variando los parámetros clave: concentración de sólidos (C_p), velocidad del rastrillo en revoluciones por minuto (RPM) y la dosis de floculante (mL). La selección de estas variables responde a su influencia directa en la eficiencia de sedimentación, específicamente en la obtención de una descarga con alta concentración de sólidos, el cual es el objetivo de optimización del estudio.

En total, se realizaron 13 pruebas con combinaciones diferentes de estas variables, cuyos resultados se detallan en la Tabla 4.10. Es importante destacar que nos basamos en el diseño de Box-Behnken, este método solo toma los puntos centrales teniendo así 13 combinaciones a realizar en las pruebas experimentales las cuales se pueden observar en la figura 4.8. Estas combinaciones permitieron explorar una amplia cantidad de condiciones operacionales que busca la óptima configuración para

maximizar la eficiencia de sedimentación.

Tabla 4.4. Diseño de Experimentos DoE. (Elaboración propia)

Prueba	Cp	Rpm	mL
1	25	2,00	25
2	35	2,25	20
3	30	2,00	20
4	30	1,75	25
5	30	1,75	15
6	35	1,75	20
7	25	1,75	20
8	25	2,25	20
9	30	2,25	15
10	30	2,25	25
11	35	2,00	15
12	35	2,00	25
13	25	2,00	15

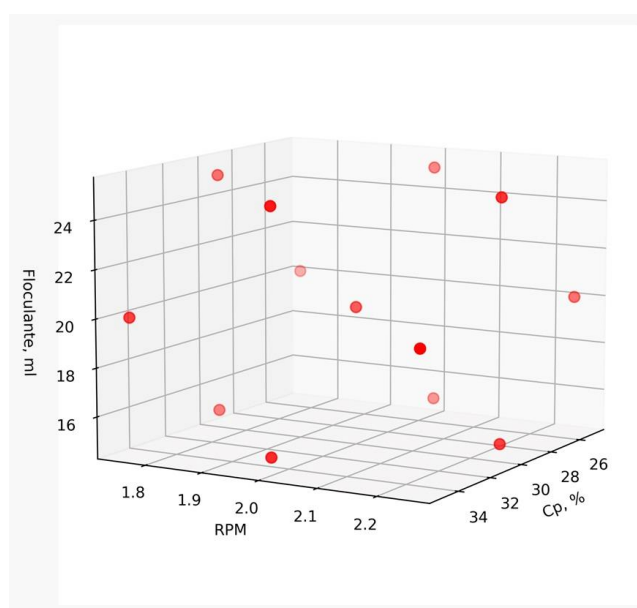


Figura 4.8. Distribución de puntos en Diseño de Experimentos DoE. (Elaboración propia)

Con estos resultados se puede decir que la concentración de sólidos es una variable crítica, ya que niveles altos pueden favorecer la eficiencia de la sedimentación debido al incremento en la cohesión entre partículas. Sin embargo, concentraciones demasiado altas pueden llevar a una sedimentación menos estable o a la necesidad de mayores cantidades de floculante para lograr una descarga adecuada.

La velocidad del rastrillo afecta la redistribución en las partículas en el sedimentador y su compactación. El análisis de los datos experimentales permitirá identificar la velocidad óptima del rastrillo que maximiza la sedimentación, sin comprometer la estabilidad en la descarga.

La dosis de floculante también es un factor clave para favorecer la eficiencia de sedimentación. Es importante optimizar su dosificación ya que una dosis mayor provocaría un proceso ineficiente y más costoso, mientras que una dosis baja podría ser insuficiente para la adhesión de las partículas.

Respecto a la distribución de los puntos experimentales y el análisis de las combinaciones de factores ofrecen una comprensión más profunda de como interactúan entre si la concentración de sólidos, la velocidad del rastrillo y la dosis de floculantes.

4.5. PRUEBAS OPERACIONALES

En las pruebas operaciones se establecieron variables predominantes con un rango de valores que se presentan a continuación

- Rango de Dosificación del Superfloc A-110: 15 mL-25mL.
- Rango de Velocidad del rastrillo: 1.75 RPM-2.25 RPM
- Rango de Concentración de solido del relave: 0.25-0.35.

En primer lugar, se realizaron cálculos matemáticos para determinar la cantidad de agua destilada y masa de relave se necesitaría para las 3 diferentes concentraciones de solido expresados en la tabla 4.11. Posterior a los cálculos previos se realizaron dos pruebas operacionales, comparando ambos clarificadores para determinar el equipo más representativo para la etapa de sedimentación que se puede visualizar en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Pruebas de diseño de equipo piloto 3D. (Elaboración propia)

Resultados pruebas de diseño				
Floculante (ml)	RPM	Cp	Clarificador 1 Descarga (%)	Clarificador 2 Descarga (%)
15	2	0.25	28.18	72.15
20	2.25	0.35	67.68	74.85

Con relación a los resultados obtenidos al evaluar tanto el Clarificador 1 como el Clarificador 2 bajo las mismas condiciones, se observa en la tabla 4.5 (Pruebas de diseño de equipo piloto 3D) que el Clarificador 2 mostró un rendimiento superior para los ensayos de sedimentación. Este equipo alcanzo un 72,15% de sólido en la llave de descarga, lo que indica una excelente separación de fases. Este resultado sugiere que más de la mitad del sólido alimentado se concentra eficientemente en la descarga, lo que demuestra una buena capacidad de tratamiento del equipo.

Por otro lado, al rendimiento del Clarificador 1 fue ineficiente en el proceso de sedimentación debido a la mecanización del prototipo y los parámetros operacionales. Uno de los principales factores que afecto su desempeño fue el diseño de rastrillo, que consistía en dos aspas pequeñas. Este diseño resulto ser ineficiente para generar el movimiento adecuado dentro del equipo. Comparando también las variables que se utilizaron en estas pruebas en el clarificador 1 al aumentar la dosis de floculante y la velocidad del rastrillo se observó un aumento en la concentración de sólidos en la descarga esto podría deberse a que el movimiento de las rastras a tan poca velocidad es incapaz de ayudar a que los sedimentos se dirijan al punto de descarga. Además, a diferencia del clarificador 2, el clarificador 1 no contaba con un cono de distribución de pulpa, lo que provocó que toda la pulpa de relave se concentrara en el centro del clarificador, lo que podría explicar el resultado de 28,18% de concentración de sólido en la descarga en comparación al Clarificador 2 que obtuvo un 72,15%. Esta deficiente distribución afectó negativamente la homogenización dentro de la carcasa del equipo, y, en consecuencia, afecto negativamente la separación de fases.

La falta de una correcta distribución de la pulpa también perjudicó el movimiento del rastrillo, que es esencial para mantener el grado de fluidez necesario y asegurar la remoción hidráulica de los sólidos. En resumen, la combinación de un diseño de rastrillo eficiente y la ausencia de un cono de

distribución contribuyó a una sedimentación ineficiente y un rendimiento subóptimo del Clarificador 1.

Posteriormente, se llevó la puesta en marcha en el prototipo de sedimentador 3D más representativo de esta etapa donde se obtuvieron los resultados plasmados en la Tabla 4.12.

Tabla 4.6. Resultados pruebas operacionales. (Elaboración propia)

Resultados Pruebas Operacionales					
Prueba	Floculante (ml)	RPM	Cp	Muestra superior (%)	Muestra descarga (%)
1	20	1.75	0.25	65.20	67.33
2	15	2	0.25	66.31	72.15
3	20	2.25	0.25	55.70	64.39
4	25	2	0.25	53.53	67.98
5	20	2	0.3	65.70	68.06
6	25	1.75	0.3	62.81	69.83
7	15	2.25	0.3	66.45	70.10
8	20	1.75	0.35	62.79	61.75
9	15	2	0.35	63.20	59.25
10	25	2.25	0.3	64.06	61.66
11	20	2.25	0.35	65.83	74.85
12	15	1.75	0.3	66.37	75.93
13	25	2	0.35	64.86	69.62

Al analizar los resultados de las pruebas operacionales en la tabla 4.12, se observa que la prueba 1 y la prueba 3 comparten una dosificación de floculante de 20 mL y un Cp de 0.25, pero difieren en la velocidad del rastrillo: la primera prueba opera en las sentido antihorario a 1.75 RPM, mientras que la prueba 3 lo realiza con 2.25 RPM dando como resultado una concentración de sólido en la descarga de 67.33% en la prueba 1 y 64.39% en la prueba 3, dejando una diferencia de 2.94% , por otro lado en las muestras superiores donde queda el sólido retenido en la carcasa del equipo se

obtuvo una diferencia del 9.5%, esto podría deberse a que el sobre aumento de velocidad que presento la tercera prueba pudiese generar una turbulencia y descompresión de la pulpa en el flujo inferior, por lo que el ingreso de los 20 mL de floculante Superfloc A-110 no es capaz de ayudar a decantar el material particulado a generar flóculos grandes y de mayor densidad pero la elevada velocidad de las rastras rompen los enlaces que ayudaron a generar los flóculos en la fase intermedia por lo tanto perjudicaría incluso el reactivo orgánico en su funcionamiento.

Con las variables operacionales de 20 mL de dosificación de Superfloc A-110 y a un Cp de 0.35 se presentan la prueba 8 y 11 diferenciándose también en la velocidad del giro de las rastras, por un lado la octava prueba se trabajo a 1.75 RPM mientras que la undécima se ejecuto a 2.25 RPM, los resultados de la muestra superior demostraron una mayor retención de solido en el interior de la carcasa, con un 65,83% en la prueba 11 en comparación de 62.79% de la prueba 8, el mismo comportamiento ocurrió en la descarga del clarificador, observándose una diferencia de 13.1% de concentración de solidos entre una prueba y la otra. Pero demuestra que a pesar de que tuvo un mayor Cp la prueba 11 en la muestra superior, la muestra de descarga fue mayor que la concentración de sólido en la descarga de la prueba 8, una explicación podría ser que en la puesta en marcha se observaron dificultades en la prueba 8 debido a que el rastrillo perdió fuerza en el accionamiento de rastra a los 10 minutos teniendo que aumentar la velocidad del rastrillo a 2.0 RPM debido a que a 1.9 RPM era muy inestable. Por lo tanto, la Prueba 8, a pesar de los problemas operativos, no logró aumentar la concentración de sólidos en la descarga. Esto se debió a que el movimiento de las rastras era demasiado lento, lo que, en lugar de favorecer la remoción hidráulica de los sólidos y permitir la formación de canales para la separación de fases en la zona de compresión, generó un estancamiento. Como resultado, la fuerza ejercida por las rastras fue insuficiente para superar la resistencia de los sólidos sedimentados, afectando negativamente todo el proceso operativo.

En las pruebas 4 y 13 que comparten la misma dosificación de Superfloc A-110 y velocidad del rastrillo, pero a un Cp de 0.25 y 0.35 también dieron resultados distintos. Aunque ambas lograron cumplir con el objetivo de tener una mayor cantidad de sólido en la descarga la prueba 4 a pesar de no presentar dificultades operacionales si se visualizo en el agua sobrenadante restos de floculante y particulas finas en los bordes de la carcasa del equipo, podría interpretarse a que a no existió un aumento en la llave de descarga debido a que un porcentaje quedo retenido en el sobrenadante

incluyendo el floculante en exceso. Por otra parte la prueba 13 si presento problemas operacionales al trabajar con 2 RPM debido a que su concentración era mayor, está generó que la fuerza de accionamiento de las rastras fuera menor a la necesaria para este tipo de cantidad de sólido es por ello que se aumento su velocidad hasta 2.2 RPM que a su vez ayudo a que decantara mayor cantidad de particulas finas teniendo como resultado una concentración de descarga del 69.62% además de que no se observó presencia de restos de floculante en el agua sobrenadante.

La prueba 2 y 9 presentan variables operacionales idénticas en la dosificación de floculante y RPM, pero presentan diferencias en el Cp ya que la prueba 2 se trabajó a 0.25 mientras que la prueba 9 a 0.35. Por un lado los resultados demostraron que en la muestra superior la concentración mas baja de sólidos la obtuvo la prueba 9 pero al visualizar los resultados en la muestra de la descarga se demuestra que la prueba 2 tuvo un mayor rendimiento de concentración de solido en la salida del equipo, esta contradicción que se genera podría influir en las dificultades operacionales que estuvieron presentes en la prueba 9 debido a que la fuerza del movimiento de las rastras no fue lo suficiente para superar la resistencia de sólidos sedimentados por lo que se tuvo que aumentar al 2.2 RPM entonces al presentar un momento la paralización del movimiento del rastrillo pudo generar bloqueo de residuos en la salida de descarga del espesador, generando taponamiento y debido a la presión interna entre particulas podría haberse generado cavidades de agua que quedaron retenidas en la boquilla de la descarga.

Por otra parte, a una diferente velocidad pero a idénticas dosificación de Superfloc A-110 y a un Cp de 0.3 se ejecutaron las pruebas 6 y 10 donde se puede observar que la concentración de sólido en la muestra superior fue mayor en la decima prueba en comparación a la sexta, esto podría deberse a que el movimiento de las rastras fue mayor al necesario para el proceso lo que generaría turbulencia impidiendo una buena homogenización en el colchón de sólidos sedimentados por lo que se comienza a desprender generando mayor acumulación en los bordes internos de la carcasa. Pero si se puede interpretar que la dosificación de floculante reaccionó bien en el proceso debido a que no presento problemas operacionales donde hubiera un atasco en el movimiento de las rastras o particulas finas en el sobrenadante, al contrario con los datos obtenidos se podría confirmar que si tuvo un buen comportamiento en la separación de fase con la aplicación del Superfloc A-110 sin embargo la alta velocidad de las rastras generó que el movimiento de los sólidos sedimentados en vez de ir hacia el centro del equipo este se fuese a los bordes logrando un aumento en la concentración de solidos en la carcasa del equipo. En cambio, en la descarga se puede comprobar

que la prueba 10 no fue capaz de movilizar la mayor cantidad de sólidos a la abertura de descarga. Sin embargo, la prueba 6 si tuvo un buen resultado en la muestra superior donde esté fue menor que la prueba 10 y además obtuvo un 69,83% de concentración de sólido en la descarga generando una diferencia de 8,17% comparándolo con la decima prueba, el comportamiento de la sexta prueba fue acorde con lo que se busca debido a que la velocidad en la que se movió el rastrillo fue de 1.75 RPM, lo que ayudo a generar una decantación más rápida en conjunto con el floculante, además fue capaz de movilizar la mayor cantidad de sólidos retenidos en el fondo hacia el punto de descarga.

Para las pruebas 7 y 12, la variable que principalmente diferencia su comportamiento y resultado es la velocidad del movimiento del rastrillo. Aunque los resultados en la muestra superior fueron similares, con una diferencia de 0.08% de concentración de sólido en la carcasa del equipo, se observó una diferencia más significativa en la prueba 12, que presentó mejores resultados. Esto puede ser explicado teóricamente: en ambos casos, el movimiento de las rastras a 1.75 RPM favoreció una separación de fases más eficiente, ya que evitó la turbulencia inicial, lo que impidió el desprendimiento de sólidos en la parte inferior y evitó un aumento en la concentración de sólidos en los bordes de la carcasa. Por lo tanto, el comportamiento observado fue el esperado.

4.6. METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

El análisis de Superficie de Respuesta (RSM) se realizó para determinar las condiciones óptimas de operación en el proceso de sedimentación, enfocándose en maximizar la concentración de sólidos en la descarga (C_p). Este análisis se realizó en dos muestras tomadas en distintas partes de la descarga del espesador, denominadas R1 (parte superior) y R2 (parte inferior).

R1 – Muestra tomada en la parte de arriba de la descarga del espesador

El modelo polinomial de segundo orden ajustado para la muestra R1 arrojó un coeficiente de determinación R^2 de 0,9455, indicando que el modelo tiene un buen ajuste con los datos experimentales, luego una buena capacidad predictiva.

En los gráficos de respuesta (figuras 4.9 y 4.10), se observa la variación de la respuesta a medida que se ajustan las variables principales: la dosificación de floculante, la velocidad del rastrillo (RPM) y concentración de sólidos. Estas figuras permiten visualizar cómo varían los resultados y mostrar la combinación óptima de factores.

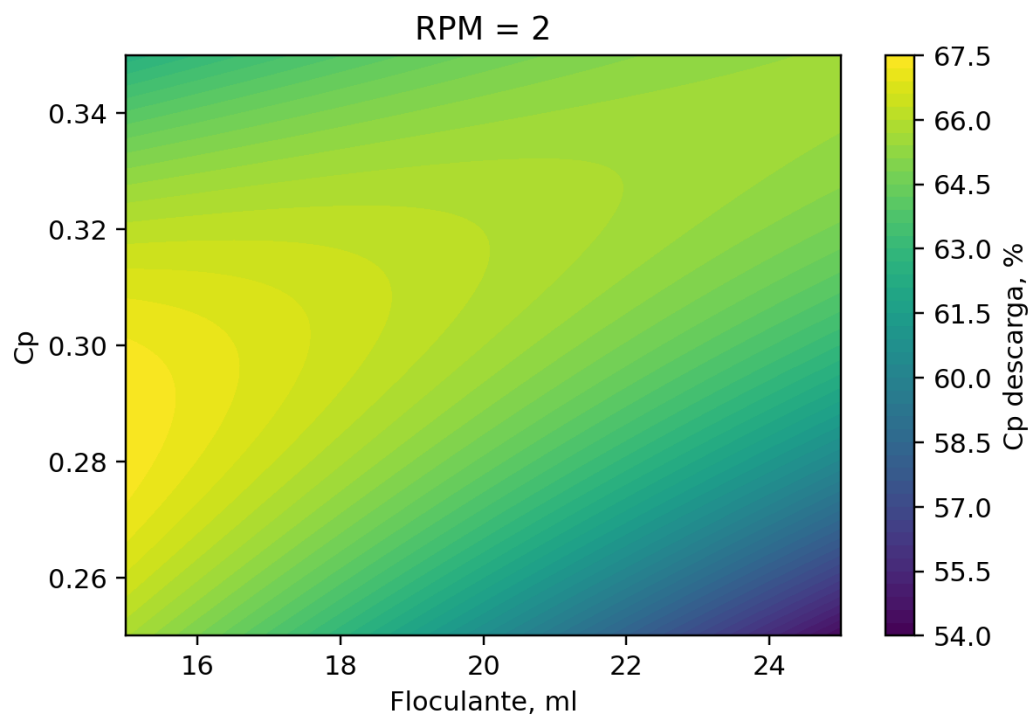


Figura 4.9. Gráfico de respuesta tridimensional de la muestra R1. (Elaboración propia)

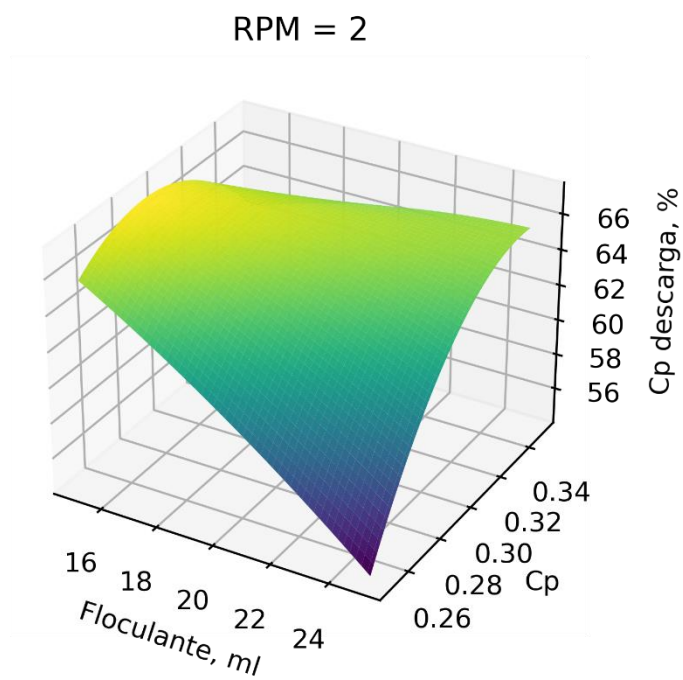


Figura 4.10. Superficie de Respuesta en 3D de la muestra R1. (Elaboración propia)

Con respecto a la optimización de la concentración de sólidos en la descarga, usando el modelo polinomial ajustado, se obtuvieron los siguientes valores óptimos que se observan a continuación en la tabla 4.13.

Tabla 4.7. Valores obtenidos en Superficie de Respuesta muestra R1

Dosificación de floculante	15,0 mL
Revoluciones por minuto del rastrillo	1,75 rpm
Concentración de sólidos (Cp)	0,2621
Valor máximo de Cp descarga	69,79

Los resultados óptimos obtenidos sugieren una dosificación de floculante de 15,0 mL, una velocidad del rastrillo de 1,75 RPM y una concentración de sólidos en la alimentación de 0,2621 producen una concentración máxima de sólidos en la descarga de 69,79%.

R2 – Muestra tomada en la parte de abajo de la descarga del espesador

Para la muestra R2, el análisis utilizó un modelo polinomial de cuarto orden, resultando en un coeficiente de determinación R^2 de 0,616. Este valor indica un ajuste moderado a los datos experimentales, lo que sugiere que el modelo captura parcialmente la variabilidad observada, luego con menor precisión que la muestra R1.

Al igual que en el caso de la muestra R1, las figuras 4.11 y 4.12 muestran como las respuestas con los ajustes en las variables de entrada y revelan las combinaciones ideales de dosificación de floculante y velocidad del rastrillo para maximizar la sedimentación.

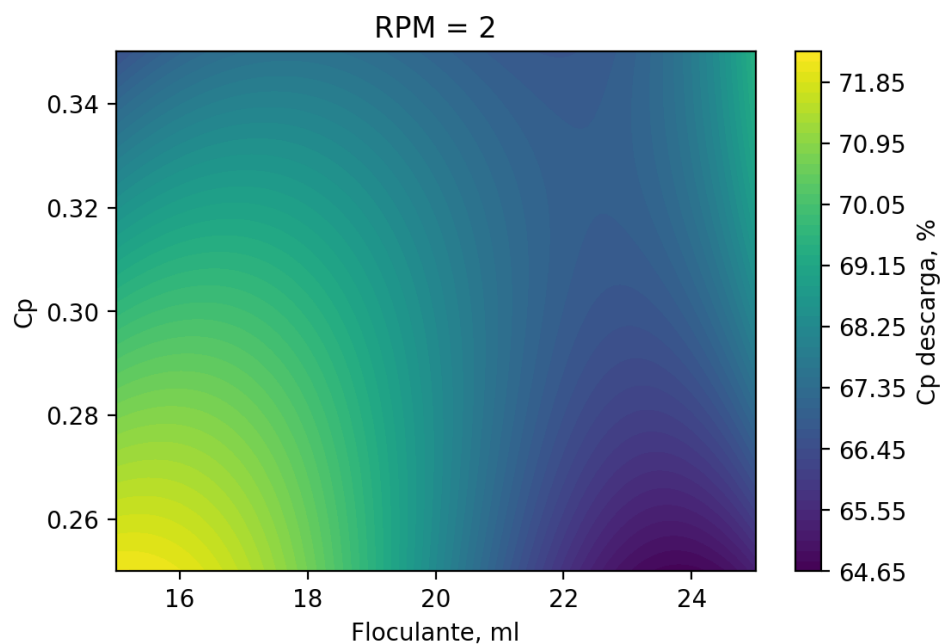


Figura 4.11. Gráfico de respuesta tridimensional de la muestra R2. (Elaboración propia)

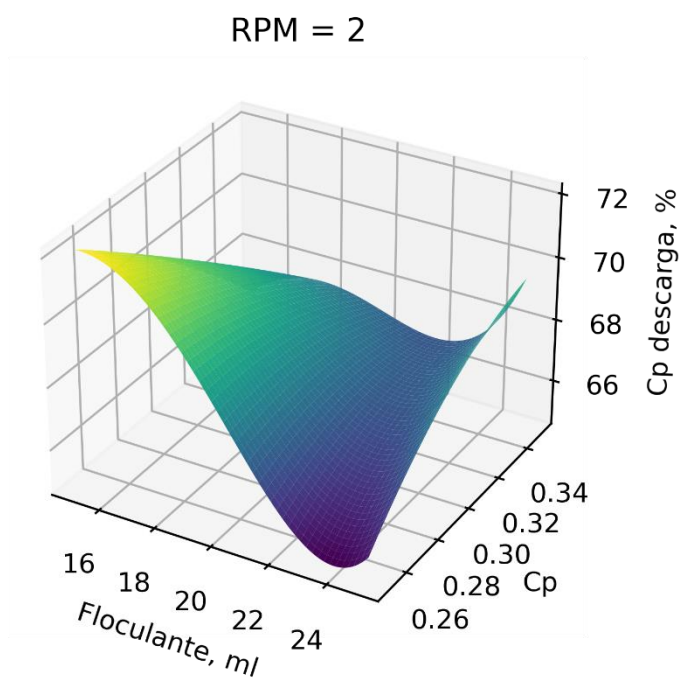


Figura 4.12. Superficie de Respuesta en 3D de la muestra R2. (Elaboración propia)

Con respecto a la optimización de la concentración de sólidos en la descarga, usando el modelo polinomial ajustado, se obtuvieron los siguientes valores óptimos que se observan a continuación en la tabla 4.14.

Tabla 4.8. Valores obtenidos en Superficie de Respuesta muestra R2. (Elaboración propia)

Dosificación de floculante	20,5mL
Revoluciones por minuto del rastrillo	2,25 rpm
Concentración de sólidos (Cp)	0,35
Valor máximo de Cp descarga	71,68

Los resultados óptimos obtenidos sugieren una dosificación de floculante de 20,5 mL, una velocidad del rastrillo de 2,25 RPM y una concentración de sólidos en la alimentación de 0,35 producen una concentración máxima de sólidos en la descarga de 71,68%.

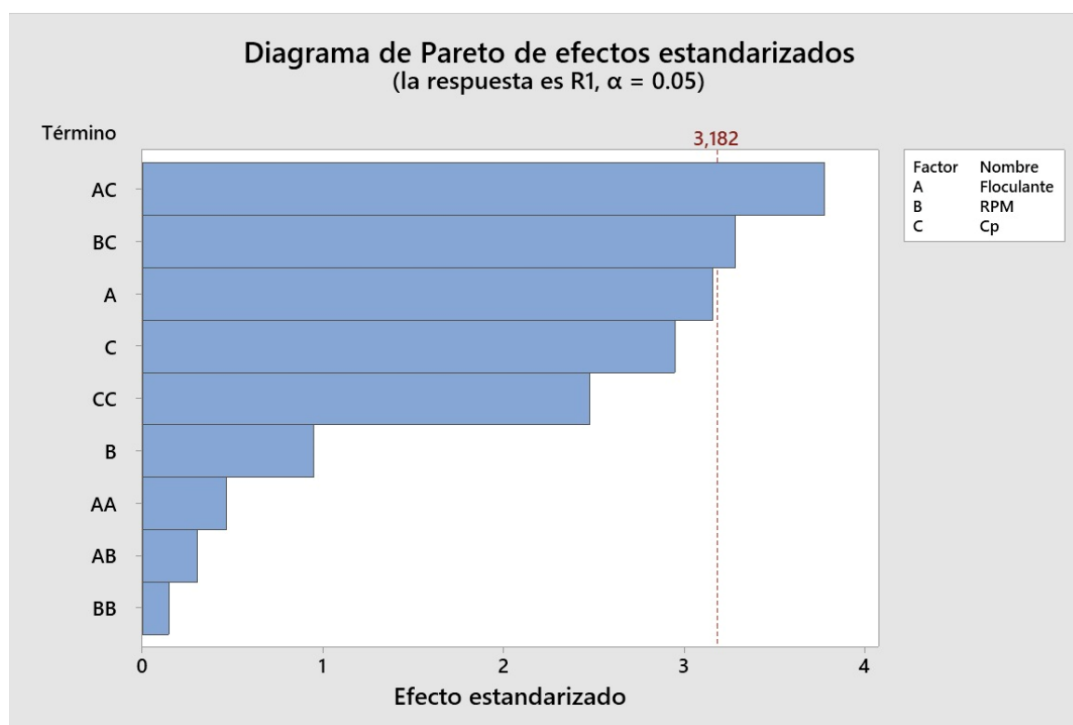


Figura 4.13. Diagrama de Pareto R1. (Elaboración propia)

En la figura 4.13, podemos observar el diagrama de Pareto, este nos indica las interacciones significativas en la optimización. Podemos decir que la interacción de floculante y concentración de sólidos en la alimentación tiene un impacto significativo en la concentración de sólidos en la descarga, mientras que la interacción de RPM y concentración de sólidos en la alimentación a pesar de ser un poco menos crucial para optimizar el proceso nos ayuda en el equilibrio entre la mezcla y asentamiento. Un RPM demasiado bajo podría no homogenizar adecuadamente los sólidos con el floculante perjudicando tanto en la decantación como el movimiento que guía a los sólidos a la abertura de descarga, reduciendo la eficiencia de la floculación como el porcentaje de sólido en la salida de descarga, en el caso contrario un RPM demasiado alto podría generar turbulencia mantener los sólidos en suspensión entre la interfase además de asentar las partículas que si lograron a decantar, afectando de manera negativa la concentración en la descarga.

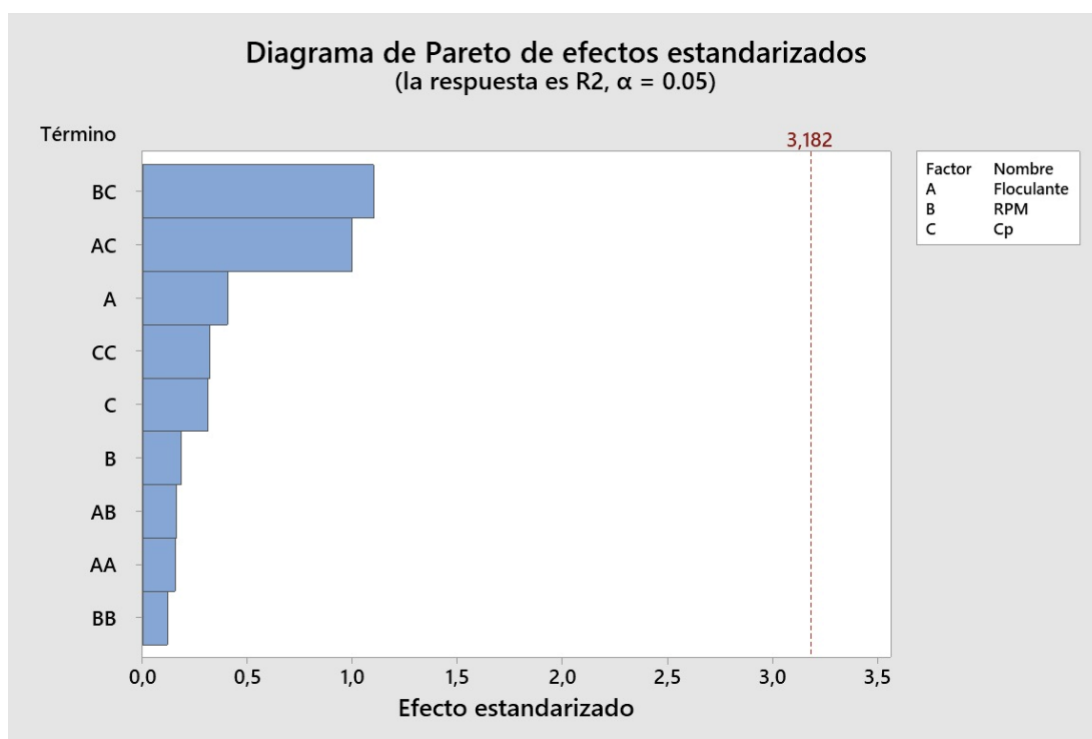


Figura 4.14. Diagrama de Pareto R2. (Elaboración propia)

En la figura 4.14, se observa que la interacción que más incidencia tiene en los resultados es la de RPM y concentración de sólidos en la alimentación, sin embargo, su valor está debajo del umbral de significancia. De todas maneras, el diagrama nos dice que ajustar esas variables podría tener un

impacto en la concentración de sólidos en la descarga.

El modelo de segundo orden ajustado para la muestra R1 muestra un R^2 más alto 0,9455, lo que indica una representación precisa de la relación entre las variables en la parte superior de la descarga. En cambio, el modelo de cuarto orden de la muestra R2, con un R^2 de 0,616, sugiere una menor capacidad de ajuste en la parte inferior de la descarga. Esto podría deberse a factores como una mayor variabilidad en la concentración de sólidos o una complejidad adicional en las interacciones de los factores, haciendo que la optimización en la parte inferior sea menos precisa. La mayor dosificación de floculante en la muestra R2 (20,5 mL) frente a la muestra R1 (15,0 mL) sugiere que en la parte inferior del espesador se requiere una mayor cantidad de floculante para lograr la sedimentación eficiente, pero esto podría generar costos adicionales en el proceso. Asimismo, la mayor velocidad del rastrillo en la muestra R2 (2,25 rpm) indica que una mayor agitación es beneficiosa para compactar los sólidos en esta sección, por lo que esa velocidad está dentro de la estabilidad de remoción hidráulica impidiendo el asentamiento de las partículas y favoreciendo el porcentaje de sólidos en la descarga.

El alto valor de R^2 en la muestra R1 indica que los resultados en la parte superior son predecibles y que el modelo es confiable para la optimización. Esto también se ve reflejado en los diagramas de Pareto, donde R1 muestra el impacto que tiene la concentración de sólidos en la alimentación y el floculante en la concentración de sólidos en la descarga. Sin embargo, el menor R^2 en la muestra R2 sugiere que la optimización en la parte inferior puede ser más variable y menos predecible. Esto implica que es posible que se necesiten ajustes adicionales en la parte inferior para alcanzar niveles de eficiencia equivalentes a los observados en la parte superior.

Las condiciones óptimas obtenidas de ambos modelos pueden guiar la configuración del proceso de sedimentación. La diferencia en la concentración máxima de sólidos las muestras 69,79% en R1 versus 71,68% en R2 podría ser útil para ajustar el proceso en diferentes puntos del espesador, permitiendo maximizar la eficiencia en el proceso de sedimentación.

Los resultados obtenidos para la muestra R1 indican que es la más adecuada para operar en el clarificador diseñado e implementado en este proyecto. Bajo condiciones óptimas, con una dosificación de floculante de 15,0 mL una velocidad del rastrillo de 1,75 RPM y una concentración de sólidos en la alimentación de 0,2621, se alcanza una concentración máxima de sólidos en la

descarga del 69,79%. Estas condiciones permiten una sedimentación eficiente, maximizando la concentración de sólidos en el producto final y optimizando el rendimiento del equipo.

4.7. ANÁLISIS DE COSTOS

La optimización realizada y la determinación de sus parámetros claves, como concentración de sólidos en la alimentación, RPM del rastrillo y dosis de floculante permiten reducir costos en el proceso.

Llegar a la concentración de sólidos en la descarga ajustando estos parámetros, permite tener una sedimentación eficiente, reduciendo la necesidad de aumentar los RPM, lo que disminuye el consumo energético y reduce el gasto mecánico del equipo.

Ajustar la concentración de sólidos en la alimentación evita la sobrecarga del clarificador y reduce la necesidad de un sobre mantenimiento, además de proteger el rastrillo del deterioro o rotura causada por la resistencia al movimiento de los sólidos. Mantener un control adecuado de esta variable mejora la eficiencia del proceso y disminuye el tiempo requerido para la sedimentación.

Por otro lado, una dosificación correcta del floculante asegura una reducción en los costos de reactivos, evitando el exceso que se podría generar en el sobrenadante lo que perjudica su funcionalidad. De este modo, se garantiza la cantidad mínima necesaria para una sedimentación eficiente y controlada.

Cabe mencionar que este proyecto se llevo a cabo en escala laboratorio, y los costos asociados a este proyecto se dejan en la tabla 4.9 a continuación:

Tabla 4.9. Costos de ejecución del proyecto

Descripción del gasto	Cantidad	Pesos Estimados \$
Reactivos químicos (Superfloc A-110)	1kg	\$50.000
Análisis químicos (DRX)	1 muestra	\$100.000
Material de impresión	4 kg	\$92.000
Material circuito eléctrico	1 unidad	\$10.000
Muestra de relave	20 kg	\$0
Impresora Creality Cr-M4	1 unidad	\$0
Total, gastos		\$252.000

La optimización de parámetros clave realizada en este proyecto ha demostrado ser efectiva a escala de laboratorio, ofreciendo una reducción significativa de costos operativos mediante un control preciso de la concentración de sólidos en la alimentación, las RPM del rastrillo y la dosis de floculante.

Sin embargo, para validar estos resultados a un entorno industrial, será necesario un escalamiento a escala piloto. Esto permitirá evaluar cómo se comportan los parámetros optimizados bajo condiciones mas cercanas a la realidad operativa, incluyendo mayores volúmenes de procesamiento y posibles variaciones en las condiciones de alimentación.

El escalamiento proporcionaría datos adicionales sobre eficiencia energética, durabilidad del equipo y consumo real de floculante, lo que permitiría ajustar aún más los parámetros para maximizar la reducción de costos.

Este análisis preliminar sugiere una recomendación: una transición a escala piloto para confirmar los beneficios observados y asegurar la viabilidad económica del proceso en un entorno industrial.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este proyecto están a favor de la hipótesis planteada. Lo cual queda en evidencia con el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos.

Con la caracterización química, granulométrica y superficial del relave se mostró un alto porcentaje de partículas finas, lo cual presenta dificultades para la sedimentación, ya que se debe adicionar una mayor cantidad de floculantes para lograr una separación efectiva. Además, la baja concentración de cobre y la composición mineralógica (principalmente silicatos como anortita, albita y feldespatos de potasio) sugieren que el relave reacciona con complejidad con floculantes convencionales, lo que requiere ajustes adicionales en la dosificación del floculante debido a que éste puede afectar en la formación de flóculos e incluso pudiese aumentar la turbidez del agua.

El diagrama de Pareto demostró que la interacción entre el floculante y la concentración de sólidos en la alimentación tienen un gran impacto en la concentración de sólidos en la descarga. Al aumentar la concentración de sólidos en la alimentación, se incrementa la viscosidad y se reduce la eficiencia del proceso. La relación entre concentración de sólidos y viscosidad es fundamental: a mayores concentraciones de sólidos, la viscosidad de la suspensión aumenta, lo cual dificulta la sedimentación. Por esto es crucial ajustar la dosis de floculante al igual que la velocidad del rastrillo para poder contrarrestar los efectos negativos de una alta viscosidad.

El uso de impresión 3D facilitó el diseño y la puesta en marcha del prototipo, permitiendo realizar ajustes específicos en su estructura según los resultados de los ensayos. El prototipo utilizado en las pruebas operacionales mejoró la distribución de sólidos en el proceso de sedimentación, aumentado a su vez el punto de descarga y además de generar una mayor estabilidad para el movimiento de las rastras.

El DoE guió los ensayos experimentales del sedimentador permitiendo su caracterización en función de las variables: dosis del floculante Superfloc A-110, concentración de sólidos en la alimentación, velocidad del rastrillo en RPM y la concentración de sólido óptima en la descarga.

La Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) fue efectiva para identificar y ajustar variables operativas clave (como la dosificación de floculante, la concentración de sólidos y la velocidad del rastrillo) y maximizar la eficiencia de sedimentación. Logrando aumentar la concentración de sólidos

en la descarga del clarificador a un 71,68% con una velocidad de rastrillo de 2,25 RPM, una dosis de floculante de 20,5 mL y una concentración de sólidos en la alimentación de 26,21%.

La integración del prototipo impreso en 3D, junto con el uso de la metodología de superficie de respuesta logro mejorar las condiciones operativas, aumentando la concentración de sólidos en la descarga.

En conclusión, la optimización del proceso de sedimentación en la industria minera, mediante el ajuste de parámetros operacionales clave, demuestra ser fundamental para reducir costos y tiempos de ejecución. Al mejorar variables como la concentración de sólidos, la dosis de floculante y la velocidad de las rastras, se incrementa la eficiencia, reduciendo el consumo de insumos y energía, lo que favorece también la recuperación y reutilización del agua, contribuyendo a una gestión más sostenible de los recursos, especialmente en regiones con escasez hídrica como Chile. El prototipo de sedimentación ha mostrado ser una herramienta eficiente al proporcionar una simulación controlada que permite obtener resultados mas concretos y determinar las variables predominantes para un reajuste a gran escala. Esta simulación facilita la identificación de ajustes mas precisos en el diseño mecánico y operacional del sedimentador, reduciendo costos, tiempos de ejecución y errores en la implementación a gran escala, lo que garantiza un proceso más eficiente y sostenible.

6. RECOMENDACIONES O SUGERENCIAS

- Continuar explorando el ajuste fino de la dosis de floculante y la velocidad del rastrillo, con especial atención en las diferencias de comportamiento entre la parte superior e inferior del espesador.
- Considerar modificaciones en el diseño del clarificador 3D para mejorar la eficiencia de redistribución de pulpa, incorporando elementos como un cono de distribución con aberturas más grandes, un rastrillo que contenga 4 aspas grandes y 4 pequeñas para homogenizar y movilizar la concentración de sólido en la parte inferior del equipo. Además, se sugiere incorporar un sistema puente que contenga ciertas ranuras como “sistema de goteo” que permita distribuir de manera eficiente y homogénea el floculante para evitar la acumulación de este en la parte del cono de distribución de pulpa del espesador. También buscar otras alternativas del sistema de conexión eléctrica incluyendo el tipo de motor a utilizar, debido a que, en nuestro estudio, el motor utilizado en ciertas pruebas con concentraciones de sólido del 35% era casi incapaz de generar la fuerza necesaria para mover la rastra contra resistencia de sólidos sedimentados.
- Realizar estudios adicionales sobre la composición mineralógica y química del relave, enfocándose en las propiedades de partículas ultrafinas y minerales específicos que puedan influir en los reactivos orgánicos como el floculante. También estudiar la incorporación de coagulantes al trabajar con partículas ultrafinas y así poder facilitar la aglomeración de estas partículas.
- Validar experimentalmente las condiciones óptimas indicadas por RSM. Además, llevar a cabo pruebas adicionales en condiciones de mayor concentración de sólidos para entender cómo influye la viscosidad de la suspensión en la sedimentación.
- Explorar otros tipos de floculantes y las propiedades de éste incluyendo su carga superficial, especialmente aquellos que puedan mejorar la sedimentación de partículas ultrafinas, y estudiar su impacto con los minerales presentes en el relave que afectan en la eficiencia del proceso.
- Llevar a cabo pruebas del prototipo en una escala mayor de ser posible, para validar los resultados del modelo en condiciones reales.
- Para futuras investigaciones, sugiero explorar metodologías que permitan optimizar la sedimentación a velocidades del rastrillo más cercanas a las utilizadas en la industria. En nuestro estudio, trabajamos con velocidades sobre 1.5 RPM, mientras que en aplicaciones

industriales el rastrillo suele operar a velocidades mucho más bajas, alrededor de 0.05 RPM a 0,5 RPM. Ajustar la velocidad a este rango podría proporcionar resultados más representativos y alineados con las condiciones reales, lo cual sería útil para evaluar el impacto de los parámetros operativos en escenarios de escala industrial.

- Evaluar los posibles efectos ambientales de los residuos generados en el proceso, especialmente si se incorporan nuevos aditivos o floculantes. Esta evaluación contribuirá a desarrollar prácticas de sedimentación más sostenibles y seguras para el medio ambiente.
- Incorporar un estudio investigativo de los minerales presentes aún en el sobrenadante que está presente al finalizar las pruebas operacionales e incluso incluir algún proceso de tratamiento que ayude en la eliminación de impurezas presentes en el agua y que está suela recircularse al proceso de sedimentación.
- Incluir un sistema de proceso continuo para el proceso de sedimentación, en virtud de que nuestro trabajo operacional con el clarificador fue un proceso Batch.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Arjmand, R., Massinaei, M., & Behnamfard, A. (2019). Improving flocculation and dewatering performance of iron tailings thickeners. *Journal of Water Process Engineering*, 31. doi:10.1016/j.jwpe.2019.100873
- Bahmani-Ghaedi, A., Hassanzadeh, A., Sam, A., & Entezari-Zarandi, A. (2022). The effect of residual flocculants in the circulating water on dewatering of Gol-e-Gohar iron ore. *Minerals Engineering*, 179. doi:10.1016/j.mineng.2022.107440
- Castillo, C., Ihle, C. F., & Jeldres, R. I. (2019). Chemometric optimisation of a copper sulphide tailings flocculation process in the presence of clays. *Minerals*, 9(10). doi:10.3390/min9100582
- Chen, X., Jin, X., Jiao, H., Yang, Y., & Liu, J. (2020). Pore connectivity and dewatering mechanism of tailings bed in raking deep-cone thickener process. *Minerals*, 10(4). doi:10.3390/min10040375
- FLSmidth. (2024). Espesadores y clarificadores, 1–12. Retrieved from https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/thickening/thickeners-and-clarifiers_brochure_es.pdf
- Garmsiri, M. R., & Nosrati, A. (2019). Dewatering of Copper Flotation Tailings: Effect of Feed Dilution on the Thickener Performance. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40(2), 141–147. doi:10.1080/08827508.2018.1497626
- Haselhuhn, H. J., & Kawatra, S. K. (2017). Design of a continuous pilot-scale deslime thickener. *Minerals and Metallurgical Processing*, 34(1), 1–9. doi:10.19150/mmp.7243
- Jiao, H., Chen, W., Wu, A., Yu, Y., Ruan, Z., Honaker, R., ... Yu, J. (2022). Flocculated unclassified tailings settling efficiency improvement by particle collision optimization in the feedwell. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29(12), 2126–2135. doi:10.1007/s12613-021-2402-3
- Jiao, H., Wu, Y., Wang, H., Chen, X., Li, Z., Wang, Y., ... Liu, J. (2021). Micro-scale mechanism of sealed water seepage and thickening from tailings bed in rake shearing thickener. *Minerals Engineering*, 173. doi:10.1016/j.mineng.2021.107043
- Jiao, H., Wu, Y., Wang, W., Chen, X., Wang, Y., Liu, J., & Feng, W. (2021). The micro-scale mechanism of metal mine tailings thickening concentration improved by shearing in gravity thickener. *Journal of Renewable Materials*, 9(4), 637–650. doi:10.32604/jrm.2021.014310

- Minitab, LLC (2021). "Optimizacion", Getting Started with Minitab, p. 28-30. <https://www.minitab.com>
- Le, T. M. K., Mäkelä, M., Schreithofer, N., & Dahl, O. (2020). A multivariate approach for evaluation and monitoring of water quality in mining and minerals processing industry. *Minerals Engineering*, 157. doi:10.1016/j.mineng.2020.106582
- Li, H., Wu, A. xiang, Wang, H. J., Chen, H., & Yang, L. H. (2021). Changes in underflow solid fraction and yield stress in paste thickeners by circulation. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28(3), 349–357. doi:10.1007/s12613-020-2184-z
- P. Aravena Toloza, & A. Hernández Muñoz. (2023). *Búsqueda de floculante y coagulante óptimo para la sedimentación de los finos en planta "BlackColt"* (Memoria de Título Ingeniería Civil Metalúrgica). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso .
- P.Gómez Paredes. (2012). *Evaluación pruebas de espesamiento de relaves en planta piloto* (Memoria de Título de Ingeniería Química). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso . Retrieved from http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-5500/UCF5592_01.pdf
- Puderbach, V., Schmidt, K., & Antonyuk, S. (2021). A coupled CFD-DEM model for resolved simulation of filter cake formation during solid-liquid separation. *Processes*, 9(5). doi:10.3390/pr9050826
- Ruan, Z., Wang, Y., Wu, A., Yin, S., & Jin, F. (2019). A theoretical model for the rake blockage mitigation in deep cone thickener: A case study of lead-zinc mine in China. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019. doi:10.1155/2019/2130617
- Ruiz, P., Montes-Quiroz, W., & Andrade Corbalan, K. (2021). *Comprehensive thickening analysis strategy*. In *Paste 2021: 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings* (pp. 17–24). Australian Centre for Geomechanics, Perth. doi:10.36487/acg_repo/2115_02
- Ruuska, J., Nikula, R. P., Ruhanen, E., Kauppi, J., Kauvosaari, S., & Kosonen, M. (2020). Data analysis of a paste thickener. *Open Engineering*, 10(1), 362–367. doi:10.1515/eng-2020-0038
- Wang, X., Cui, B., Wei, D., Song, Z., He, Y., & Bayly, A. E. (2021). CFD simulation of tailings slurry thickening in a gravity thickener. *Powder Technology*, 392, 639–649. doi:10.1016/j.powtec.2021.07.047

- Witecki, K., Polowczyk, I., & Kowalczyk, P. B. (2022). Chemistry of wastewater circuits in mineral processing industry—A review. *Journal of Water Process Engineering*, 45, 102509. doi:10.1016/J.JWPE.2021.102509
- Wu, A. xiang, Ruan, Z. en, Li, C. ping, Wang, S. yong, Wang, Y., & Wang, J. dong. (2019). Numerical study of flocculation settling and thickening of whole-tailings in deep cone thickener using CFD approach. *Journal of Central South University*, 26(3), 711–718. doi:10.1007/s11771-019-4041-7
- Yuan, Z., Hu, J., Wu, D., & Ban, X. (2020). A dual-attention recurrent neural network method for deep cone thickener underflow concentration prediction. *Sensors (Switzerland)*, 20(5). doi:10.3390/s20051260

8. ANEXOS

Tabla 8.1. Datos para prueba de sedimentación con 0.2 Cp.

Masa relave [g]	224,696
Volumen de agua [ml]	898,7854
Concentración volumen [Cv]	0.1012
Volumen sólido [ml]	101,2146

Tabla 8.2. Datos para prueba de sedimentación con 0.3 Cp.

Concentración volumen [Cv]	359,223
Volumen de agua [ml]	838.1877
Concentración volumen [Cv]	0,1618
Volumen sólido [ml]	161,8123

Tabla 8.3. Datos para prueba de sedimentación con 0.4 Cp.

Masa relave [g]	512,7021
Volumen de agua [ml]	769,05312
Concentración volumen [Cv]	0,2309
Volumen sólido [ml]	230,9469

Tabla 8.4. Ensayos de sedimentación con 0.2 de Cp.

Concentración de sólido 20%	
t(s)	h(cm)
0	34
30	10
60	9.5
90	9
120	8.8
150	8.8
180	8.8
240	8.7
300	8.6
360	8.6

Tabla 8.5. Ensayos de sedimentación con 0.3 de Cp.

Concentración de sólido 30%	
t(s)	h(cm)
0	34
30	33.9
60	32.3
90	30.5
120	30.5
150	27.6
180	23.8
240	22.6
300	22.5
360	22

Tabla 8.6. Ensayos de sedimentación con 0.4 de Cp.

Concentración de sólido 40%	
t(s)	h(cm)
0	34
30	31.2
60	29.6
90	28.5
120	27.9
150	27.5
180	26.9
240	26.7
300	26.3
360	26

Tabla 8.7. Parámetros de los ensayos operacionales.

Pruebas	RPM	Floculante (ml)	Cp (%)	Cv (%)	Volumen relave (cm ³)	Masa relave (g)	Volumen agua (ml)
1	1.75	20	0.25	0.1305	652.74	1449.09	4347.26
2	2	15	0.25	0.1305	652.74	1449.09	4347.26
3	2.25	20	0.25	0.1305	652.74	1449.09	4347.26
4	2	25	0.25	0.1305	652.74	1449.09	4347.26
5	2	20	0.3	0.1618	809.06	1796.12	4190.94
6	1.75	25	0.3	0.1618	809.06	1796.12	4190.94
7	2.25	15	0.3	0.1618	809.06	1796.12	4190.94
8	20	20	0.35	0.1952	976.02	2166.76	4023.98
9	2	15	0.35	0.1952	976.02	2166.76	4023.98
10	2.25	25	0.3	0.1618	809.06	1796.12	4190.94
11	2.25	20	0.35	0.1952	976.02	2166.76	4023.98
12	1.75	15	0.3	0.1618	809.06	1796.12	4190.94
13	2	25	0.35	0.1305	652.74	1449.09	4347.26