

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA E
INGENIERÍA METALÚRGICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE SEDIMENTACIÓN Y
PRECIPITACIÓN DE METALES PARA OPTIMIZAR EL
TRATAMIENTO DE PULPA DE RELAVES DE LA UNIDAD
MINERA SAN RAFAEL PUNO – PERÚ**

TESIS

PRESENTADA POR:

MARIA LUISA CALANCHA MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA E INGENIERÍA METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE SEDIMENTACIÓN Y PRECIPITACIÓN DE METALES PARA OPTIMIZAR EL TRATAMIENTO DE PULPA DE RELAVES DE LA UNIDAD MINERA SAN RAFAEL PUNO-PERÚ

TESIS PRESENTADA POR:

MARIA LUISA CALANCHA MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:



PRESIDENTE :
Dr. PEDRO ÁLVARO EDWIN GALLEGOS PASCO

PRIMER MIEMBRO :
M.Sc. JULIO ALBERTO MAQUERA GIL

SEGUNDO MIEMBRO :
M. Sc. HIPOLITO CORDOVA GUTIERREZ

DIRECTOR / ASESOR :
Dr. ANTONIO WALTER SARMIENTO SARMIENTO

TEMA: Análisis Instrumental y de Laboratorio
ÁREA : Metalurgia Extractiva

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 21 DE DICIEMBRE DE 2018

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mi madre FABIANA E. MAMANI QUILLA, por ser el pilar más importante en mi vida que con su demostración de una madre ejemplar me ha enseñado a no decaer ni rendirme ante nada y siempre perseverar a través de sus sabios consejos.

A mi hermano JORGE J. Que está en el cielo siempre cuidándome y guiándome a un buen camino.

A mi familia en general, por haberme brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

AGRADECIMIENTOS

- Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia.
- A la Universidad Nacional de Altiplano Alma Mater, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica por las grandes enseñanzas recibidas en sus aulas en todos los años de mi formación profesional.
- Con gran estima y gratitud a mis jurados, Dr. Edwin Gallegos Pasco, M.Sc. Alberto Maquera Gil, M.Sc. Hipolito Cordova Gutierrez y Asesor/Director de Tesis Dr. Walter Sarmiento Sarmiento, por brindarme siempre sus grandes enseñanzas y orientaciones para mi trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	14
ABSTRACT	15

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	17
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.3.1. Hipótesis general.....	18
1.3.2. Hipótesis Específica	18
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	18
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.5.1. Objetivo general	19
1.5.2. Objetivos específicos	20

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL	21
2.1.1. Precipitación química.....	21
2.1.2. Límites máximos permisibles	25
2.1.3. Definición de metal pesado.....	26
2.1.4. Tecnología de la sedimentación	27
2.1.4.1. Definiciones previas	27
2.1.4.2. Separación sólido – líquido.....	27
2.1.5. Factores que influyen en la separación de solido – liquido	28

2.1.5.1. Tamaño de partícula y granulometría	28
2.1.5.2. Concentración de solidos	28
2.1.5.3. Forma y características superficiales de la partícula.....	28
2.1.5.4. Viscosidad y densidad relativa del líquido	29
2.1.6. Sedimentación o espesamiento	29
2.1.7. Leyes de la sedimentación	30
2.1.8. Floculantes	31
2.1.9. Floculación.....	31
2.1.9.1. Floculantes minerales.....	33
2.1.9.2. Floculantes naturales.....	33
2.1.9.3. Floculantes sintéticos	33
2.1.9.4. Floculantes aniónicos.....	33
2.1.9.5. Floculantes no iónicos.....	34
2.1.9.6. Floculantes catiónicos	34
2.1.10. Caracterización de la floculación	34
2.1.11. Caracterización de suspensiones floculadas	35
2.1.12. Medición de la velocidad de sedimentación de flóculos	36
2.1.13. Relaves	37
2.1.14. Producción de relaves	39
2.1.15. Tipos de relaves	39
2.1.16. Rangos de espesamiento	40
2.2. ANTECEDENTES	42

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES	47
-----------------------	----

3.2.	METODOLOGIA	48
3.2.1.	Nivel de investigación.....	48
3.2.2.	Tipo de investigación	48
3.4.	POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO.....	49
3.4.1.	Población.....	49
3.4.2.	Muestra.....	49
3.5.	DISEÑO ESTADÍSTICO	50
3.6.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	50
3.6.1.	Variable independiente.....	50
3.6.2.	Variable dependiente.....	50
3.7.	PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	50
3.7.1.	Caracterización de pulpa de relaves	50
3.7.2.	Selección de floculante	51
3.7.2.1.	Preparación de los floculantes	53
3.7.2.2.	Preparación de pulpa de relave	53
3.7.2.3.	Preparación del floculante.....	54
3.7.2.4.	Calculo de la dosificación del floculante	54
3.7.2.5.	Determinación de la gravedad especifica	55
3.7.2.6.	Determinación de la densidad y % de solidos	56
3.7.2.7.	Determinación experimental de la velocidad de sedimentación.....	57

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	PRUEBAS PRELIMINARES	62
4.1.1.	Ensayos de sedimentación.....	62
4.2.	RESULTADOS LOGRADOS.....	62

4.2.1.	Resultados de la prueba P1 (pH natural= 5.73)	62
4.2.2.	Pruebas de velocidades de sedimentación utilizando diversos floculantes a un pH de 5.73	64
4.2.4.	Análisis de resultados.....	66
4.3.	RESULTADOS DE LA PRUEBA P2 (VARIANDO EL pH A 10.70)	67
4.3.1.	Pruebas de velocidades de sedimentación utilizando diversos floculantes a un pH de 10.70.....	68
4.3.2.	Resumen de velocidades de sedimentación utilizando distintos floculantes a un pH de 10.70.....	70
4.3.3.	Análisis de resultados.....	70
4.4.	CUADRO COMPARATIVO DE VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN ÓPTIMA	71
4.4.1.	Análisis de resultados.....	73
4.5.	ANÁLISIS DE AGUA SEDIMENTADA DE LOS FLOCULANTES RENAFLOC 1120, AR-3120, MTFLOC 4253 Y CHEMLOK 2010.....	74
4.6.	ENSAYOS DE PRECIPITACIÓN DE METALES PESADOS A UN pH DE 5.73 Y 10.70 UNA VEZ REALIZADO LA SEDIMENTACIÓN	75
4.6.1.	Análisis de resultados.....	78
V.	CONCLUSIONES	79
VI.	RECOMENDACIONES.....	80
VII.	REFERENCIAS.....	81
	ANEXOS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Curvas de solubilidad de hidróxidos metálicos en función del pH.....	23
Figura 2: Curvas de precipitación del sulfuro.....	25
Figura 3: Espesador MINSUR.....	30
Figura 4: Interacción de la partícula y el polímero.....	32
Figura 5: Esquema del tamaño y densidad de flóculos producido por floculación de una suspensión mineral antes de espesar.....	35
Figura 6: Distribución de la velocidad de sedimentación con el tamaño individual de flóculos en el rebalse de un espesador de concentrados de zinc en condiciones normales de operación. La línea horizontal es la velocidad del flujo ascendente de agua.	37
Figura 7: Diagrama simplificado de los rangos de espesamiento.....	41
Figura 8: Altura de sedimentación.....	58
Figura 9: Curva de sedimentación	58
Figura 10: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo	64
Figura 11: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo	64
Figura 12: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo	65
Figura 13: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo	65
Figura 14: Desplazamiento de velocidad de sedimentación de distintos floculantes	66
Figura 15: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo	68
Figura 16: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo	68
Figura 17: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo	69

Figura 18:	Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo	69
Figura 19:	Desplazamiento de velocidad de sedimentación de distintos floculantes	70
Figura 20:	Velocidad de sedimentación en cm/min de floculantes de prueba a 2 minutos	72
Figura 21:	Velocidad de sedimentación en cm/min de floculantes de prueba a 5 minutos	72
Figura 22:	Velocidad de sedimentación en cm/min de floculantes de prueba a 10 minutos	72
Figura 23:	Precipitación comparativa inicial a pH 5.73 y 10.70	76
Figura 24:	Precipitación comparativa de CHEMLOK 2010 a pH 5.73 y 10.70.....	77
Figura 25:	Precipitación comparativa de AR - 3120 a pH 5.73 y 10.70.....	77
Figura 26:	Precipitación comparativa de RENAFLOC 1120 a pH 5.73 y 10.70	77
Figura 27:	Precipitación comparativa de MTFLOC 4253 a pH 5.73 y 10.70	78

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicos.....	26
Tabla 2: Tipificación de relaves	40
Tabla 3: Rangos próximos de relaves en la alimentación y la descarga.	42
Tabla 4: Criterios de investigación.	49
Tabla 5: Resumen de las características metalúrgicas de la pulpa de relave de estaño que fue empleado para las pruebas de laboratorio en este estudio.	51
Tabla 6: Parámetro operacional	52
Tabla 7: Datos experimentales para determinar la velocidad de sedimentación.....	63
Tabla 8: Datos experimentales para determinar la velocidad de sedimentación.....	67
Tabla 9: Cuadro comparativo de velocidad de sedimentación.....	71
Tabla 10: Resultados de análisis de agua de laboratorio.....	75
Tabla 11: Muestra de los resultados de la prueba 1 en donde se realizó el análisis de agua a un pH 5.73 para comparar la precipitación de metales.....	75
Tabla 12: Muestra de los resultados de la prueba 2 en donde se realizó el análisis de agua a un pH 10.70 para comparar la precipitación de metales.....	76

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

NTU	:	Unidad de medición para la turbidez
TSS	:	Total de sólidos suspendidos en una solución
Jar – test	:	Práctica de laboratorio
Ge	:	Gravedad específica
Dp	:	Densidad de la pulpa
V	:	Volumen
cm/min	:	Centímetros por minuto
Fe	:	Hierro
Mn	:	Manganeso
Cu	:	Cobre
Zn	:	Zinc
Pb	:	Plomo
Cd	:	Cadmio
Na₂S	:	Sulfuro de sodio
NaHS	:	Sulfhidrato de sodio
MINAM	:	Ministerio del Ambiente
IUPAC	:	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
EUA	:	Agencia de Protección Ambiental

USEPA	:	Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos
LMP	:	Límites Máximos Permisibles
%S	:	Porcentaje de solidos
pH	:	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución
Ca(OH)₂	:	Hidróxido de calcio
g/t	:	Gramos por tonelada
ppm	:	Partes por millón
FeS	:	Sulfuro de hierro
g/L	:	Gramos por litro

RESUMEN

Actualmente en la unidad minera MINSUR – San Rafael se utiliza el floculante CHEMLOK 2010 en el tratamiento de relaves; en tal razón en el presente trabajo de investigación se evaluó la cinética de sedimentación y precipitación de metales a nivel de laboratorio para optimizar el tratamiento de pulpa de relaves de la unidad minera utilizando la metodología de investigación experimental, la estadística descriptiva e inferencial y el programa computacional MICROSOFT EXCEL Y ANOVA. Teniendo en consideración que en el tratamiento de relaves actualmente se utiliza el floculante CHEMLOK 2010; en donde el uso del floculante se da en el espesador 80 y en la relavera, confluyendo así cuatro muestras: relave fino, relave grueso, agua B 2.5 y dren basal; entonces de acuerdo a lo programado se realizaron pruebas de sedimentación, análisis de aguas y precipitación de metales pesados para verificar la efectividad de los reactivos alternativos en el proceso, como los floculantes RENAFLOC 1120 (Rensana), AR-3120 (Arenas), MTFLOC 4253 (Dyschem), comparados con el CHEMLOK 2010 utilizado actualmente en planta y así poder determinar la optimización en el tratamiento de pulpas de relave, llegándose a determinar que en la velocidad de sedimentación y precipitación de metales se obtienen mejores resultados utilizando el floculante RENAFLOC 1120 y se demuestra que la velocidad de sedimentación se incrementa con el aumento del pH de 5.73 a 10.70 de la muestra tratada y en cuanto a remoción de metales, se aprecia una excelente performance del floculante AR-3120 seguido del RENAFLOC 1120, obteniendo bajos valores de Fe y Mn, en tal razón el floculante RENAFLOC 1120, es una excelente alternativa para el tratamiento pulpa de relave, debido a que su eficiencia en la sedimentación de los cuatro tipos de muestras que componen el relave final, es superior a la del floculante de uso estándar CHEMLOK 2010.

Palabras claves: Cinética, optimización, pulpa, relave y sedimentación.

ABSTRACT

Currently, in the MINSUR - San Rafael mining unit, CHEMLOK 2010 flocculant is used in tailings treatment; for this reason in the present research work the kinetics of sedimentation and precipitation of metals at laboratory level was evaluated to optimize the treatment of tailings pulp of the mining unit using the methodology of experimental research, descriptive and inferential statistics and the program COMPUTER MICROSOFT EXCEL AND ANOVA. Taking into account that in the treatment of tailings the flocculant CHEMLOK 2010 is currently used; where the flocculant is used in the thickener 80 and in the reavera, thus converging four samples: fine tailings, thick tailings, water B 2.5 and basal drains; then, according to schedule, sedimentation, water analysis and heavy metal precipitation tests were performed to verify the effectiveness of the alternative reagents in the process, such as the flocculants RENAFLOC 1120 (Renasa), AR-3120 (Sands), MTFLOC 4253 (Dyschem), compared with the CHEMLOK 2010 currently used in the plant and thus be able to determine the optimization in the treatment of tailings pulp, arriving to determine that in the speed of sedimentation and precipitation of metals better results are obtained using the flocculant RENAFLOC 1120 and it is demonstrated that the sedimentation rate increases with the pH increase from 5.73 to 10.70 of the treated sample and in terms of metal removal, an excellent performance of the AR-3120 flocculant is observed followed by the RENAFLOC 1120, obtaining low Fe values and Mn, in such a reason the flocculant RENAFLOC 1120, is an excellent alternative for the treatment of tailings pulp, due to the The efficiency of the sedimentation of the four types of samples that make up the final tailings is higher than that of the CHEMLOK 2010 standard flocculant.

Keywords: Kinetics, optimization, pulp, tailings, and sedimentation.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La Unidad de Minera MINSUR S.A. - San Rafael, es la única mina productora de estaño en el Perú y la tercera productora a nivel mundial en donde la producción es tratada en una compleja planta con procesos gravimétricos y flotación de la casiterita, produciendo 67.375 TM de concentrados con contenidos de 61 % Sn. con una recuperación del 90 %. La importancia en el consumo del recurso hídrico en la industria minero- metalúrgico hace necesario aumentar los esfuerzos en recuperar la mayor cantidad de agua posible desde los procesos de separación sólido-líquido y adicionalmente los desafíos futuros de la minería en nuestro país se focalizan en la reducción de costos, por ejemplo en el consumo de recursos como floculante y la seguridad para las personas y el medio ambiente. De los procesos de concentración de minerales implican la generación de dos productos, uno valioso denominado concentrado y otro de descarte denominado relaves; la generación de estos últimos merece un tratamiento especial en lo que respecta a su disposición, especialmente hay que considerar que la escala de producción es mucho mayor si tenemos en cuenta el radio de concentración.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Planta Concentradora de Estaño de la unidad minera San Rafael, luego del proceso de concentración gravimétrica y de flotación de estaño, genera cuatro tipos de relaves, en donde los relaves minero-metalúrgicos que se desechan en forma de pulpa generalmente tienen grandes cantidades de agua y su reutilización en el proceso a través

de operaciones de recuperación de agua más eficientes es importante para la implementación de proyectos de menor impacto ambiental.

Frente a la necesidad de mejorar continuamente los procesos y operaciones de la planta concentradora, se presenta la alternativa de evaluar nuevas posibilidades de mejora en el tratamiento de pulpa de relaves seleccionando los floculantes adecuados, en donde haciendo uso de las pruebas de laboratorio se demuestre los mejores tiempos de sedimentación en donde se seleccionará y se propondrá el uso de aquel floculante para la operación de pulpas de relaves a la empresa MINSUR.

La disposición de relaves minero-metalúrgicos históricamente ha sido en forma de pulpa, y en grandes extensiones destinadas para tal propósito, las cuales requieren de grandes inversiones asociadas a infraestructura y obras de ingeniería, y además en la mayoría de casos representan un alto costo operativo. En tal caso reevaluando la performance de los floculantes RENAFLOC 1120 (Renasa), AR – 3120 (Arenas), MTFLOC 4253 (Dyschem), comparados con el CHEMLOK 2010 utilizado actualmente en planta permitirá presentar una alternativa de mejor costo beneficio para el tratamiento de pulpa de relaves.

1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

Para el desarrollo del presente proyecto se formuló la siguiente interrogante: ¿Evaluando la cinética de sedimentación y reducción de metales de los floculantes RENAFLOC 1120 (Renasa), AR – 3120 (Arenas), MTFLOC 4253 (Dyschem), comparados con el CHEMLOK 2010 a nivel de laboratorio será posible optimizar el tratamiento de pulpa de relaves de la unidad minera san Rafael?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

Evaluando la cinética de sedimentación y reducción de metales a nivel de laboratorio se optimiza el tratamiento de pulpa de relaves de la unidad minera san Rafael.

1.3.2. Hipótesis Específica

- Evaluando la eficiencia de los floculantes RENAFLOC 1120, AR-3120 y MTFLOC 4253 con el CHEMLOK 2010 se determina la velocidad de sedimentación.
- Evaluando la eficiencia de los floculantes RENAFLOC 1120, AR-3120 y MTFLOC 4253 con el CHEMLOK 2010 se determina la precipitación de metales.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

La correcta y/o mejor disposición de la pulpa de relaves generados por el beneficio de minerales, especialmente cuando se tratan de pulpas que contienen mineral finamente molido, que es un requerimiento de los procesos de flotación por espumas; es de preocupación que la empresa minera MINSUR San Rafael, dedique su esfuerzo para establecer las mejores tecnologías con este fin.

En tal razón todos los proyectos minero-metalúrgico tienen como criterio maximizar la recuperación de agua del proceso; dentro de este contexto, la recuperación de agua desde el relave, ya sea antes de salir de la planta o en los depósitos, ha tomado mayor relevancia durante los últimos años, lo que ha generado un desarrollo permanente

de las tecnologías de espesamiento y un mayor enfoque a las investigaciones relacionadas con el tratamiento de las pulpas de relave.

En la actualidad, en la unidad minera MINSUR – San Rafael, se utiliza el floculante Chemlok 2010 en el tratamiento de relaves, la importancia en el consumo del recurso hídrico en la industria minero metalúrgico en general, hace necesario aumentar los esfuerzos en recuperar la mayor cantidad de agua posible desde los procesos de separación sólido-líquido.

Adicionalmente, los desafíos futuros de la minería en nuestro país, se focalizan en la reducción de costos, en nuestro proceso, por ejemplo en el consumo y comparación de diversos floculantes, verificando la calidad, velocidad de sedimentación, precipitación de metales variando el pH., y la seguridad para las personas y el medioambiente con la finalidad de implementar mejoras en Planta Concentradora San Rafael.

En ese contexto la presente investigación se justifica porque mostrará la fenomenología de la separación sólido/líquido para optimizar el manejo de los relaves y la recuperación y/o posterior tratamiento del agua de proceso en la planta metalúrgica, de tal forma que los floculantes que se seleccionen realizando pruebas en laboratorio puedan reemplazar a los actualmente utilizados y trabajar óptimamente.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la cinética de sedimentación y reducción de metales a nivel de laboratorio para optimizar el tratamiento de pulpa de relaves de la unidad minera San Rafael Puno-Perú.

1.5.2. Objetivos específicos

- Evaluar la eficiencia de los floculantes RENAFLOC 1120, AR-3120 y MTFLOC 4253 con el CHEMLOK 2010 para determinar la velocidad de sedimentación.
- Evaluar la eficiencia de los floculantes RENAFLOC 1120, AR-3120 y MTFLOC 4253 con el CHEMLOK 2010 para determinar la precipitación de metales.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL

2.1.1. Precipitación química

Consiste en la eliminación del ión metálico indeseable disuelto, por adición de un reactivo que forme un compuesto insoluble con el mismo. Normalmente, las especies metálicas en disolución precipitan al aumentar el pH. El proceso tiene lugar al de solubilizarse el metal y formarse el precipitado.

Este es el método más común para la eliminación de metales pesados en la industria minera-metalúrgica de pulpa de relaves, en el que se añade $Ca(OH)_2$ para obtener un pH alcalino. La capacidad de eliminación de los metales por precipitación química depende de los siguientes factores:

- a. La solubilidad de la especie más soluble del metal que puede formarse, la cual es función del producto de solubilidad, pH del medio y concentración de la especie precipitante.
- b. La separación del sólido de la disolución acuosa. Estos factores hacen que la precipitación sea poco efectiva cuando el metal se encuentra en concentraciones muy bajas, ya que se necesita un exceso de agente precipitante para llegar a formar un precipitado y en muchos casos, la partícula sólida formada no tiene estabilidad suficiente para separarse de la disolución.

A. Precipitación de Hidróxidos

Este proceso involucra la adición de soda cáustica o cal para ajustar el pH de la solución al punto de solubilidad mínima. La concentración del metal residual total es una función compleja del pH, con la concentración de metal residual más baja que ocurre a algún valor de pH óptimo.

La concentración residual aumentará cuando el pH baje o suba del valor óptimo. La precipitación de hidróxidos es simple, eficaz y muy práctica, pero tiene limitaciones debido a las altas solubilidades y a las propiedades anfóteras de ciertos hidróxidos de metal (los metales anfóteros actúan como ácidos y bases y se re disuelven en exceso de soluciones ácidas o alcalinas).

Además, las solubilidades mínimas para los diferentes metales ocurren a diferentes valores de pH y la precipitación de los hidróxidos individuales sólo ocurre en un rango de pH estrecho, tal como se observa en la Figura 1: Curvas de solubilidades de hidróxidos metálicos.

Por estas razones, la eficiencia máxima de remoción de una mezcla de metales no puede ser lograda a un solo pH de precipitación simple. Por consiguiente, dependiendo de las metas del tratamiento, pueden requerirse múltiples fases de precipitación a diferentes niveles de pH.

El tratamiento por precipitación de hidróxidos solo puede ser adecuado para lograr algunas metas del tratamiento.

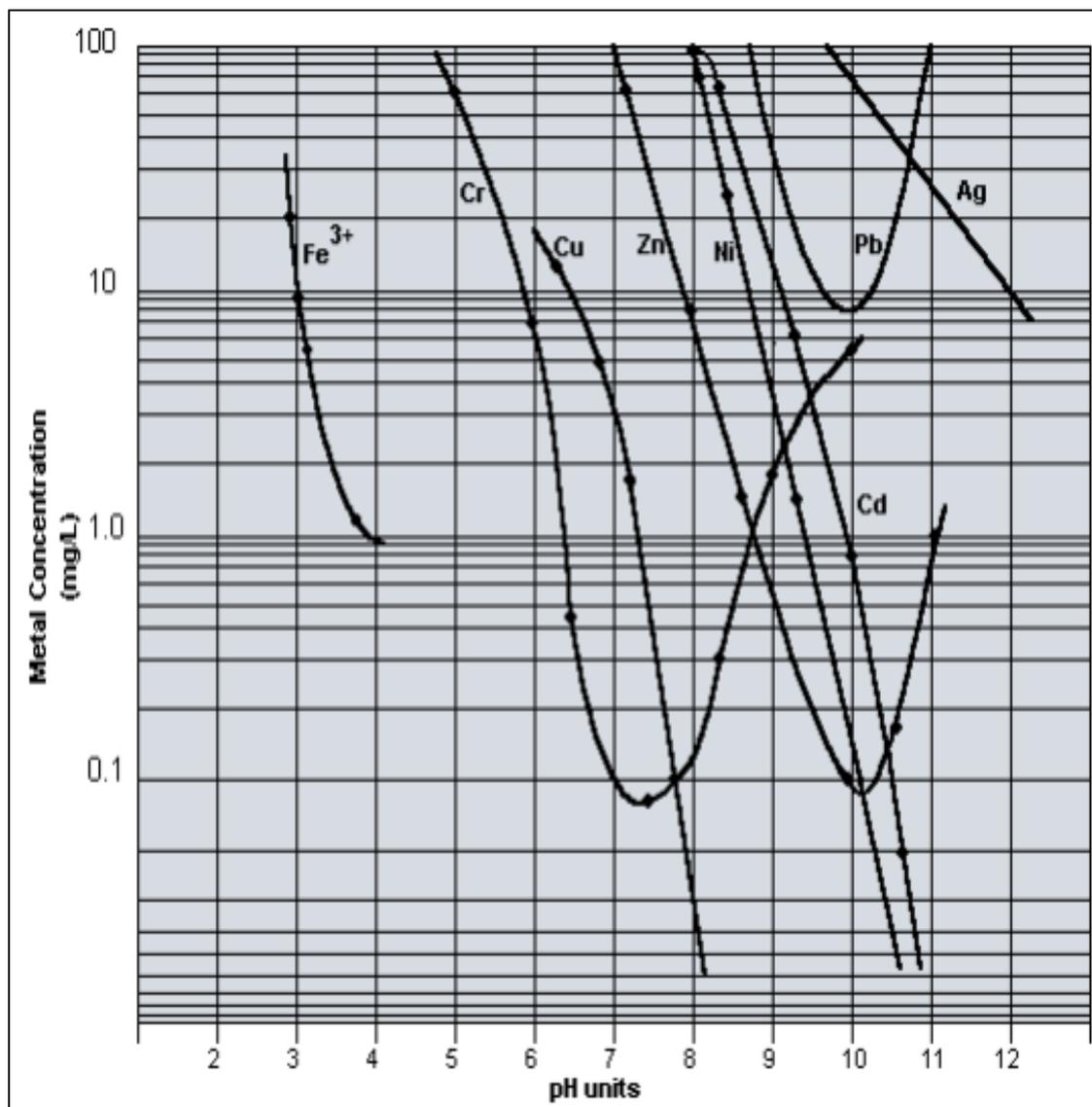


Figura 1: Curvas de solubilidad de hidróxidos metálicos en función del pH.

FUENTE: ACS medio ambiente, 1998-2001.

B. Precipitación de Sulfuros

Este método de precipitación ofrece ventajas debido principalmente a la alta reactividad de los sulfuros con los iones de los metales pesados y las solubilidades muy bajas de los sulfuros metálicos en un amplio rango de pH.

Los metales pueden ser removidos por precipitación con sulfuros a concentraciones extremadamente bajas a un solo pH, como se puede observar en la Figura 2: Curvas de Solubilidad de Sulfuros Metálicos. Por consiguiente, la precipitación de

sulfuros puede ser un tratamiento alternativo viable cuando la precipitación de hidróxidos no es posible, o efectiva en la remoción de iones metálicos a bajas concentraciones.

El grado de precipitación de los sulfuros metálicos es una función del pH, tipo de metal, dosificación de sulfuros y presencia de iones interferentes.

Los métodos actuales de precipitación de sulfuros – el método de sulfuro soluble y el método de sulfuro insoluble – difieren en la técnica de entregar iones. El método de sulfuro soluble implica la adición de soluciones de Na_2S o NaHS al agua.

El método de sulfuro insoluble usa un sulfuro económico, como el FeS . Alguna precipitación de sulfuro ocurre naturalmente en los sistemas de precipitación de hidróxidos convencionales porque se encuentran a menudo a niveles bajos de sulfuros en el agua no tratada.

Los métodos de precipitación de sulfuros actuales tienen varias desventajas. La adición de Na_2S normalmente produce partículas coloidales no muy finas que sedimentan pobremente y deben tratarse con coagulantes y floculantes antes de una clarificación final.

El uso de FeS requiere una cantidad excesiva de reactivo y produce una cantidad grande de lodo debido a la acumulación de hierro, para minimizar estos problemas, se puede usar sulfuro de calcio como fuente de sulfuro.

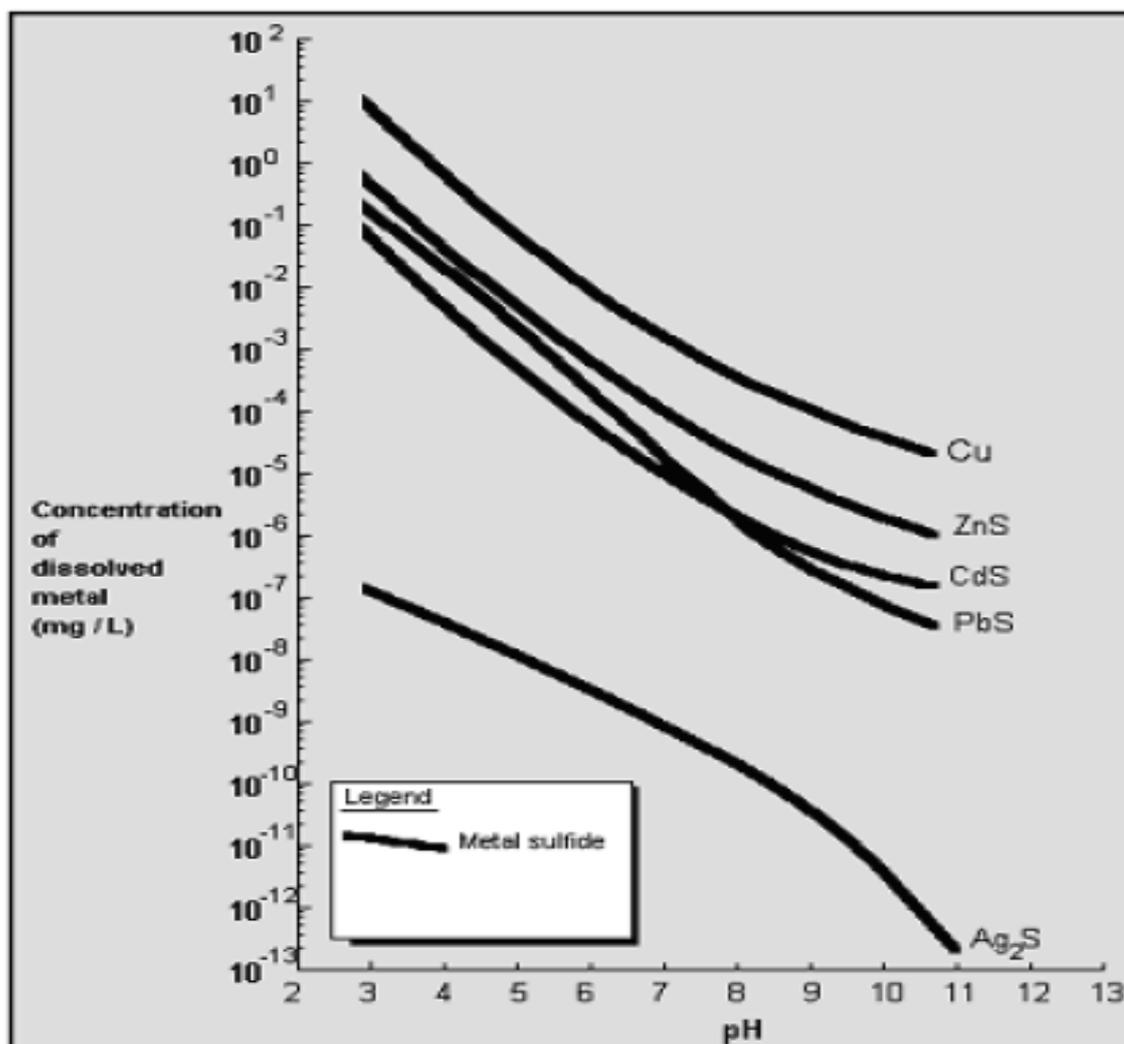


Figura 2: Curvas de precipitación del sulfuro.

FUENTE: ACS medio ambiente, 1998-2001.

2.1.2. Límites máximos permisibles

La descarga de efluentes líquidos de las actividades minero- metalúrgicas está regulada por los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por la norma actualizada en el D.S. N° 010-2010 MINAM. Los LMP están definidos en términos de valores absolutos de concentración (salvo en el caso del pH) para una lista de parámetros, sin considerar el volumen de descarga ni la capacidad de asimilación del cuerpo receptor.

La norma de LMP según el D.S. N° 010-2010 MINAM, establece dos series de valores. La primera (valor en cualquier momento) se aplica a cualquier muestra y

representa el límite absoluto que nunca debe excederse. La segunda (promedio anual) se aplica al promedio de los valores obtenidos a lo largo de un periodo de un año.

Tabla 1: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicos.

Parámetros	Unidades	Límites en cualquier momento	Límites para el promedio anual
pH	mg/L	6 - 9	6 – 9
Sólidos totales en suspensión	mg/L	50	25
Aceites y grasas	mg/L	20	16
Cianuro total	mg/L	1	0.8
Arsénico total	mg/L	0.1	0.08
Cadmio total	mg/L	0.05	0.04
Cromo hexavalente (*)	mg/L	0.1	0.08
Cobre total	mg/L	0.5	0.4
Hierro disuelto	mg/L	2	1.6
Plomo total	mg/L	0.2	0.16
Mercurio total	mg/L	0.002	0.0016
Zinc total	mg/L	1.5	1.2

FUENTE: MINAM.

2.1.3. Definición de metal pesado

El término “metal pesado” no se encuentra bien definido. Es de destacar que hasta el presente, no se dispone de una definición oficial generalmente aceptada, ni de un listado de esos elementos, ni de una referencia clara y exacta de las propiedades o caracteres de los metales pesados que provenga de alguna sociedad científica u organismos referente de alto nivel, como podría ser, por ejemplo, la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) o la USEPA, (Agencia de Protección Ambiental de los EUA) (Hawkes, 1997 y Sengupta, 2002). No obstante, en las últimas

décadas, se han empleado diversos criterios o pautas para definir los metales pesados, aunque las definiciones usadas hasta ahora no resultan claras, específicas o completas.

En general la expresión “metales pesados” se usa cuando hay una connotación de toxicidad. Entre los elementos que suelen citarse como “metales pesados”, se cuentan principalmente el plomo, el cadmio, el mercurio, el arsénico, el zinc, el cobre, el hierro, el cromo y el níquel.

2.1.4. Tecnología de la sedimentación

2.1.4.1. Definiciones previas

Los elementos y compuestos en la naturaleza se presentan en 3 fases: fase sólida, líquida y gaseosa. Un fluido puede contener más de una fase y seguir comportándose como tal. De acuerdo a este criterio, los fluidos pueden ser clasificados como:

- **Unifásicos:** Líquido o gas.
- **Bifásicos:** Líquido-gas, líquido-sólido o gas-sólido.
- **Multifásicos:** Fluidos que contienen los tres estados.

En el caso que nos compete, los relaves son considerados fluidos bifásicos compuestos de una fase sólida (mineral) y una fase líquida (agua). En el presente estudio haremos referencia a este tipo de fluidos simplemente como “pulpas de relave”.

2.1.4.2. Separación sólido – líquido

La mayor parte de operaciones de beneficio de minerales emplean el uso de cantidades significativas de agua para su tratamiento. Para lograr la separación sólido/líquido posterior se cuenta actualmente, de manera general, con tres metodologías: espesamiento, filtración y secado térmico.

En general, 75% a 80% del agua puede ser removida por medio de espesadores y cerca del 90% con filtros en etapas posteriores.

El espesamiento es la técnica de desaguado más ampliamente usada debido a que es relativamente barato, permite una alta capacidad de procesamiento y provee las mejores condiciones para la floculación debido a sus muy bajas fuerzas de corte.

2.1.5. Factores que influyen en la separación de sólido – líquido

2.1.5.1. Tamaño de partícula y granulometría

Generalmente las partículas finas tienen ratios más bajas en sedimentación. Un incremento del área superficial significa una menor concentración en la salida inferior del concentrador (Under Flow) en la descarga.

2.1.5.2. Concentración de sólidos

El incremento de la concentración de sólidos generalmente minimizará el tamaño de los equipos requeridos y el costo en todas las etapas de separación de sólido – líquido. La mayor parte de los espesadores son diseñados sobre la base de la unidad de área requerida (metro cuadrado por tonelada corta seca por día) que disminuirá conforme aumenta la concentración de sólidos en la alimentación.

2.1.5.3. Forma y características superficiales de la partícula

Normalmente la forma óptima de la partícula es la esférica con porosidad cero. Cuando cualquiera de estos factores se aleja de su estado ideal, las dificultades se incrementan. Las características químicas de la superficie de las partículas van a influir en factores como la dosificación de floculantes.

2.1.5.4. Viscosidad y densidad relativa del líquido

El incremento de la viscosidad disminuirá las ratios de sedimentación. Un mantenimiento de temperaturas altas será siempre deseable puesto que va a disminuir la viscosidad del agua.

2.1.6. Sedimentación o espesamiento

Se define el espesamiento como el proceso mediante el cual, por acción de la gravedad, se provoca a partir de una mezcla bifásica el asentamiento de las partículas sólidas suspendidas en un líquido, generando una pulpa espesada en la parte inferior y un líquido clarificado sobrenadante en la parte superior. Si bien, los más importantes desarrollos tecnológicos modernos para el espesamiento se han desarrollado en la industria minera, en especial en la industria metalúrgica, donde las aplicaciones más exigentes y robustas han sido requeridas, hoy en día encontramos soluciones en la industria química y de aguas residuales, entre otras.

Podemos decir que el objetivo general del proceso de espesamiento es eliminar parcialmente el agua de la pulpa de alimentación, para producir una pulpa espesada. Como la pulpa asentada tiene mayor concentración, de sólidos (mayor densidad) que la pulpa original que ingreso al contenedor, se dice que se ha espesado.



Figura 3: Espesador MINSUR.

2.1.7. Leyes de la sedimentación

En los procesos de sedimentación juega un papel importante la relación de dilución, así como el tamaño de la partícula. De manera práctica, se observa que al verter una pulpa diluida en un cilindro y si se deja asentar, se observa lo siguiente:

- Las partículas más gruesas son las primeras en llegar al fondo con relativa facilidad y con mayor velocidad que las de menor tamaño.
- Enseguida a la sedimentación de las partículas gruesas, sigue la de los limos llenando los intersticios entre las partículas más gruesas.
- Las partículas más finas, las cuales se asientan lentamente, permanecen en suspensión en la parte superior.

En general el movimiento de todas las partículas suspendidas en un fluido, salvo las coloidales, están gobernadas por las leyes de Stokes, (también llamadas leyes de Newton), las cuales son directamente proporcionales al tamaño de las partículas. La ley

de Stokes determina la velocidad terminal (W) de la partícula en un fluido cualquiera, tal como se presenta en la siguiente ecuación.

$$W = \frac{2 (SG_S - SG_L)}{9n} gR^2$$

Dónde:

- W : Velocidad terminal
- SG_S : Gravedad específica del sólido
- SG_L : Gravedad específica del líquido
- n : viscosidad del fluido
- g : Aceleración de la gravedad
- R : Radio esférico de la partícula

2.1.8. Floculantes

Los floculantes son Polímeros orgánicos de cadena larga y alto peso molecular (> 100), solubles en agua, que, al formar puentes o uniones entre partículas, forman una partícula de un mayor tamaño aparente, dando lugar a agrupaciones de partículas que sedimentaran más rápido, acelerando de esta forma el proceso de separación sólido líquido.

2.1.9. Floculación

La floculación es un proceso en el cual una sustancia dispersa se separa del líquido que la contiene en forma de partículas pequeñas, por acción de un floculante. En la industria minera-metalúrgica, los floculantes utilizados son polímeros sintéticos de alto peso molecular, cuyas moléculas son de cadena larga y con gran afinidad por las

superficies sólidas. Estas macromoléculas se fijan por adsorción a las partículas y provocan así la floculación. La ventaja de los floculantes sintéticos es que su estructura molecular, en términos de su contenido químico como peso molecular y su grado de hidrólisis, o ionicidad, pueden ser diseñada a voluntad de acuerdo a las necesidades encontradas en la industria.

Como son producidos a partir de materias primas químicas, su calidad es más consistente que la de floculantes naturales. Además, pueden ser diseñados con pesos moleculares mucho mayores que los encontrados en la naturaleza, lo que les da una ventaja técnica y económica. La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas primero en micro lóculos, y más tarde en aglomerados voluminosos llamados flóculos. Estos flóculos inicialmente son pequeños, pero se juntan y forman aglomerados mayores capaces de sedimentar como se muestra en la figura 4: Para favorecer la formación de aglomerados de mayor tamaño se adicionan un grupo de productos denominados floculantes.

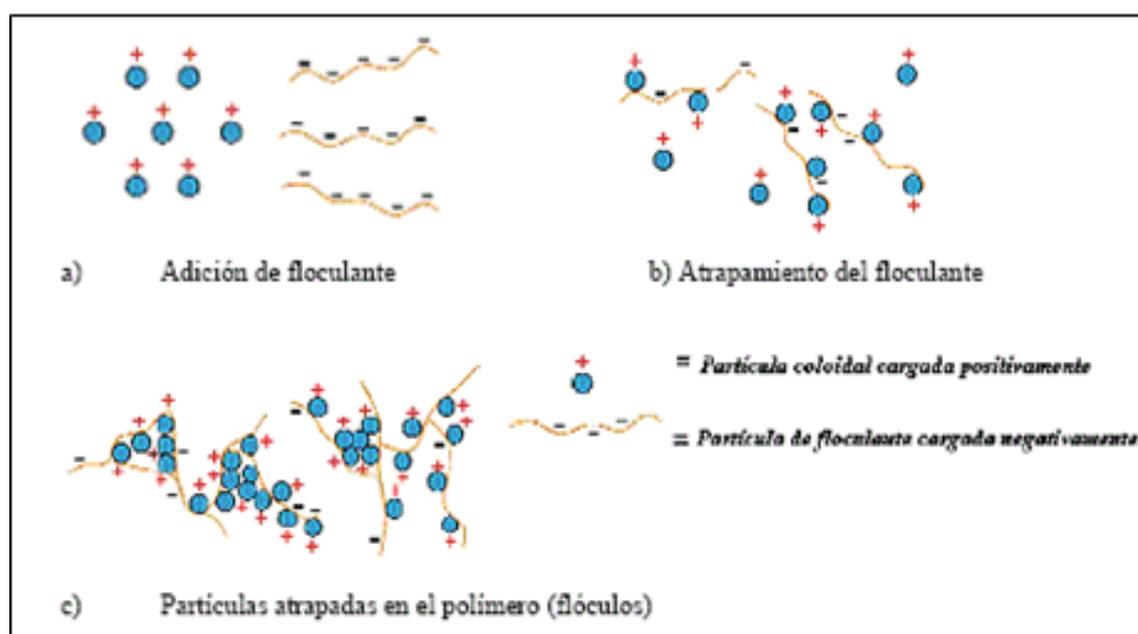


Figura 4: Interacción de la partícula y el polímero.

FUENTE: Imagen tomada de www.revistasbolivianas.org.bo.

Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas.

Los polímeros se tipifican a continuación:

2.1.9.1. Flocculantes minerales

Son compuestos muy coloidales que reaccionan por absorción o por neutralización de las cargas de las partículas en suspensión, sílice activada, bentonita, hidróxido férrico, etc.

2.1.9.2. Flocculantes naturales

Son polímeros solubles en agua, los más comunes son los derivados amílicos, los polisacáridos, los alginatos, (extractos de algas).

2.1.9.3. Flocculantes sintéticos

Son polímeros sintéticos de peso molecular muy alto, solubles en agua, los flocculantes sintéticos incluyen tipos no iónico, aniónico y catiónicos, de varios tamaños de moléculas todo ello para proporcionar un rendimiento óptimo en cualquier tipo de suspensión.

En el mercado de reactivos químicos existen tres tipos de flocculantes sintéticos más usados

2.1.9.4. Flocculantes aniónicos

Son los más usados en la sedimentación de pulpas de minerales y concentrados, tales como Cu, C, Pb, Zn, etc. Estos son eficientes en la mayoría de las suspensiones que

contienen minerales u otros solidos inorgánicos, particularmente bajo condiciones neutras o alcalinas. Los consumos o dosificaciones típicos varían entre 2 a 50 g/t (gramos de floculante por tonelada de solidos secos).

2.1.9.5. Floculantes no iónicos

Son también usados en la sedimentación de pulpas de minerales de Fe y flotación de Oro etc., son muy efectivos en pulpas acidas. Los consumos o dosificaciones típicos varían entre 1 a 50 g/t. También pueden usarse como ayuda filtrante.

2.1.9.6. Floculantes catiónicos

Son principalmente usados en la sedimentación de desperdicios de carbón, lamas de mineral de hierro y concentrados de minerales, etc. Estos son eficientes en los sistemas que contienen solidos orgánicos o con pH bajo. Los consumos o dosificaciones típicos varían entre 25 a 250 g/t. Son también efectivos para la clarificación de las aguas extraídas de la mina en dosificaciones de 5 a 50 g/t.

2.1.10. Caracterización de la floculación

A pesar del extensivo uso de floculantes de alto peso molecular en el procesamiento de minerales, las propiedades físicas de éstos no son bien conocidas.

En particular, poco se sabe de la distribución de su peso molecular, debido a la dificultad de caracterizar polímeros de cadena larga sensitivos al cizalle. Esta información es esencial para entender y predecir el comportamiento del floculante.

2.1.11. Caracterización de suspensiones floculadas

La efectividad de la mayoría de los espesadores en la industria minera descansa en la capacidad de reactivos químicos, floculantes, de agregar las partículas finas de la suspensión de alimentación formando flóculos.

La floculación de una suspensión produce flóculos de diversos tamaños y densidades y exhibe una gran irregularidad de forma. Ver figura 5.

Estas propiedades tienen un profundo efecto en las propiedades de desaguado de la suspensión, controlando la velocidad de sedimentación, la consolidación y la reología del sedimento.

La medición de las propiedades de flóculos en una suspensión es compleja debido a la naturaleza frágil de los flóculos y se debe cuidar que la técnica de medición no altere su tamaño o estructura.

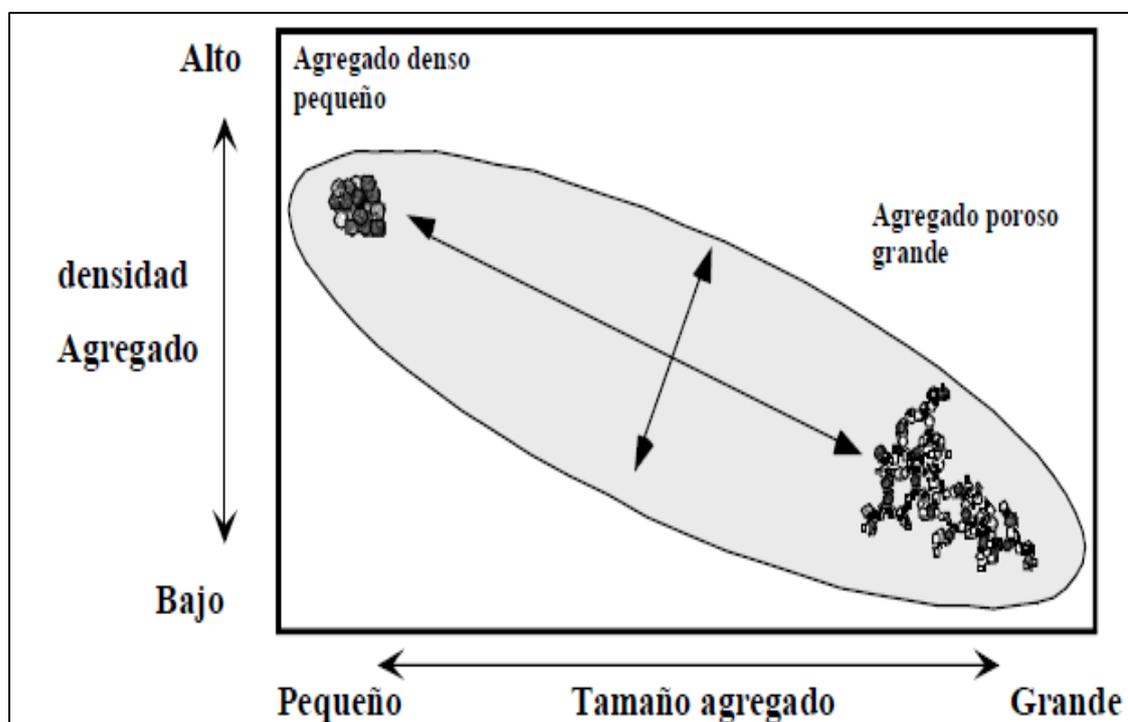


Figura 5: Esquema del tamaño y densidad de flóculos producido por floculación de una suspensión mineral antes de espesar.

2.1.12. Medición de la velocidad de sedimentación de flóculos

La claridad del rebalse es un criterio clave en muchas operaciones de procesamiento de minerales, especialmente en aquellos procesos de sedimentación gravitacional que preceden la precipitación, electrodeposición (refinerías de cobre y de zinc) o extracción por solventes (hidrometalurgia del cobre o del níquel).

El rebalse de espesadores con mucho material sólido puede ser detectado fácilmente mediante el uso de un sistema de video/magnificación que mide el tamaño y velocidad de sedimentación de los sólidos bajo condiciones quasi-estáticas.

Así se puede identificar si el alto contenido de sólidos se debe a: (1) una mala floculación, (2) flotación de los agregados por burbujas, (3) floculante no disperso, ojo de pez, (partículas que se ven pegadas a un glóbulo de gel), (4) ruptura de flóculos (evidenciado por la presencia de flóculos pequeños de baja velocidad de sedimentación) o (5) cortocircuito de la alimentación al rebalse (indicando la presencia de agregados que sedimentan más rápidamente que el promedio de la velocidad de ascenso del agua en el Espesador). Mediciones indicando este último diagnóstico fueron hechas en el Espesador de una refinería de zinc bajo condiciones normales de operación. Ver figura 6.

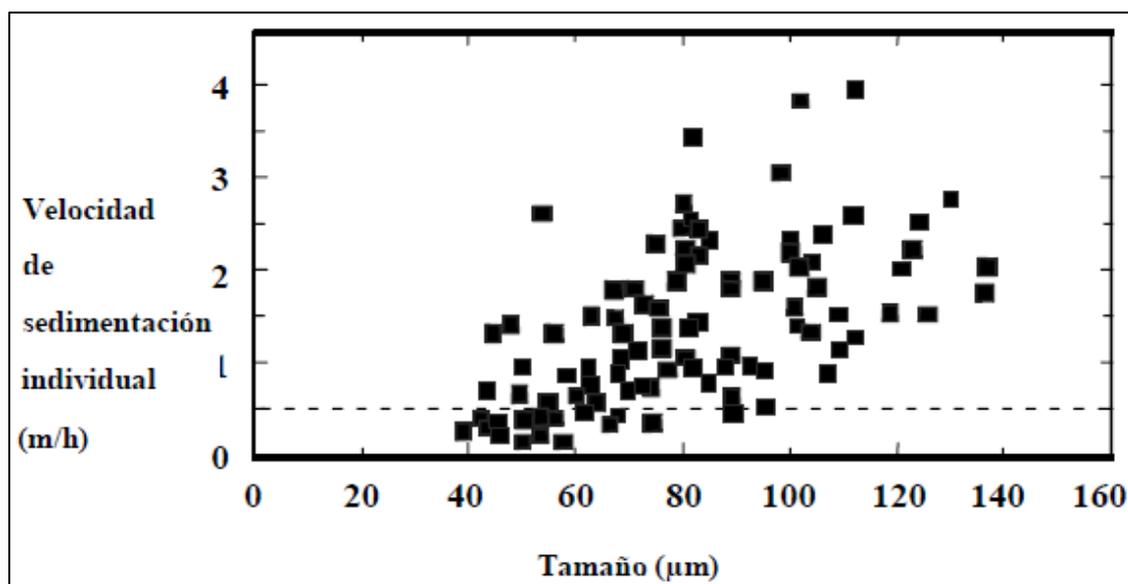


Figura 6: Distribución de la velocidad de sedimentación con el tamaño individual de flóculos en el rebalse de un espesador de concentrados de zinc en condiciones normales de operación. La línea horizontal es la velocidad del flujo ascendente de agua.

2.1.13. Relaves

Los relaves se definen como el desecho mineral sólido de tamaño entre arena y limo, provenientes de los procesos de concentración, y son producidos, transportados y depositados en forma de lodo.

Los relaves son residuos que provienen de los procesos para el tratamiento de los minerales en las plantas concentradoras y son casi siempre transportados desde la concentradora a través de una tubería, en forma de pulpa (mezcla de agua y sólidos), en concentraciones que van de 20 a 50% de sólidos en peso, después de recuperar algo del agua del proceso en tanques conocidos como espesadores. En los depósitos de relaves la pulpa es descargada desde la cresta del dique, y conforme los sólidos se asientan, a partir de la pulpa descargada, se forma una playa de leve inclinación que se extiende desde el punto de descarga hasta la poza de decantación, donde el agua remanente de la pulpa se acumula para ser recirculada a la planta concentradora o ser vertida a un cuerpo receptor, que puede ser una quebrada, un río o una laguna.

Los relaves están compuestos de:

Sólidos suspendidos: constituidos por la ganga y una muy pequeña cantidad de material valioso. Normalmente la parte sólida es roca molida semejante a la arena, que no se disuelve en el agua ni sus contenidos metálicos se transforman químicamente.

Metales en solución, en pequeñas concentraciones, provenientes de la planta de flotación.

Reactivos usados en el proceso: agentes químicos empleados en la flotación como: cianuro de sodio, ditiofosfatos, xantatos, cromatos, sulfitos, sulfato de cobre, sulfato de zinc, ácidos grasos, alcoholes, aceites, y modificadores del pH: como cal, hidróxido de sodio, caliza, carbonato de sodio, ácido sulfúrico y/o sulfuro de sodio entre otros, dependiendo del requerimiento metalúrgico específico de cada operación.

El tamaño de los depósitos de relaves condiciona el tiempo de retención, para la sedimentación de las partículas finas (sólidos suspendidos) del relave y la descomposición del cianuro y los compuestos orgánicos.

La mayoría de los reactivos de flotación existen en formas no tóxicas para los humanos y la vida acuática. Generalmente se aplican en pequeñas concentraciones en las operaciones y estos reactivos orgánicos de flotación se descomponen rápidamente y son rara vez responsables de algún impacto ambiental serio

Los relaves derivados de la extracción de metales básicos (cobre, plomo y zinc), y de metales preciosos (oro, plata) son los que dominan la industria minera peruana.

Si las aguas de la descarga de la poza de relaves no cumplen con los Límites Máximos Permisibles, deberá tener un tratamiento adicional, que dependerá de los parámetros que superen dichos límites.

2.1.14. Producción de relaves

La tecnología de producción de relaves densificados o relaves espesados a muy baja humedad, ha experimentado un progreso muy rápido desde sus inicios en 1995, ventajas técnico-económicas y beneficios ambientales considerables en el campo de la disposición de desechos mineros.

Hoy en día, las presiones legislativas y ambientales, la necesidad por conservación de los recursos hídricos, así como los ahorros en capital hacen aún más atractiva la implementación de disposición superficial de relaves espesados.

En el proceso de espesamiento los relaves pasan a través de espesadores donde las partículas sólidas se depositan en el fondo y son extraídos luego, a mayor densidad, en la descarga para ser finalmente descargados en la zona de disposición. La mayor parte del agua de proceso es extraída de la parte superior del espesador y retornada a la planta.

La principal diferencia en cuanto a la filosofía en el manejo de relaves convencionales, y el de los relaves espesados o relaves en pasta, radica en que en los sistemas de disposición de relaves convencionales, las propiedades de los relaves son fijadas por la planta de procesamiento y por ende todos los diques de confinamiento, estructuras de control, sistemas de transporte, etc. deben ser diseñados de acuerdo a los que estos imponen por su propia naturaleza; mientras que en los sistemas de disposición de relaves espesados o en pasta en cambio, las propiedades de los relaves son diseñados para satisfacer la topografía del área de disposición de una manera más segura y amigable con el medio ambiente.

2.1.15. Tipos de relaves

Por la condición en que se encuentran en ese momento pueden ser:

- **Relaves activos u operativos**

Relave que se encuentra en operación o es parte de una faena minera activa.

- **Relave inactivo**

Relave sin operación en proceso de cierre o reapertura.

- **Relave abandonado**

Relave en desuso y en abandono, del cual nadie se hace cargo. Muchos de ellos son real peligro para la población y medio ambiente.

Los relaves también se pueden tipificar de la siguiente manera:

Tabla 2: Tipificación de relaves.

Por su naturaleza química	<ul style="list-style-type: none"> • Alcalinos • Ácidos
Por su granulometría	<ul style="list-style-type: none"> • Gruesos • Finos
Según el proceso metalúrgico	<ul style="list-style-type: none"> • Flotación • Gravimétrico

FUENTE: Elaboración propia.

2.1.16. Rangos de espesamiento

El rango de espesamiento de una pulpa está en función a la cantidad de agua que es posible extraer en el proceso de espesamiento, y en general es afectado por la distribución de tamaño de partículas, mineralogía, tipo de floculante empleado, dilución previa, etc.

Las pruebas en los tipos de relaves y plantas de procesamiento alrededor del mundo, incluyendo relaves de oro, plata, cobre, estaño, zinc, bauxitas, fosfatos, diamantes, etc. demostraron la factibilidad para la producción de relaves espesados.

La conversión de espesamiento convencional a espesado puede ser realísticamente alcanzada por cualquier operación existente, sin embargo, el requerimiento más importante es el contenido de finos (menos de 20 micrones) de al menos 15% para asegurar una buena transportabilidad y consistencia.

A continuación, se presenta un diagrama simplificado de los rangos de espesamiento o desaguado.



Figura 7: Diagrama simplificado de los rangos de espesamiento.

Cada relave es distinto, es por ello que no existe un porcentaje de sólidos que indique para todos los materiales, la transición entre una pulpa convencional a una pulpa espesada o pasta. En la práctica los contenidos de sólidos de una pasta varían desde 40 a

90% de sólidos en peso, debido a la mineralogía, distribución de tamaño de partícula, contenido de arcillas, forma de partícula, fuerzas electrostáticas y dosificación de floculante. Este concepto es de vital importancia al momento de comparar procesos de espesamiento de otros materiales.

Tabla 3: Rangos próximos de relaves en la alimentación y la descarga.

APLICACIÓN	ALIMENTACIÓN	DESCARGA
Carbón	0.5 – 6	20 – 40
Concentrado de cobre	15 – 30	50 – 70
Relaves de cobre	10 – 30	45 – 65
Cianuración de oro	10 – 25	50 – 65
Concentrados de hierro	15 – 25	50 – 65
Relaves de hierro	10 – 20	40 – 60
Hidróxido de magnesio	3 – 10	15 – 30
Lamas de fosfato	1 – 5	10 – 16
Lamas de ceniza de soda	1 – 2	10 – 20
Mineral de uranio	15 – 25	40 – 60

FUENTE: Elaboración propia.

En la tabla 3 se tiene algunas aplicaciones a distintos relaves donde los valores de porcentaje de sólidos en la alimentación y en la descarga están en un rango diferente y se pueda tomar en cuenta en el equipo sedimentador.

2.2. ANTECEDENTES

Tejada (2017) en su trabajo de investigación da a conocer que en la Unidad Operativa Minera Santiago – B el problema principal es la turbidez y la demora de la sedimentación de las aguas residuales relaves mineros, cuyo objetivo general es evaluar la sedimentación de sólidos totales en suspensión (SST) y reducir la turbidez de las aguas residuales de relaves mineros, utilizando cal como coagulante – floculante. Se ejecutaron pruebas de sedimentación en probetas de 100 ml y en vasos precipitados de 1 litro, así mismo las pruebas de turbidez y sedimentación de SST; las pruebas experimentales se

realizaron por cuatro fechas, donde el resultado de la turbidez inicial fue 81 900 NTU y SST fue 67 400 mg/l, y el resultado final para una unidad de tiempo de 60 minutos la turbidez es 19.39 NTU y SST final es 18.25 mg/L, donde la dosis optima de cal al 5 % es 0.3 g de cal por litro de agua residual, con una remoción de 99.976 % para turbidez y 99.973 % de remoción para SST.

Gadelha *et al.*, (2016) manifiesta que los relaves mineros que se desechan en forma de pulpa generalmente tienen grandes cantidades de agua y su reutilización en el proceso, a través de operaciones de recuperación de agua más eficientes es importante para la implementación de proyectos de menor impacto ambiental. Este estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de dos polímeros floculantes comerciales en la deshidratación y filtración de residuos provenientes de una planta de beneficio del mineral sulfuro de níquel. Se estudiaron pulpas con concentraciones iniciales de sólidos del 10% y floculantes poliméricos en dosis de 200 g/t.

Los ensayos de floculación y sedimentación se realizaron en un equipo jar test y los de filtración en un equipo filtra test TM trabajando con o sin presión y con caídas de presión (ΔP) de 4 y 6 bar. La eficiencia del proceso se midió por medio de la velocidad de filtración, la resistencia de la torta y el porcentaje de recuperación de agua. Los resultados mostraron que la combinación de las operaciones de sedimentación y de filtración permite hasta un 74% de recuperación de agua a partir de residuos posibilitando la reutilización de esta agua en el proceso; además, el uso de floculantes poliméricos como adyuvantes de deshidratación durante la filtración es un camino prometedor en la eliminación de agua de relaves mineros.

Mejias (2015) en su trabajo de investigación dice que el espesamiento es un proceso muy importante, tanto en la industria minera (del cobre) como en el tratamiento

de aguas servidas, pues está dedicado a la recuperación de agua, para volver a ser usadas o bien devolver a cuerpos de agua.

Para modelar la sedimentación al interior de un espesador es necesario encontrar una función de flujo f_b a través de ensayos batch de laboratorio.

Existen dos métodos, uno global paramétrico, el cual dado algunas curvas a priori de f_b (φ), ajusta parámetros artificiales a través de un perfil de sedimentación h (t). Este método es el más utilizado en la actualidad, sin embargo está sujeto a errores de sensibilidad. Otro método es una estimación local cerrada, esto es, a través de un perfil de sedimentación h (t), se encuentra una fórmula algebraica cerrada de la función de flujo. Este método es preciso si se conoce una forma analítica del perfil de sedimentación. Como esto no es posible, pues son mediciones experimentales, se hace un ajuste por mínimos cuadrados de esta nube de puntos y luego se aplica la forma algebraica antes mencionada

Salcedo (2015) en su estudio de investigación manifiesta que MINSUR S.A. ha solicitado el desarrollo de la Ingeniería de detalle de una planta piloto, denominada "planta piloto Bofedal II", para la recuperación de estaño a partir de relaves generados del procesamiento y recuperación de la casiterita dispuestos en el depósito "Bofedal II" con 5.4 millones de metros cúbicos o un equivalente de 7.7 millones de toneladas para ser reprocesadas, ya que los recursos para la planta industrial San Rafael están en tendencia agotarse y es por ello, MINSUR opta por el tratamiento de dichos relaves. Llegaron a las siguientes conclusiones Se logró mejorar la calidad del concentrado final (52.34 % Sn como promedio) y se mejoró la recuperación de estaño desde los relaves aplicando flotación inversa (95.55- 99.45%.) Se logró evaluar la flotación a un pH adecuado, con mayor tendencia a neutro (6.19), y esto permitió lograr mejores en la flotación inversa de sulfuros.

La granulometría cuando tiende a ser más fina ayuda en la flotación inversa de sulfuros, juntamente con la influencia del % de sólidos (30 .41 % Sol.).

Ames y Lovera (2012) presenta su artículo en donde incluye pruebas en un Espesador Piloto de Cono Profundo considerando las condiciones de proceso para la óptima floculación con pruebas de laboratorio determinando el tipo de floculante, concentración de sólidos en la alimentación y dosificación para maximizar el ratio de 2 tratamiento.

El objetivo es determinar las condiciones de floculación adecuada que permita la máxima claridad del líquido y máxima densidades en la descarga con el mínimo de dosificación que permita seleccionar las condiciones de alimentación para la operación del espesador piloto.

Determinadas las condiciones de alimentación sigue una serie de ratios de tratamiento para 2 determinar la máxima carga posible bajo condiciones óptimas de floculación. Durante estas series, se mantiene constante el nivel de sólidos y se monitorea la densidad del Under Flow manteniendo el balance alimentación descarga. Muestras del rebose, descarga y alimentación fueron tomadas con la mayor frecuencia posible para determinar cualquier variación en las características de la alimentación que puedan afectar la floculación y en consecuencia la claridad del rebose y espesamiento. Típicamente cambios en la distribución granulométrica, tipo de mineral y pH tienen un gran impacto.

Gomez (2012) en su tesis postula la evaluación del proceso de espesamiento de relaves en una planta piloto existente, donde se pretende investigar, analizar y evaluar la alternativa de aplicar la tecnología de espesamiento de relave con el objeto de validarla, de tal forma que permita disponer de un relave con alto contenido de sólidos y utilizar

estos relaves para desarrollar pruebas básicas que permitan identificar los principales factores operativos y los efectos que podrían causar al variarlos. Llegando a una de las siguientes conclusiones:

En cuanto a la selección de reactivos químicos, haciendo alusión a las pruebas de laboratorio, se selecciona el floculante SNF- 913 para la operación de relaves, siendo probado y habiendo obtenido los mejores tiempos de sedimentación en una solución con relave a una concentración entre 15% y 20%, que se considera aceptable ya que a la vez esta dilución ayuda en el proceso de modo de que el transporte del fluido sea más fácil, por el hecho de poseer menos sólidos evitando posibles embancamientos en las líneas de alimentación.

Cabrejos (2011) en su tesis indica que el tema de producción, manejo, transporte, disposición y caracterización reológica de relaves espesados, es un tema poco tratado en la currícula de nuestra especialidad, pero que resulta de vital importancia al optar por el espesamiento de relaves por encima de los niveles convencionales como solución tecnológica ante problemas tales como:

Escasa disponibilidad de agua para los procesos metalúrgicos en zonas áridas, de inestabilidad de presas por efectos de licuefacción de relaves, de reducidos volúmenes de almacenamiento disponibles en presas de relaves y ante problemas ambientales por la generación de agua ácida, entre otros.

Esta investigación se centra en plantear una solución al primer problema mencionado y pretende aportar una solución a este vacío académico, otorgando así al ingeniero de procesos, pautas en las metodologías disponibles para la caracterización reológica, así como en el dimensionamiento y diseño de sistemas de espesamiento y transporte de pulpas espesadas.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

- Probetas de 1000 ml.
- Vaso de precipitados de 500 ml
- Jeringas de 20 ml, 10 ml y 5 ml
- Agitador magnético
- Pastilla magnética
- Baldes de plástico de 20 L.
- Guantes tipo látex
- Cronómetro
- Balanza electrónica
- Bandejas metálicas
- Espátulas metálicas
- Muestreador
- Floculante RENAFLOC 1120 (Renasa)
- Floculante AR-3120 (Arenas)
- Floculante MTFLOC 4253 (Dyschem)

- Floculante CHEMLOK 2010

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. Nivel de investigación

El diseño de investigación que se utilizó fue la experimental mediante las pruebas de jarras (Jar-Test) en el laboratorio utilizando como coagulante la cal y evaluando la eficiencia de los floculantes, para poder determinar los resultados de cálculos matemático-estadístico y analítico; porque el planteamiento de problema establece el tratamiento adecuado para lograr sedimentar los sólidos totales en suspensión, reducirlo la turbidez y precipitación de metales utilizando la cal como coagulante-floculantes en la Unidad Minera San Rafael.

Para medir, analizar, describir y explicar la interrelación de variables que se describen; la variable independiente (causa) que es evaluar la cinética de sedimentación y precipitación de metales a nivel de laboratorio, como variable dependiente (efecto) optimización para el tratamiento de pulpas de relaves de MINSUR.

3.2.2. Tipo de investigación

La investigación que se realizó es de tipo analítico y explicativo; porque el objetivo planteado indica evaluar la cinética de sedimentación y precipitación de metales de sólidos totales en suspensión y reducirlo la turbidez de las aguas residuales de relaves mineros, utilizando la cal como coagulante y evaluando la eficiencia de floculantes.

Así mismo la tipificación de la investigación se enfocó según los criterios más importantes tal como se detalla a continuación:

Tabla 4: Criterios de investigación.

CRITERIO	TIPO DE INVESTIGACIÓN
Finalidad	Aplicativa
Enfoque teórico metodológico	Cuantitativa
Objetivos	Explicativo
Fuente de datos	Primaria
Control en el diseño de las pruebas	Laboratorio
Temporalidad	Longitudinal
Intervención disciplinaria	Especialidad

FUENTE: Elaboración propia.

3.3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

El presente proyecto se desarrolló en el laboratorio metalúrgico de la Unidad Minera San Rafael que está ubicada en el departamento de Puno, en el nevado Quenamari de la Cordillera de Carabaya y un segmento de la cordillera Oriental a una altitud de 4 500 a 5 000 m.s.n.m.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

3.4.1. Población

En el presente análisis la población está constituida por la pulpa de relave del proceso de flotación y gravimetría de la casiterita proveniente de la planta concentradora de San Rafael.

3.4.2. Muestra

La muestra que se consideró en este análisis para los diferentes tipos de pruebas fueron las pulpas de relave proveniente del: Relave fino, Relave grueso, Agua B 2.5 y Dren basal del circuito de procesamiento de minerales de San Rafael.

3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO

Se utilizó la estadística descriptiva el que permitió recolectar, organizar y presentar en forma de tablas y gráficos la información numérica; la estadística inferencial el que permitió sacar conclusiones acerca de una población usando datos de una muestra tomada de ellas en donde se aplicó el programa computarizado MICROSOFT EXCEL Y ANOVA.

3.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.6.1. Variable independiente

Evaluación de la cinética de sedimentación y precipitación de metales.

3.6.2. Variable dependiente

Optimizar el tratamiento de pulpa de relaves de la unidad minera San Rafael Puno-Perú.

3.7. PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

El procesamiento de los datos se realizó en forma manual y computarizada. Una vez que se realizó la recolección de las muestras de pulpa de relave, se trasladó al laboratorio de químico de la UM San Rafael para su análisis respectivo, luego de haber obtenido los resultados se procedió a tabularlos de manera sistematizada y se determinó la eficiencia respectiva de los floculantes para la mejora en el tratamiento de pulpas de relave.

3.7.1. Caracterización de pulpa de relaves

La caracterización de la pulpa de relaves es muy importante para el resultado final de las pruebas. Esta información debe garantizar que la muestra a evaluar sea

representativa, lo que permite una correcta comparación y selección de los productos químicos (floculantes) utilizados en los procesos físicos de sedimentación y precipitación de metales pesados.

Porcentaje de sólidos, dilución o concentración de la pulpa, peso específico y granulometría de los sólidos de la pulpa, pH temperatura de la pulpa son los parámetros más importantes determinados antes de la iniciar las pruebas de sedimentación en probeta.

Tabla 5: Resumen de las características metalúrgicas de la pulpa de relave de estaño que fue empleado para las pruebas de laboratorio en este estudio.

	FRACCION	LITROS
Cola Sev	0.93	9.3
Sulf Casit	0.002	0.02
Sulf OK	0.008	0.08
Lamas	0.06	0.6
		10 L.

FUENTE: Elaboración propia.

3.7.2. Selección de floculante

La selección de floculantes para este tipo de pruebas se basa procesos empíricos, hecho en base a una preselección basada en la experiencia. Ya que es imposible la predicción teórica de cuál floculante sintético es el más adecuado para una suspensión en particular.

El criterio de selección del floculante óptimo se basa en la determinación de la velocidad de sedimentación de distintos polímeros sobre una muestra representativa del material a sedimentar. Aquel floculante que presente la velocidad más alta es considerado óptimo. Este procedimiento es considerado indispensable para la determinación del floculante que se empleara para todas las pruebas de sedimentación y compactación

siguientes. Con fines comparativos, las condiciones de la pulpa y dosificación de floculante, entre otras, suelen mantenerse constantes, tal que el efecto del floculante en si pueda ser evaluado sin perturbaciones de otra índole.

A continuación se muestran, las condiciones que se mantuvieron constantes durante las pruebas en nuestra aplicación:

Tabla 6: Parámetro operacional.

DATOS DE MUESTRA	
G.e	2.74 g/cc
Dp	1.3883 kg/L
%S	44.04
V	1 L
P. pulpa	1.3790kg
P. muestra	0.6073 kg
pH inicial	5.73
pH final	10.70
FLOCULANTE	
Concentración	0.06 %
Dosificación	17 ppm

FUENTE: Elaboración propia.

Los siguientes polímeros fueron usados:

- Floculante RENAFLOC 1120 (Renasa)
- Floculante AR-3120 (Arenas)
- Floculante MTFLOC 4253 (Dyschem)
- Floculante CHEMLOK 2010

3.7.2.1. Preparación de los floculantes

- Los floculantes son preparados a la concentración de 0.12% y posteriormente diluido a 0.06%.
- Se pesa 0.12 gramos de cada floculante para diluirlo en 200 ml. de agua en vasos de precipitados de 500 ml por separado.
- Se emplea un agitador magnético para diluir el floculante en agua en su totalidad. (este procedimiento se repite para cada floculante).

3.7.2.2. Preparación de pulpa de relave

- Se realiza un muestreo de pulpas de relave del espesador MIXER ESP. 80 (Cola scavenger, Sulfuro casiterita, Sulf OK, y lamas).
- La pulpa de relaves tomado de los cinco puntos es vertida a una probeta de 1000.00 ml con la finalidad de fraccionar tomando como base lo indicado en la tabla 15. Esta medición se hizo 10 veces de la muestra de cola Scavenger para poder llegar a los 9.3 L y las otras muestras se mide una sola vez y así poder llegar a los 10.00 L.
- Estas muestras medidas de 10.00 L tienen un pH inicial de 5.73 , con la finalidad de elevar el pH a 10.70 que es lo ideal se vierte de nuevo a un recipiente de 15 L. Agregando $Ca(OH)_2$ poco a poco hasta llegar al pH ideal que es de 10.70. La pulpa es homogenizada vigorosamente para así poder asegurar la suspensión de todas las partículas.
- La pulpa homogenizada es almacenada en probetas de un litro de capacidad teniendo en cada una de ellas la misma densidad de pulpa de 1.3883 kg. /L.

3.7.2.3. Preparación del floculante

- Concentración: 0.06 %
- Volumen de la solución: 200 ml

$$\text{Peso del floculante} = \frac{\text{Volumen de solución} \times \text{concentración del floculante}}{\text{volumen de floculante}}$$

$$X = \frac{200 \text{ ml} \times 0.06 \text{ g}}{100 \text{ ml}}$$

$$X = 0.12 \text{ g de Floculante}$$

3.7.2.4. Calculo de la dosificación del floculante

- Concentración: 0.06%
- Dosificación: 17 g/t
- Peso de la muestra: 0.6073 kg

$$\text{Densidad del floculante} = \frac{\text{peso de la muestra}}{1000} \times \frac{100}{\text{concentración}}$$

$$y = \frac{0.6073 \text{ kg}}{1000} \times \frac{100}{0.06 \%}$$

$$y = \frac{0.6073 \times 17}{(10 \times 0.06)}$$

$$y = 17.2068$$

Promedio $y = 17$ mililitros

3.7.2.5. Determinación de la gravedad específica

$$Ge = \frac{(W_m + W_{f_v}) - W_{f_v}}{((W_f + \text{agua}) - W_{\text{total}}) + ((W_m + W_{f_v}) - W_{f_v})}$$

Donde:

Ge : Pravedad específica

W_m : Peso del mineral

W_{f_v} : Peso de la fiola vacía

W_f : Peso de la fiola

$$Ge = \frac{212.50 \text{ g} - 94.20 \text{ g}}{(344.20 \text{ g} - 419.20 \text{ g}) + (212.50 \text{ g} - 94.20)}$$

$$Ge = \frac{118.30}{75 + 118.3}$$

$$Ge = \frac{118.30}{43.30}$$

$$Ge = 2.732$$

$$Ge = \frac{208.70 \text{ g} - 97.20 \text{ g}}{(347.20 \text{ g} - 418 \text{ g}) + (208.70 \text{ g} - 97.20)}$$

$$Ge = \frac{111.50}{70.8 + 111.5}$$

$$Ge = \frac{111.50}{40.70}$$

$$Ge = 2.739$$

$$Ge E_1 + E_2 = 2.732 + 2.739$$

$$Ge E_1 + E_2 = \frac{5.471}{2}$$

$$Ge E_1 + E_2 = 2.74$$

3.7.2.6. Determinación de la densidad y % de solidos

Calculando la densidad de la pulpa de relave

$$\text{Densidad de pulpa} = \frac{\text{peso de pulpa}}{\text{volumen de pulpa}}$$

Relación de % de sólidos, gravedad específica y densidad de la pulpa.

$$\% \text{ de solidos} = \frac{(D_p - 1000)}{D_p \times \frac{Ge - 1}{Ge}} \times 100$$

$$\% \text{ de solidos} \times D_p \times \left(\frac{Ge - 1}{Ge}\right) = (D_p - 1000) \times 100$$

$$\frac{\% \text{ sol}}{100} \times D_p \times \left(\frac{Ge - 1}{Ge}\right) = D_p - 1000$$

$$1000 = D_p - D_p \times \frac{\% \text{ sol}}{100} \times \left(\frac{Ge - 1}{Ge}\right)$$

$$1000 = D_p \times 1 - \frac{\% \text{ sol}}{100} \times \left(\frac{Ge - 1}{Ge}\right)$$

$$D_p = \frac{1000}{1 - \frac{\% \text{ sol}}{100} \times \left(\frac{Ge - 1}{Ge}\right)}$$

$$D_p = \frac{1}{1 - \frac{44.04}{100} \times \left(\frac{2.74 - 1}{2.74}\right)}$$

$$D_p = 1.3883$$

Calculamos el porcentaje de solido de pulpa de relave.

$$\% \text{ de solidos} = \frac{\text{peso del mineral} \times 100}{\text{peso de pulpa}}$$

$$\% \text{ de solidos} = \frac{0.6073 \text{ kg} \times 100}{1.3790 \text{ kg}}$$

$$\% \text{ de solidos} = 44.04$$

3.7.2.7. Determinación experimental de la velocidad de sedimentación

Para esta determinación se utilizan los datos obtenidos en una sedimentación discontinua, realizada con suspensiones de diferente concentración inicial, C_o .

La forma de operar con cada una de las probetas es la siguiente:

1. Se mide la mide la altura inicial de la suspensión, h_o usando la regla acoplada a cada probeta.
2. Se toma la probeta de concentración y se agita intensamente para que la concentración sea lo más uniforme posible a lo largo de toda la probeta.
3. Se deja la probeta en reposo y se va determinando la altura que ocupa la suspensión en función del tiempo, tomando para ello medidas de la altura de la suspensión (h) cada minuto.

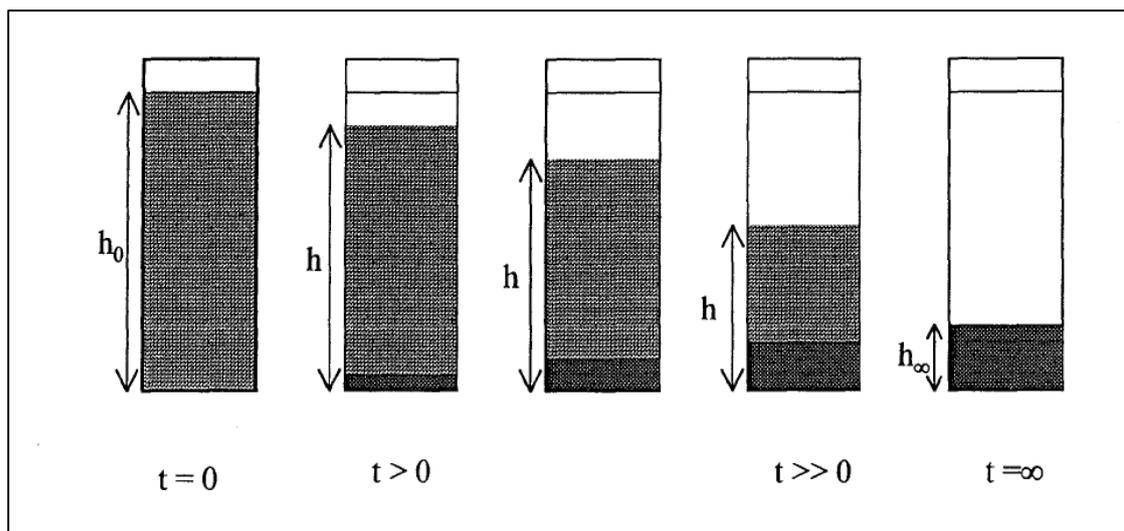


Figura 8: Altura de sedimentación.

Una vez determinadas las parejas de valores de la altura en función del tiempo, se puede utilizar el método de Coe y Clevenger para determinar la velocidad de sedimentación.

Se realizan ensayos con suspensiones de concentración inicial, para cada una de estas concentraciones iniciales se obtienen las parejas de valores (h, t) y la correspondiente curva de sedimentación.

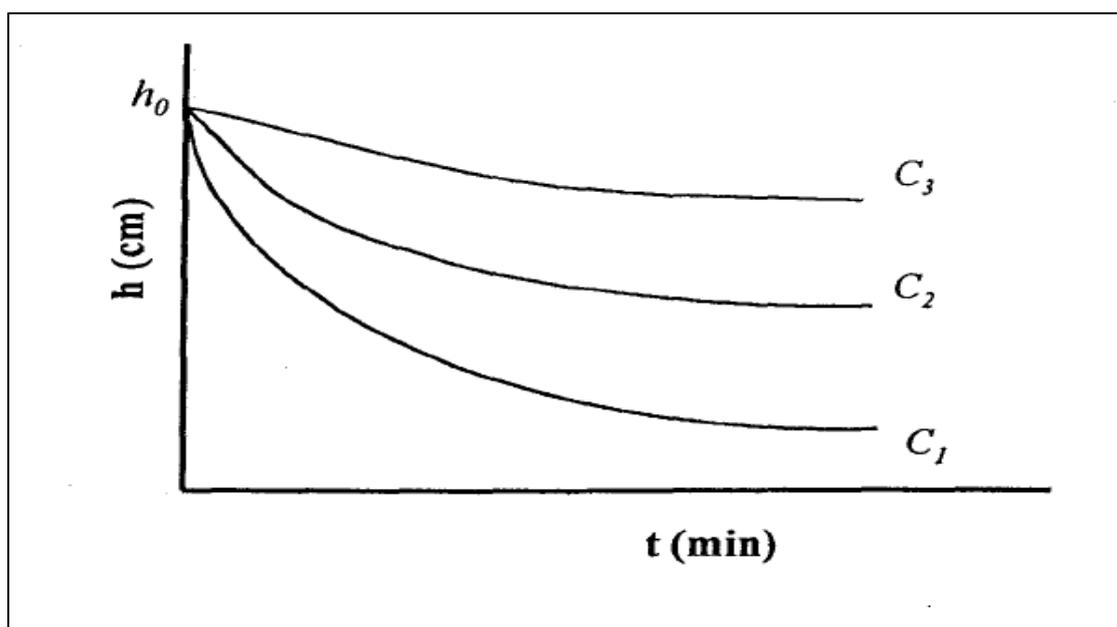


Figura 9: Curva de sedimentación.

Una vez realizada la representación gráfica de la variación de la altura frente al tiempo, se calcula la velocidad de sedimentación en función de la concentración utilizando el método de Coe y Clevenger, el cual consiste en estimar, a partir de los datos experimentales obtenidos a las distintas concentraciones iniciales, los valores de las pendientes en el origen, $-(dh/dt)$ que coinciden con las velocidades de sedimentación (v).

Calculando la velocidad de sedimentación con los datos obtenidos con las experiencias realizadas en el laboratorio.

$$\text{Velocidad de sedimentacion} = \frac{\text{Altura}_{\text{Inicial}} - \text{Altura}_{\text{Sedimentada}}}{\text{tiempo}}$$

Para un tiempo experimental de 0.10 segundos.

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 29.55 \text{ cm}}{0.10 \text{ sg}} = 4.500 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 0.30 segundos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 29.25 \text{ cm}}{0.30 \text{ sg}} = 2.500 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 0.50 segundos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 29 \text{ cm}}{0.50 \text{ sg}} = 2.000 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 1.00 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 28.85 \text{ cm}}{1.00 \text{ min}} = 1.150 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 1.50 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 28.45 \text{ cm}}{1.50 \text{ min}} = 1.033 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 2.00 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 28.00 \text{ cm}}{2 \text{ min}} = 1.000 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 3 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 26.95 \text{ cm}}{3 \text{ min}} = 1.017 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 5 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 24.45 \text{ cm}}{5 \text{ min}} = 1.110 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 10 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 17.05 \text{ cm}}{10 \text{ min}} = 1.295 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 13 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 16.45 \text{ cm}}{13 \text{ min}} = 1.042 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 15 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 16.25 \text{ cm}}{15 \text{ min}} = 0.917 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 20 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 16.15 \text{ cm}}{20 \text{ min}} = 0.693 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 25 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 16.05 \text{ cm}}{25 \text{ min}} = 0.558 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 30 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 15.95 \text{ cm}}{30 \text{ min}} = 0.468 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 35 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 15.95 \text{ cm}}{35 \text{ min}} = 0.401 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 40 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 15.95 \text{ cm}}{40 \text{ min}} = 0.351 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 45 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 15.95 \text{ cm}}{45 \text{ min}} = 0.312 \text{ cm/min}$$

Para un tiempo experimental de 55 minutos

$$V = \frac{30 \text{ cm} - 15.95 \text{ cm}}{55 \text{ min}} = 0.255 \text{ cm/min}$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRUEBAS PRELIMINARES

4.1.1. Ensayos de sedimentación

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de sedimentación donde se seleccionó dentro de un espectro de diferentes floculantes el mejor de su serie, en donde el criterio tomado para determinar la dosificación óptima de floculante se basó en la determinación de la velocidad de sedimentación (o tasa de alimentación) de una muestra representativa de pulpa de relave a 17 g/t de floculante. Para tal caso los polímeros preseleccionados son RENAFLOC 1120, AR-3120, MTFLOC 4253 y CHEMLOK 2010.

4.2. RESULTADOS LOGRADOS

4.2.1. Resultados de la prueba P1 (pH natural= 5.73)

En la actualidad, en unidad minera MINSUR – San Rafael, se utiliza el floculante CHEMLOK 2010 en el tratamiento de Relaves, el uso del floculante, se da en el Espesador 80 y en la Relavera, en la cual confluyen cuatro muestras: Relave Fino, Relave grueso, Agua B 2.5 y Dren basal.

Con la prueba ejecutadas a nivel de laboratorio se evaluó si los floculantes RENAFLOC 1120, AR-3120, MTFLOC 4253 pueden sustituir al CHEMLOK 2010.

El criterio para la determinación de la dosificación óptima de floculantes en prueba como son RENAFLOC 1120, AR-3120, MTFLOC 4253 y CHEMLOK 2010 se basó en la determinación de la velocidad de sedimentación (o tasa de alimentación) de

una muestra representativa de pulpa de relave a una sola dosificación de 17 gramos por tonelada al día de floculante.

En la tabla 7 se observa que para determinar la velocidad de sedimentación utilizando los floculantes se preparó las dosificaciones en probetas de 1lt., tomando como referencia 30 cm. de altura luego se midió el descenso de la pulpa de relave en cm. cronometrando el tiempo en minutos.

Tabla 7: Datos experimentales para determinar la velocidad de sedimentación.

		pH inicial				5.73
PRUEBA P1 VELOCIDAD DE SEDIMENTACION						
Tiempo (min)	INICIAL (cm)	CHEMLOK (cm)	AR-3120 (cm)	RENAFLOC 1120 (cm)	MTFLOC 4253 (cm)	
0	30	30	30	30	30	
0.1	29.75	29.65	29.65	29.55	29.6	
0.3	29.45	29.4	29.45	29.35	29.5	
0.4	29.35	29.3	29.35	29.25	29.4	
0.5	29.25	29.2	29.25	29.2	29.3	
1	29.2	29.1	29.15	29.05	29.25	
1.5	29.05	28.7	28.9	28.7	28.85	
2	28.85	28.25	28.65	28.25	28.5	
3	28.6	27.45	28.15	27.6	27.95	
5	27.9	25.55	26.95	25.95	26.6	
10	26.15	20.1	23.45	21.5	23.1	
13	25.15	18.15	20.95	18.25	20.60	
15	24.5	17.85	18.65	17.75	18.65	
20	22.75	17.40	16.25	17.30	17.10	
25	20.95	17.10	15.95	16.90	16.85	
30	19.15	17.00	15.80	16.75	16.70	
33	18.25	17	15.8	16.75	16.7	
35	17.7	16.9	15.65	16.65	16.5	
45	16.1	16.7	15.55	16.3	16.15	
55	14.45	16.5	15.35	16.3	16.05	

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.2. Pruebas de velocidades de sedimentación utilizando diversos floclutantes a un pH de 5.73

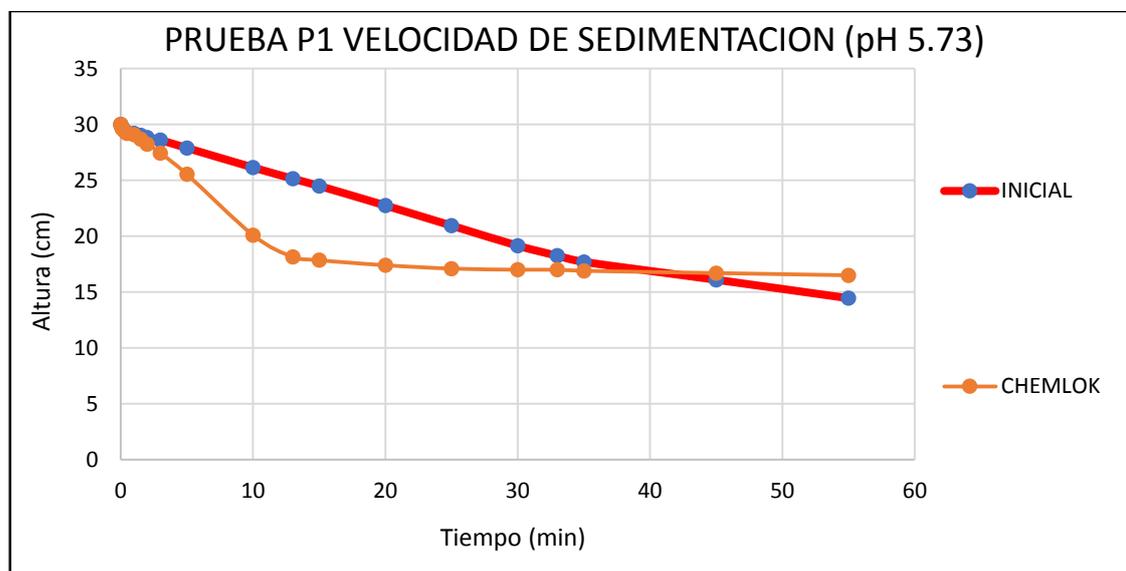


Figura 10: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo.

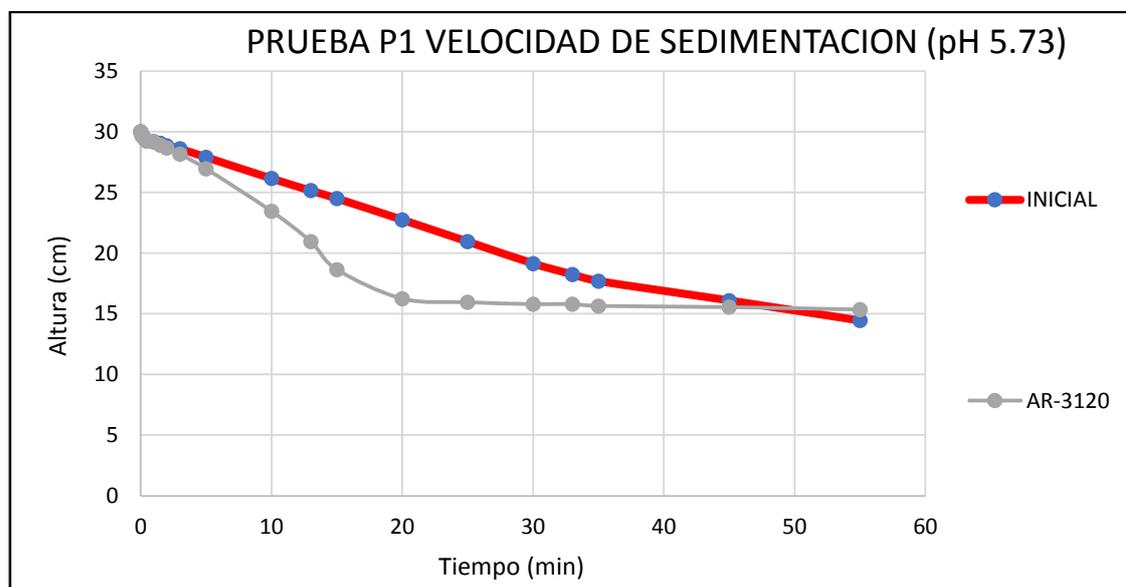


Figura 11: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo.

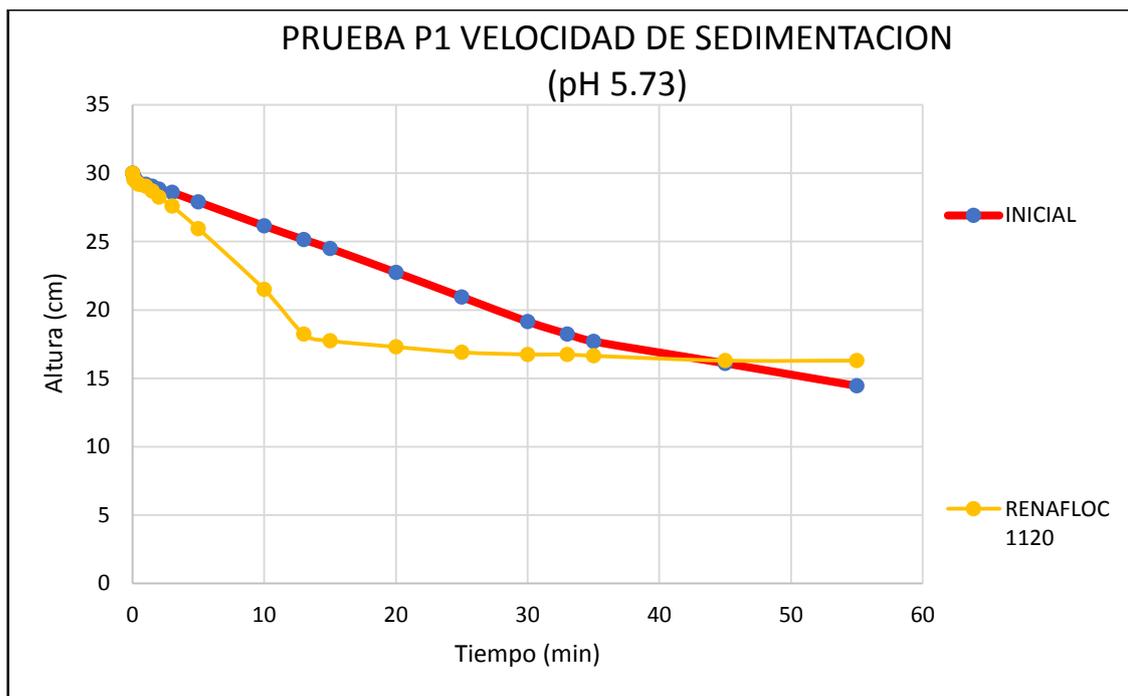


Figura 12: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo.

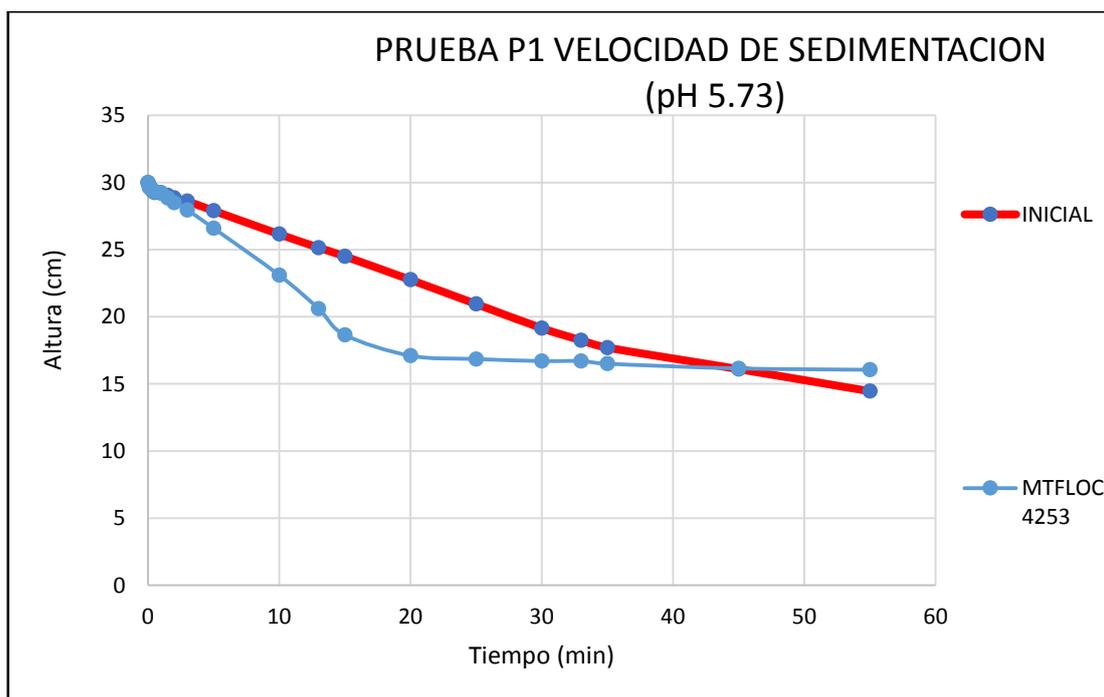


Figura 13: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo.

4.2.3. Resumen de velocidades de sedimentación utilizando distintos floculantes a un pH de 5.73

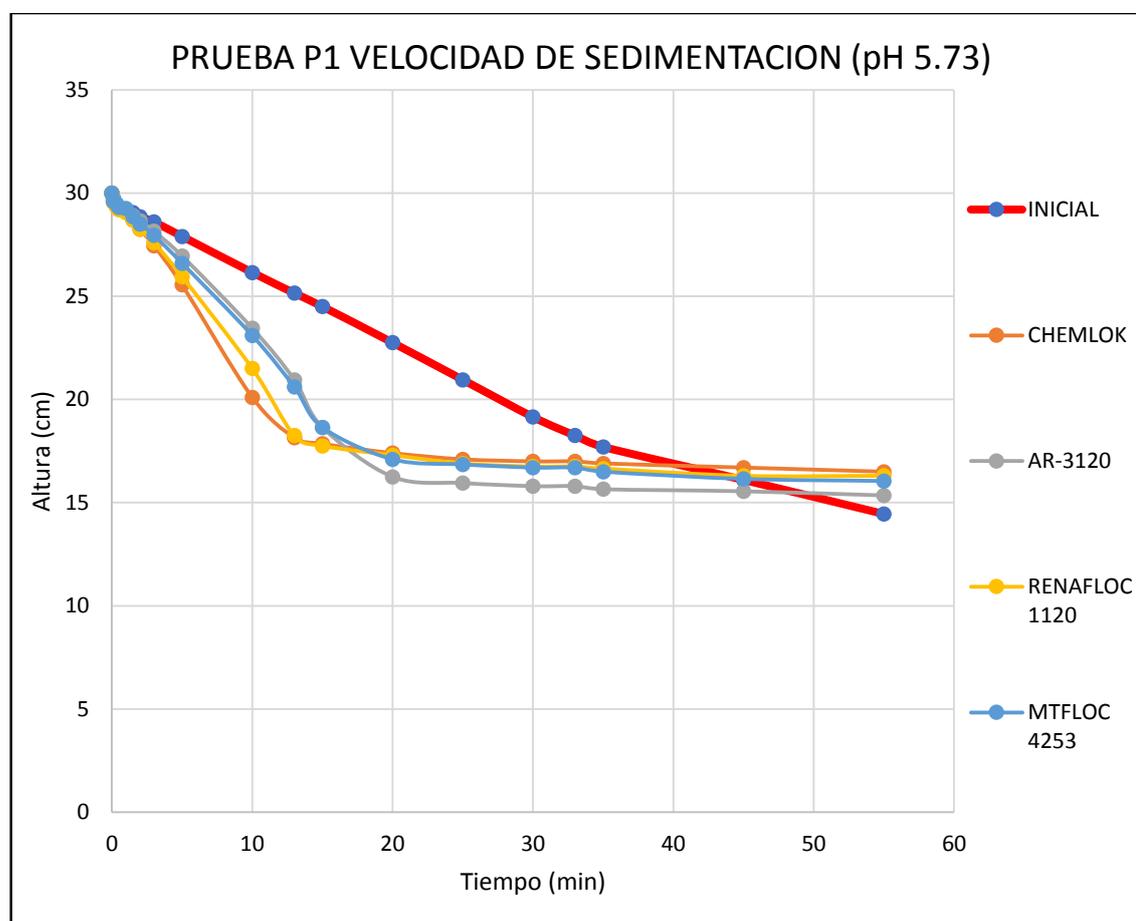


Figura 14: Desplazamiento de velocidad de sedimentación de distintos floculantes.

4.2.4. Análisis de resultados

Las velocidades de sedimentación obtenidas en cada caso de floculante se presentan en la figura 12.

En esta primera prueba se evaluaron los floculantes RENAFLOC 1120, AR-3120, MTFLOC 4253, comparados con el floculante de uso estándar CHEMLOK 2010. Se realizó la prueba a un pH normal que es de 5.73 con la finalidad de comparar la velocidad de sedimentación con los floculantes mencionados y posteriormente ver la precipitación de los metales pesados.

Los resultados de la evaluación de 4 tipos de floculantes que se presentan en la gráfica, se observa que el floculante con mejor performance es el RENAFLOC 1120, que supera al floculante de uso estándar; en velocidad de sedimentación en tiempos de 2, 5,10 minutos que es lo ideal para ver las velocidades ya que estos tiempos se basan a los parámetros operacionales que utiliza la planta concentradora.

Los otros dos polímeros quedan descartados.

4.3. RESULTADOS DE LA PRUEBA P2 (VARIANDO EL pH A 10.70)

En la tabla 8 se observa que para determinar la velocidad de sedimentación utilizando los floculantes RENAFLOC 1120, AR-3120, MTFLOC 4253 y CHEMLOK 2010 se siguió el mismo procedimiento que en la prueba 01; excepto de que para elevar el pH a 10.70 se agregó cal 4.30 gramos de Cal.

Tabla 8: Datos experimentales para determinar la velocidad de sedimentación.

pH variado		10.70			
PRUEBA P2 VELOCIDAD DE SEDIMENTACION					
Tiempo (min)	INICIAL (cm)	CHEMLOK (cm)	AR-3120 (cm)	RENAFLOC 1120 (cm)	MTFLOC 4253 (cm)
0	30	30	30	30	30
0.1	29.75	29.75	29.45	29.55	29.5
0.3	29.45	29.55	29.25	29.25	29.25
0.5	29.25	29.2	29.05	29	29.15
1	29.15	29	28.95	28.85	28.95
1.5	28.85	28.6	28.75	28.45	28.65
2	28.55	28.05	28.25	28.00	28.30
3	28.05	26.65	27.5	26.95	27.55
5	27.05	23.30	25.70	24.45	25.15
10	24.75	17.15	21.35	17.05	17.50
13	23.3	16.70	16.90	16.45	16.55
15	22.3	16.55	15.75	16.25	16.3
20	19.9	16.45	15.05	16.15	16.20
25	17.85	16.4	14.9	16.05	16.20
30	16.3	16.3	14.9	15.95	16.00
35	15.05	16.3	14.75	15.95	15.8
40	13.75	16.3	14.65	15.95	15.8
45	13.45	16.3	14.55	15.95	15.8
55	13.35	16.2	14.5	15.95	15.8

FUENTE: Elaboración propia.

4.3.1. Pruebas de velocidades de sedimentación utilizando diversos flocculantes a un pH de 10.70

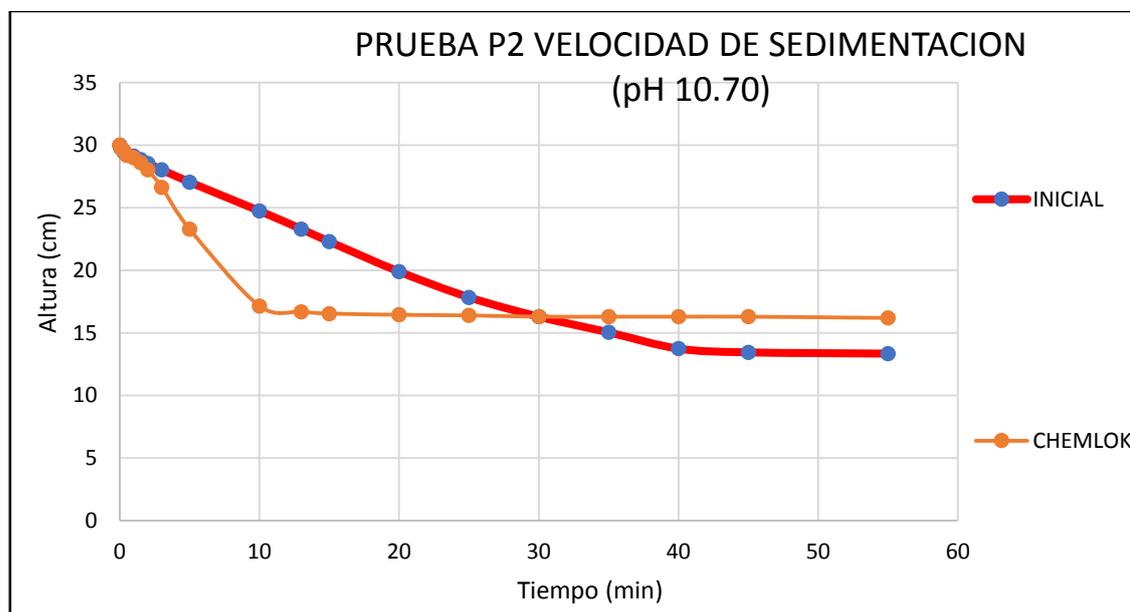


Figura 15: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura / tiempo.

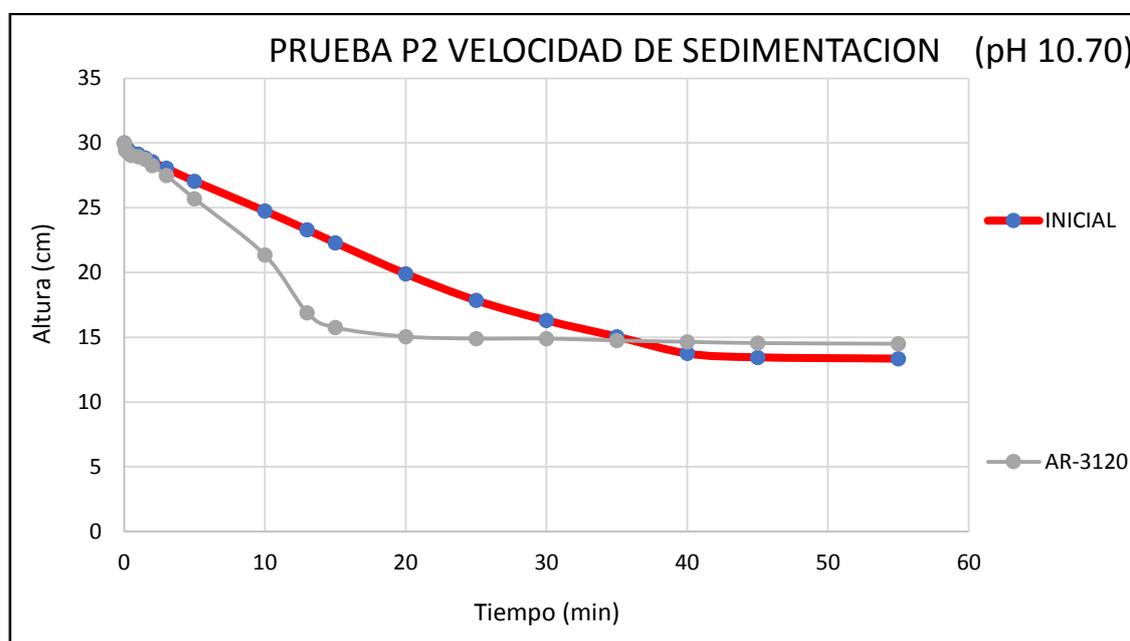


Figura 16: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura / tiempo.

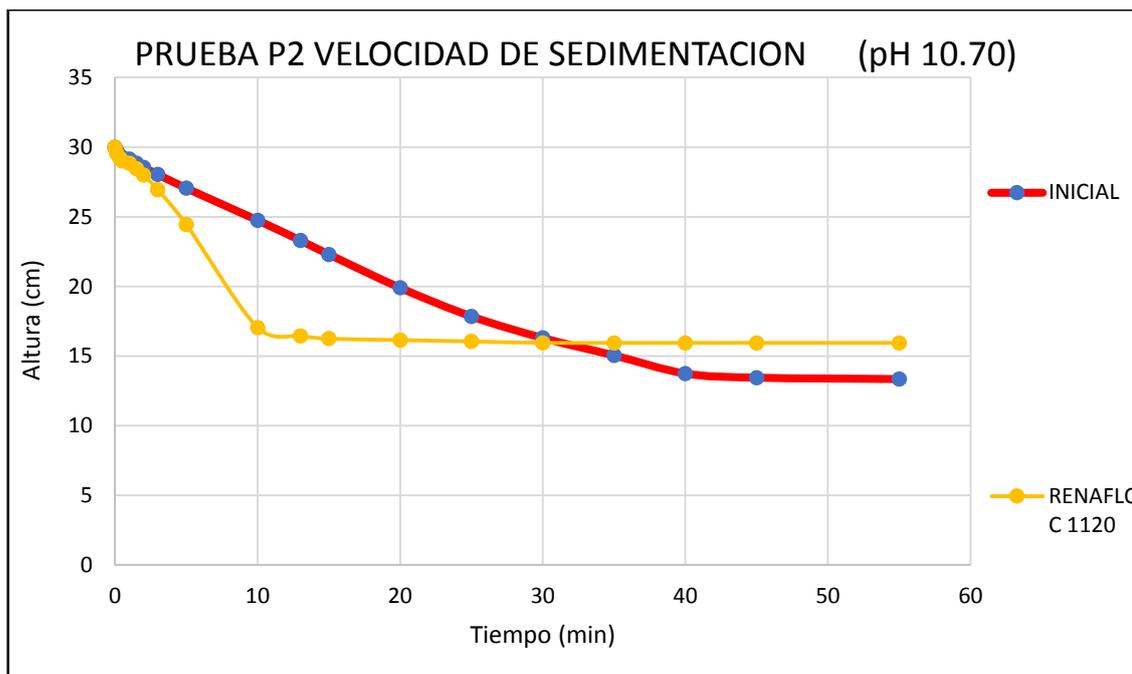


Figura 17: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo.

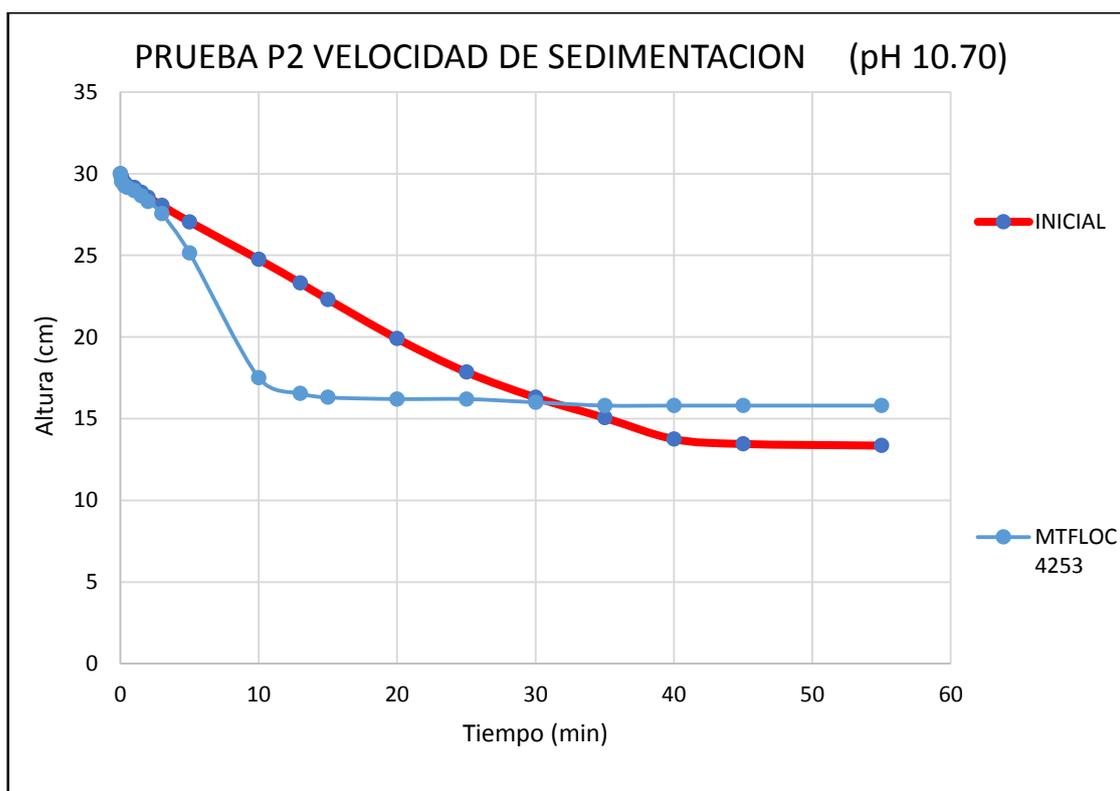


Figura 18: Desplazamiento de velocidad de sedimentación: altura /tiempo.

4.3.2. Resumen de velocidades de sedimentación utilizando distintos floclantes a un pH de 10.70

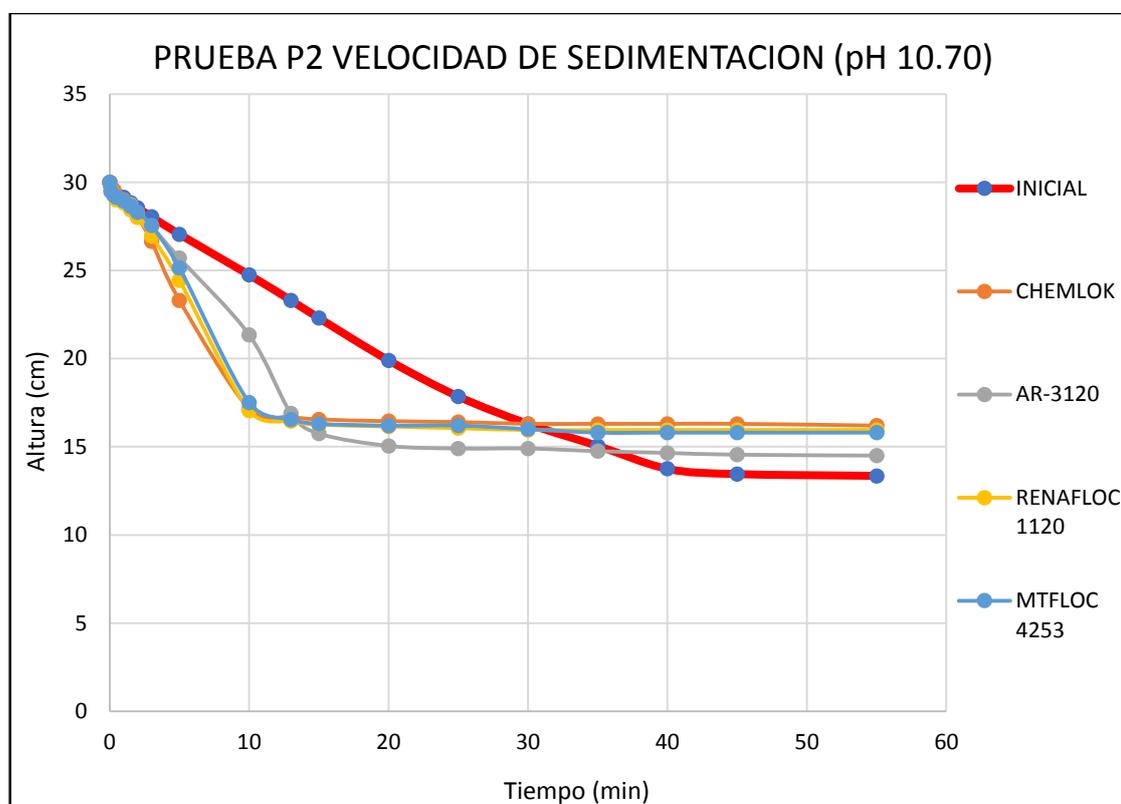


Figura 19: Desplazamiento de velocidad de sedimentación de distintos floclantes.

4.3.3. Análisis de resultados

En esta segunda prueba de igual manera se evaluaron los floclantes RENAFLOC 1120, AR-3120, MTFLOC 4253, comparados con el floclante de uso estándar CHEMLOK 2010. En esta prueba se eleva el pH a 10.70 con hidróxido de calcio con la finalidad posterior de lograr precipitaciones de iones de hierro y manganeso ya que esta se oxida. En la Figura 17 se observa que, al incrementar el pH de la muestra, la eficiencia en cuanto a la velocidad de sedimentación es el floclante RENAFLOC 1120 que sobresale mejor en tiempos ideales de 2,5 y 10 minutos. El floclante RENAFLOC 1120, es una excelente alternativa para el tratamiento de pulpa de relave, ya que su eficiencia en la sedimentación es superior a la del floclante de uso estándar.

4.4. CUADRO COMPARATIVO DE VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN ÓPTIMA

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de sedimentación óptima, considerándose de que a los 2 minutos es el tiempo recomendable para evaluar la velocidad de sedimentación a nivel de laboratorio debido a que estas presentan un descenso veloz en los primeros minutos de tiempo evaluado. A los 5 y 10 minutos tiempos referenciales a los parámetros operacionales que utiliza el espesador de la planta concentradora, se puede observar que a los 2 y 5 minutos haciendo las pruebas correspondientes presenta un mejor comportamiento en la velocidad de sedimentación, floculación aceptable, buena clarificación en el análisis de agua, el cual se considera óptimo para la operación del espesador sin dilución de la pulpa de relave.

Tabla 9: Cuadro comparativo de velocidad de sedimentación.

Tiempo	VELOCIDAD DE SEDIMENTACION (cm/min)									
	P1 (pH Normal = 5.73)					P2 (Variando el pH = 10.70)				
	INICIAL	CHEMLO K 2010	AR 3120	RENAFLOC 1120	MTFLOC 4253	INICIAL (variando el pH)	CHEMLO K 2010	AR 3120	RENAFLO C 1120	MTFLOC 4253
2min	0.575	0.875	0.675	0.875	0.750	0.725	0.975	0.875	1.000	0.850
5min	0.420	0.890	0.610	0.810	0.680	0.590	1.340	0.860	1.110	0.970
10min	0.385	0.990	0.655	0.850	0.690	0.525	1.285	0.865	1.295	1.250

FUENTE: Elaboración propia.

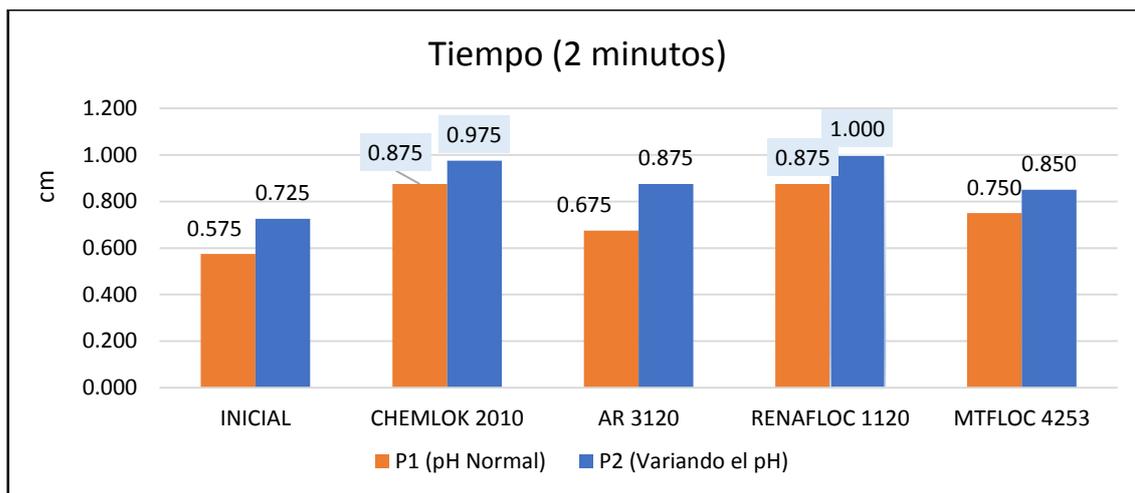


Figura 20: Velocidad de sedimentación en cm/min de floculantes de prueba a 2 minutos.

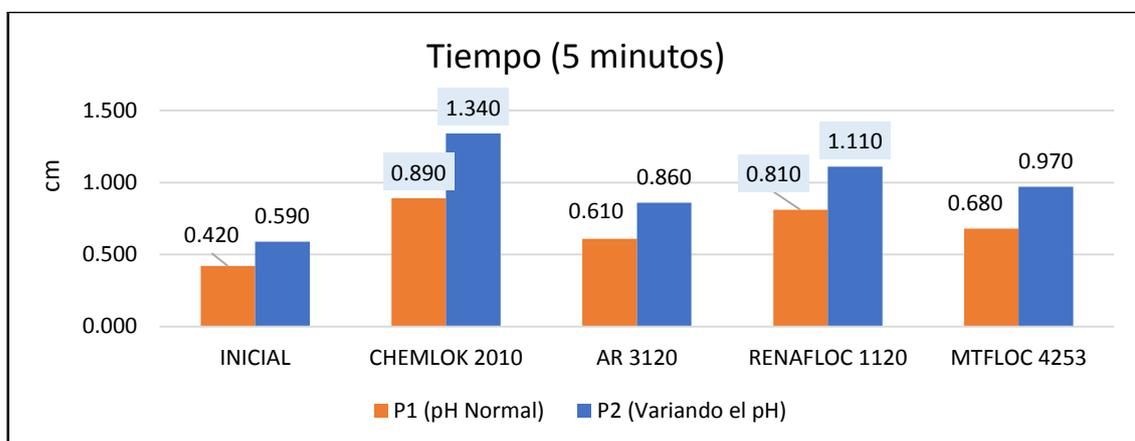


Figura 21: Velocidad de sedimentación en cm/min de floculantes de prueba a 5 minutos.

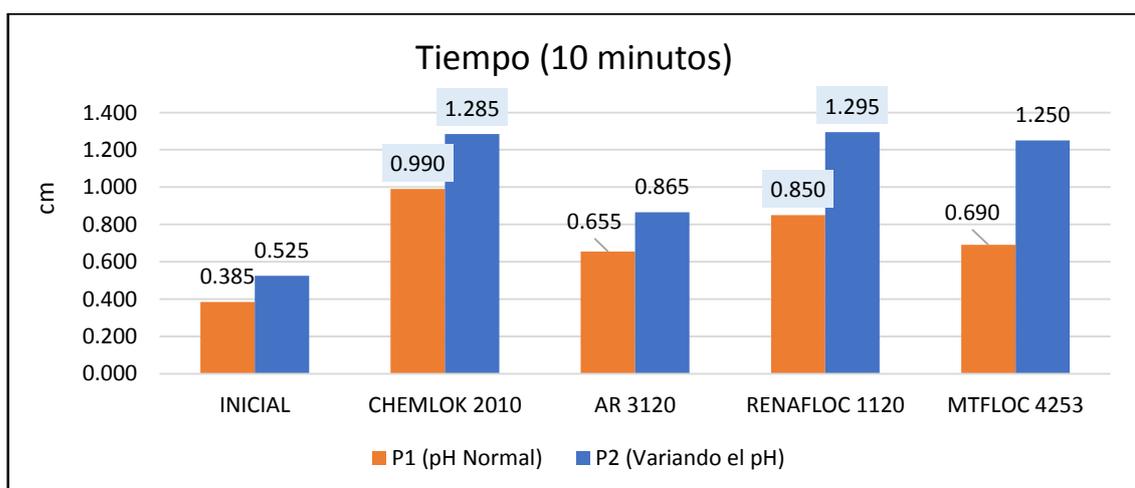


Figura 22: Velocidad de sedimentación en cm/min de floculantes de prueba a 10 minutos.

4.4.1. Análisis de resultados

Los resultados de las pruebas de sedimentación que se muestran en las figuras 18, 19 y 20 son las velocidades de sedimentación en cm/min, en donde la prueba que más interesa resaltar es la que se trabajó a un pH de 10.70 debido a que en el espesador de la planta concentradora se trabaja en ese rango.

- En la fig. 18 se evidencia que a los 2 minutos el que mayor velocidad de sedimentación presenta es el floculante RENAFLOC 1120, se observa que a un pH de 5.73 la velocidad de sedimentación es 0.875 cm/min y a un pH de 10.70 es de 1.000 cm/min.
- En la fig. 19 se observa que a los 5 minutos el que mayor velocidad de sedimentación presenta es el floculante CHEMLOK 2010, se observa que a un pH de 5.73 la velocidad de sedimentación es 0.890 cm/min y a un pH de 10.70 es de 1.340 cm/min.
- En la fig. 20 se observa que a los 10 minutos evaluando a un pH de 5.73 en el que mayor velocidad de sedimentación presenta es el floculante CHEMLOK 2010 y a un pH de 10.70 es el RENAFLOC 1120 cuya velocidad de sedimentación es 1.295 cm/min.

Finalmente se concluye que en la prueba (P1 y P2); el que presenta mejor velocidad de sedimentación es RENAFLOC 1120 tanto en pH natural y variando el pH en los tiempos de 2, 5, 10. A su vez le sigue CHEMLOK 2010 que también presenta una mejor velocidad de sedimentación en tiempos ya mencionados, seguidamente el MTFLOC 4253 y AR-3120 debido a que el proceso de sedimentación es lento.

4.5. ANÁLISIS DE AGUA SEDIMENTADA DE LOS FLOCULANTES RENAFLOC 1120, AR-3120, MTFLOC 4253 Y CHEMLOK 2010

Una vez llevado a cabo las pruebas de sedimentación el agua clarificada que queda en la parte superior de las probetas ensayadas se extrae y se envía en recipientes limpios al laboratorio químico para analizar los parámetros físicos de los metales pesados tales como:

- Temperatura en °C
- pH
- Conductividad térmica
- Sólidos suspendidos totales
- Metales disueltos como el Hierro
- Metales totales como el Fe, Mn, Cu, Pb, Zn y Cd.

Para la toma de muestras se utilizaron envases de plásticos, muy limpios y esterilizados cuyo volumen fue de 300 ml.

Tabla 10: Resultados de análisis de agua de laboratorio.

Nro	Descripción	PARÁMETROS FÍSICOS						MET DIS	METALES TOTALES								
		Tem p. °C	pH	Conductividad		DO ppm	TSS ppm	Fe ppm	Fe ppm	Mn ppm	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Cd ppm	Cr ppm	Hg ppm	As ppm
				µS/Cm	mS/Cm												
1	LAB-AGUA-17-083	12.8	5.45	-	5.72	-	31	7.599	16.112	6.990	0.204	0.142	1.081	<0.005	-	-	-
2	LAB-AGUA-17-084	12.9	5.58	-	5.92	-	47	8.584	16.282	7.084	<0.01	0.132	1.074	0.006	-	-	-
3	LAB-AGUA-17-085	12.8	4.39	-	6.04	-	34	9.312	16.916	7.196	0.188	0.117	1.117	<0.005	-	-	-
4	LAB-AGUA-17-086	12.9	3.84	-	6.39	-	19	9.841	16.788	7.158	0.217	0.110	1.092	<0.005	-	-	-
5	LAB-AGUA-17-087	12.8	5.65	-	6.01	-	56	9.375	18.003	7.279	0.348	0.139	1.122	0.005	-	-	-
6	LAB-AGUA-17-088	12.9	5.70	-	5.92	-	76	0.607	8.541	0.102	0.281	0.097	0.054	<0.005	-	-	-
7	LAB-AGUA-17-089	12.8	9.87	-	6.58	-	52	0.321	5.306	0.046	0.151	0.070	0.079	<0.005	-	-	-
8	LAB-AGUA-17-090	12.8	10.07	-	6.65	-	12	0.454	2.427	0.023	0.189	0.059	0.024	<0.005	-	-	-
9	LAB-AGUA-17-091	12.8	10.17	-	6.66	-	50	0.346	6.538	0.072	0.157	0.070	0.026	<0.005	-	-	-
10	LAB-AGUA-17-092	12.9	10.23	-	6.68	-	55	0.415	4.188	0.044	0.143	0.073	0.026	0.006	-	-	-

FUENTE: Laboratorio MINSUR.

4.6. ENSAYOS DE PRECIPITACIÓN DE METALES PESADOS A UN pH DE 5.73 Y 10.70 UNA VEZ REALIZADO LA SEDIMENTACIÓN

Tabla 11: Muestra de los resultados de la prueba 1 en donde se realizó el análisis de agua a un pH 5.73 para comparar la precipitación de metales.

Floculante	RESULTADO PRUEBA P1 (pH normal=5.73)				
	INICIAL	CHEMLOK 2010	AR 3120	RENAFLOC 1120	MTFLOC 4253
Dosificación (ppm)	-	17	17	17	17
Concentración (%)	-	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%
Velocidad de sedimentación (cm/min)	0.575	0.875	0.675	0.875	0.750
Turbidez (NTU)	25.60	7.41	8.80	6.74	8.82
TSS (ppm)	56	19	34	47	31
Fe (ppm)	18.003	16.788	16.916	16.282	16.112
Mn (ppm)	7.279	7.158	7.196	7.084	6.990
Cu (ppm)	0.348	0.217	0.188	<0.01	0.204
Pb (ppm)	0.139	0.110	0.117	0.132	0.142
Zn (ppm)	1.122	1.092	1.117	1.074	1.081
Cd (ppm)	0.005	<0.005	<0.005	0.006	<0.005

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 12: Muestra de los resultados de la prueba 2 en donde se realizó el análisis de agua a un pH 10.70 para comparar la precipitación de metales.

Floculante	RESULTADO PRUEBA P2 (variando el pH = 10.70)				
	INICIAL	CHEMLOK 2010	AR 3120	RENAFLOC 1120	MTFLOC 4253
Dosificación (ppm)	–	17	17	17	17
Concentración (%)	–	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%
Velocidad de sedimentación (cm/min)	0.725	0.975	0.875	1.000	0.850
Turbidez (NTU)	19	9.48	10.7	8.51	9.44
TSS (ppm)	55	50	12	52	76
Fe (ppm)	4.188	6.538	2.427	5.306	8.541
Mn (ppm)	0.044	0.072	0.023	0.046	0.102
Cu (ppm)	0.143	0.157	0.189	0.151	0.281
Pb (ppm)	0.073	0.070	0.059	0.070	0.097
Zn (ppm)	0.026	0.026	0.024	0.079	0.054
Cd (ppm)	0.0055	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005

FUENTE: Elaboración propia.

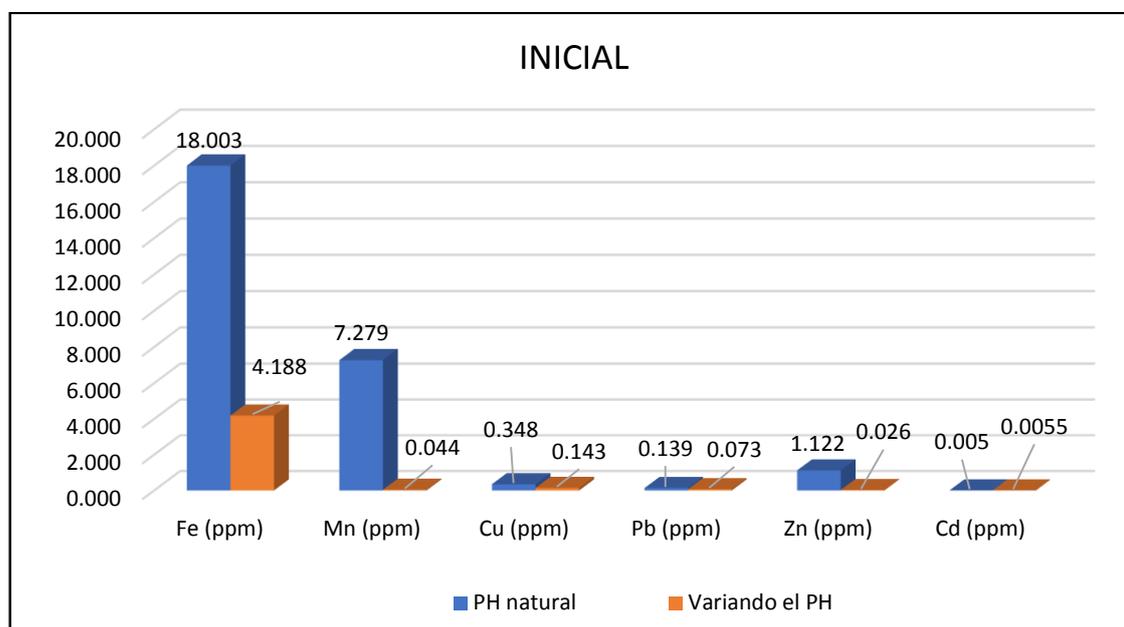


Figura 23: Precipitación comparativa inicial a pH 5.73 y 10.70.

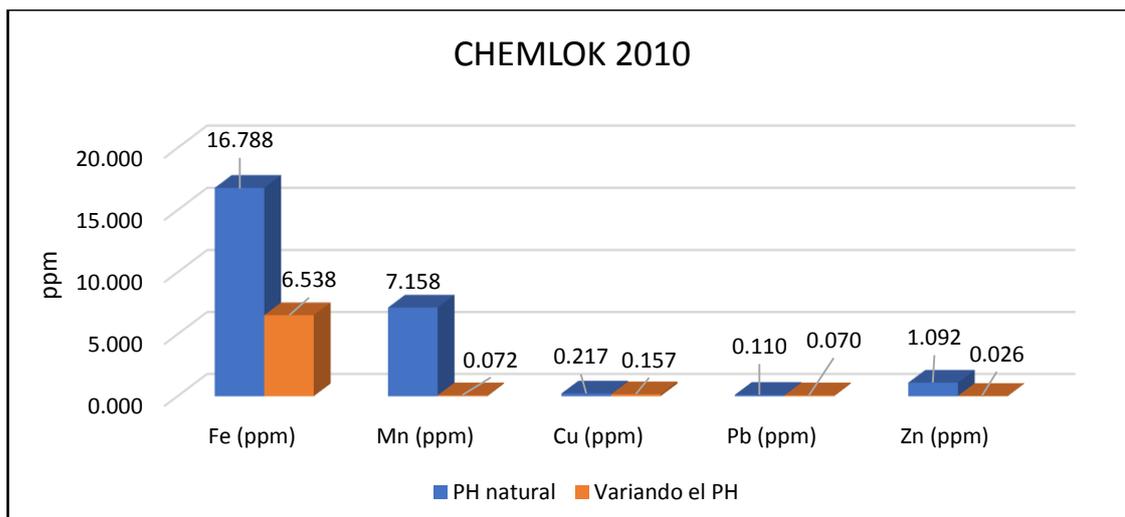


Figura 24: Precipitación comparativa de CHEMLOK 2010 a pH 5.73 y 10.70.

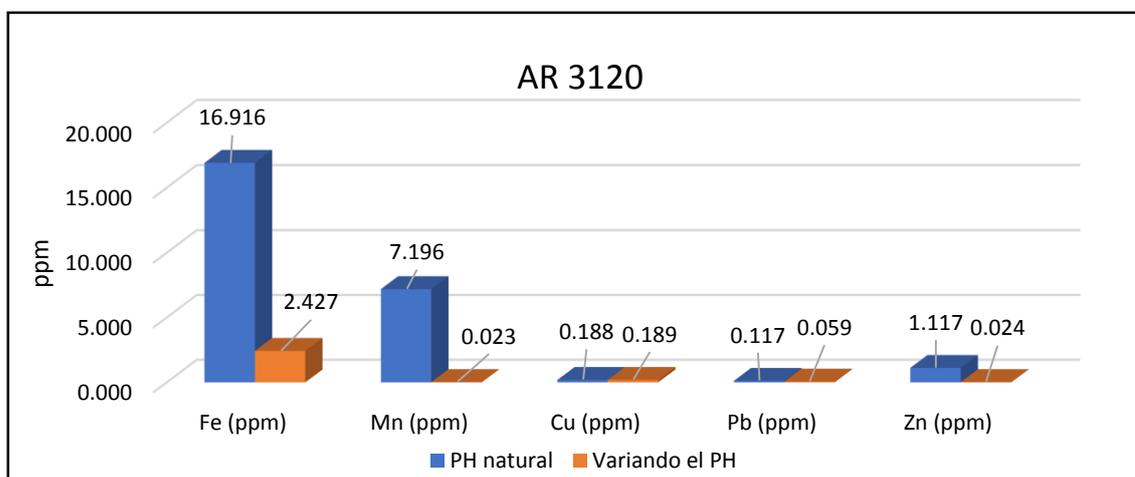


Figura 25: Precipitación comparativa de AR - 3120 a pH 5.73 y 10.70.

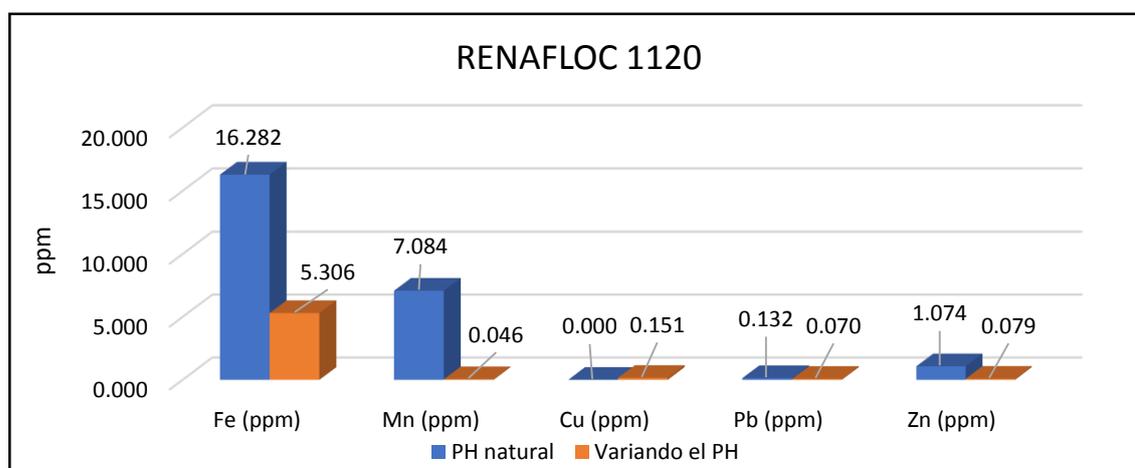


Figura 26: Precipitación comparativa de RENAFLOC 1120 a pH 5.73 y 10.70.

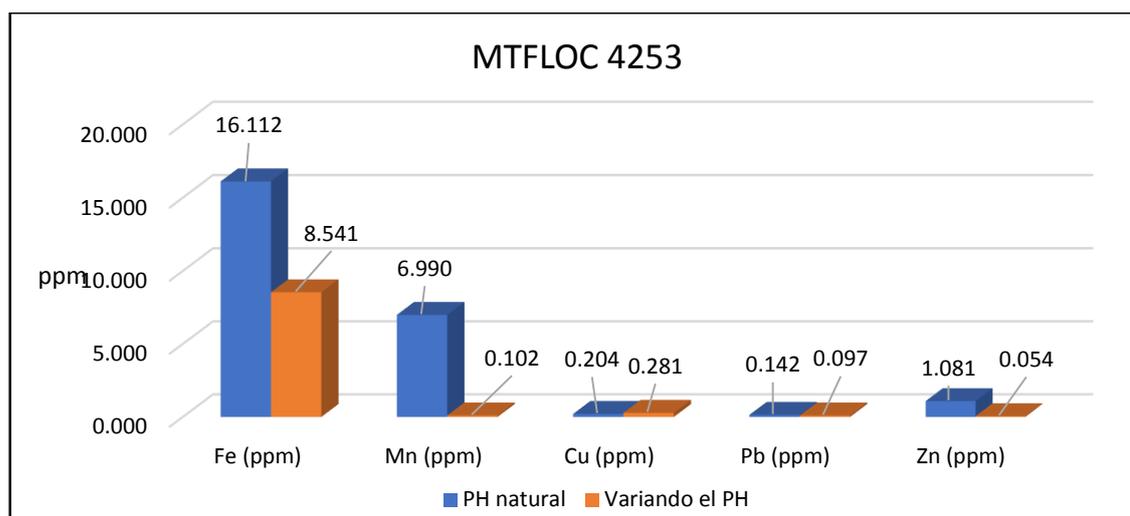


Figura 27: Precipitación comparativa de MTFLOC 4253 a pH 5.73 y 10.70.

4.6.1. Análisis de resultados

De acuerdo a las pruebas de sedimentación, se evaluó la precipitación de metales de cada floculante: CHEMLOK 2010, RENAFLOC 1120, AR-3120, MTFLOC 4253 a un pH natural (5.70) y variando el pH (10.70).

- Para determinar la precipitación de metales, turbidez y sólidos totales disueltos se consideró el tiempo de 55 minutos y trabajando a un pH de 10.70 que es lo que más interesa para poder evaluar y determinar el uso correcto de los floculantes en la planta MINSUR, se obtiene los mejores resultados utilizando el AR 3120 precipitando el Fe 2.427 ppm, Mn 0.023 ppm seguido del RENAFLOC 1120 precipitando el Fe 5.306 ppm, Mn 0.046 ppm y otros metales.
- Evaluando la turbidez a un pH de 10.70 se evidencia de que la turbidez muestra mejores resultados utilizando el RENAFLOC 1120 con una turbidez de 8.51 NTU.
- Evaluando los sólidos totales disueltos a un pH de 10.70 el que mejor resultado evidencia es utilizando el AR 3120.

V. CONCLUSIONES

PRIMERA: En la velocidad de sedimentación y precipitación de metales se obtuvieron mejores resultados para el tratamiento de pulpa de relaves el floculante RENAFLOC 1120 demostrándose que la velocidad de sedimentación se incrementa con el aumento del pH de la muestra tratada y en cuanto a remoción de metales, se puede apreciar una excelente performance del floculante AR-3120 seguido del RENAFLOC 1120, obteniendo bajos valores de Fe y Mn.

SEGUNDA: El que presenta mejor velocidad de sedimentación es el RENAFLOC 1120 tanto en pH natural y variando el pH en los tiempos de 2, 5, 10 minutos. A su vez le sigue CHEMLOK 2010 también presenta una mejor velocidad de sedimentación en tiempos ya mencionados, seguidamente MTFLOC 4253 presenta una velocidad de sedimentación regular y por último que es el AR-3120.

TERCERA: El floculante AR 3120 a un pH de 10.70 precipita al Fe a 2.427 ppm y Mn a 0.023 ppm seguido del RENAFLOC 1120 precipitando al Fe a 5.306 ppm y Mn a 0.046 ppm. Sin embargo, para seleccionar el floculante adecuado se considera principalmente la velocidad de sedimentación; presentando una excelente alternativa para precipitar metales el RENAFLOC 1120.

VI. RECOMENDACIONES

PRIMERA: Se recomienda realizar pruebas de velocidad de sedimentación como nuevas alternativas a nivel de laboratorio con otros floculantes, bajando el consumo de floculante.

SEGUNDA: El sistema de dilución de floculante; debe permitir un control óptimo para la preparación del polímero, ya que de eso dependerá con éxito la floculación y el desarrollo de la velocidad de sedimentación.

TERCERA: Definir un control en la dilución de la pulpa de relave mediante la medición constante de la densidad y porcentaje de sólidos en el alimento hacia el espesador de relaves.

VII. REFERENCIAS

- Ames, C. y Lovera, D. (2012). *Control de variables en el espesador de cono profundo en la recuperación de relaves altamente fluidos*. Lima: Artículo de investigación Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Cabrejos, A. (2011). *Estudio de prefactibilidad para la recuperación de agua a partir de relaves de gran minería de cobre mediante la tecnología de relaves espesados*. Lima: Tesis de la Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de ingeniería geológica minera y metalúrgica.
- Fernando, C. (2001). *Manual de Filtración y separación*. Chile: Editora Margarita Menéndez G. Centro de Imagen Corporativa.
- Gadelha, S., Gonçalves, G. y França, A. (2016). *Aplicación de floculantes para mejorar las propiedades de deshidratación y filtración. Coordination of Mineral Processes*, Argentina: CETEM - Centre for Mineral Technology XIII Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales.
- Gómez, P. (2012). *Evaluación pruebas de espesamiento de relaves en planta piloto*. Chile: (Tesis) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso Facultad de Ingeniería Escuela de ingeniería química.
- Hawkes, J. (1997) *What Is a Heavy Metal?* Journal of Chemical Education, 74, 1374.

<http://dx.doi.org/10.1021/ed074p1374>
- Mejias, C. (2015). *Identificación de la función densidad de flujo mediante medición de curvas de asentamiento de suspensiones y simulación numérica de sedimentación continua*. Chile: Universidad de Concepción.

- Salcedo, A. (2015). *Estudio para mejorar la recuperación de estaño mediante la flotación inversa de sulfuros en la planta piloto Bofedal II de la unidad san Rafael MINSUR S.A.* Arequipa: Tesis Universidad Nacional de San Agustín.
- Sengupta, K. (2002). *Cost Efficiency and Demand Fluctuation under Data Envelopment Analysis*. *Operations Research* 39(3-4): 161-176.
- Tejada, R. (2017) *Tratamiento y sedimentación de la turbidez con cal en las aguas residuales de los relaves mineros de la unidad operativa minera Santiago*. Puno: Tesis Universidad Nacional del Altiplano.

ANEXOS

Anexo 1: informe de ensayo de laboratorio metalúrgico MINSUR.



FORME DE ENSAYO PCA 170174-LBQ

Para: Ing. Luis Murazzo B. **Lugar de Recepción:** Área de Vía húmeda del laboratorio

De: Ing. Dietter Chávez **Características:** Muestras de agua en envases plásticos de 1 L

Jefe Laboratorio Químico UM San Rafael **Nro de muestras:** 10

Análisis: pH- TSS- Conductividad- Metales totales- Metales Disuelt **Muestras:** ESPECIALES

Fecha de monitoreo: 25-05-17 **Fecha de reporte:** 26-05-17 **Hora de reporte:** 04:22:09 hrs

Nro	Descripción	PARÁMETROS FÍSICOS						MET DIS	METALES TOTALES								
		Tem p. °C	pH	Conductividad		DO ppm	TSS ppm	Fe ppm	Fe ppm	Mn ppm	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Cd ppm	Cr ppm	Hg ppm	As ppm
				µS/Cm	mS/Cm												
1	LAB-AGUA-17-083	12.8	5.45	-	5.72	-	31	7.599	16.112	6.990	0.204	0.142	1.081	<0.005	-	-	-
2	LAB-AGUA-17-084	12.9	5.58	-	5.92	-	47	8.584	16.282	7.084	<0.01	0.132	1.074	0.006	-	-	-
3	LAB-AGUA-17-085	12.8	4.39	-	6.04	-	34	9.312	16.916	7.196	0.188	0.117	1.117	<0.005	-	-	-
4	LAB-AGUA-17-086	12.9	3.84	-	6.39	-	19	9.841	16.788	7.158	0.217	0.110	1.092	<0.005	-	-	-
5	LAB-AGUA-17-087	12.8	5.65	-	6.01	-	56	9.375	18.003	7.279	0.348	0.139	1.122	0.005	-	-	-
6	LAB-AGUA-17-088	12.9	5.70	-	5.92	-	76	0.607	8.541	0.102	0.281	0.097	0.054	<0.005	-	-	-
7	LAB-AGUA-17-089	12.8	9.87	-	6.58	-	52	0.321	5.306	0.046	0.151	0.070	0.079	<0.005	-	-	-
8	LAB-AGUA-17-090	12.8	10.07	-	6.65	-	12	0.454	2.427	0.023	0.189	0.059	0.024	<0.005	-	-	-
9	LAB-AGUA-17-091	12.8	10.17	-	6.66	-	50	0.346	6.538	0.072	0.157	0.070	0.026	<0.005	-	-	-
10	LAB-AGUA-17-092	12.9	10.23	-	6.68	-	55	0.415	4.188	0.044	0.143	0.073	0.026	0.006	-	-	-

L.D: Límites de detección d	-	-	0.01	-	-	5	0.03	0.03	0.005	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	-	0.01
LMP DS 003-2010-MINAM	>35	6.5-8.5	-	-	-	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LMP DS 010-2010-MINAM	-	6-9	-	-	-	50	2	-	-	0.5	0.2	1.5	0.05	0.1	0	0.1
LMP DS 010-2010-MINAM	-	6-9	-	-	-	25	2	-	-	0.4	0.16	1.2	0.04	0.08	0	0.08

Supervisor de Miguel Torres Ayma

DS 003-2010-MINAM: Límites máximos permisibles para los efluentes de planta de tratamientos de Aguas residuales Domésticas o Municipales
 DS 010-2010-MINAM: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas

(*) En cualquier momento
 (**) Promedio anual
 F-SR-LABQ-36
 Revisión: 01

Observaciones

Ninguna

Atte Ing. Dietter Chávez
 Jefe Laboratorio Químico

FUENTE: Laboratorio MINSUR

Anexo 2: Límites máximos permisibles de precipitación de metales pesados.

PRECIPITACION DE METALES				
Metales	Fe	Mg	Cu	Pb
Objetivo	0.9	0.2	0.25	0.15
LMP	1	0.2	0.4	0.16

FUENTE: Elaboración propia

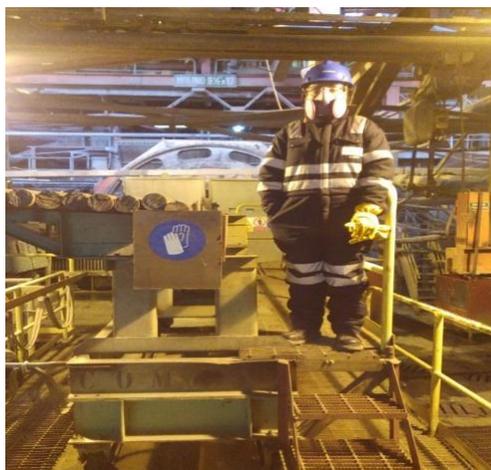
Anexo 3: Fotos de pruebas en laboratorio MINSUR.



Agitación de pulpa de relaves



Midiendo la cinética de sedimentación



Vista de la planta concentradora



Evaluando el tiempo de sedimentación



Medición del pH del agua clarificada

Midiendo la altura de sedimentación



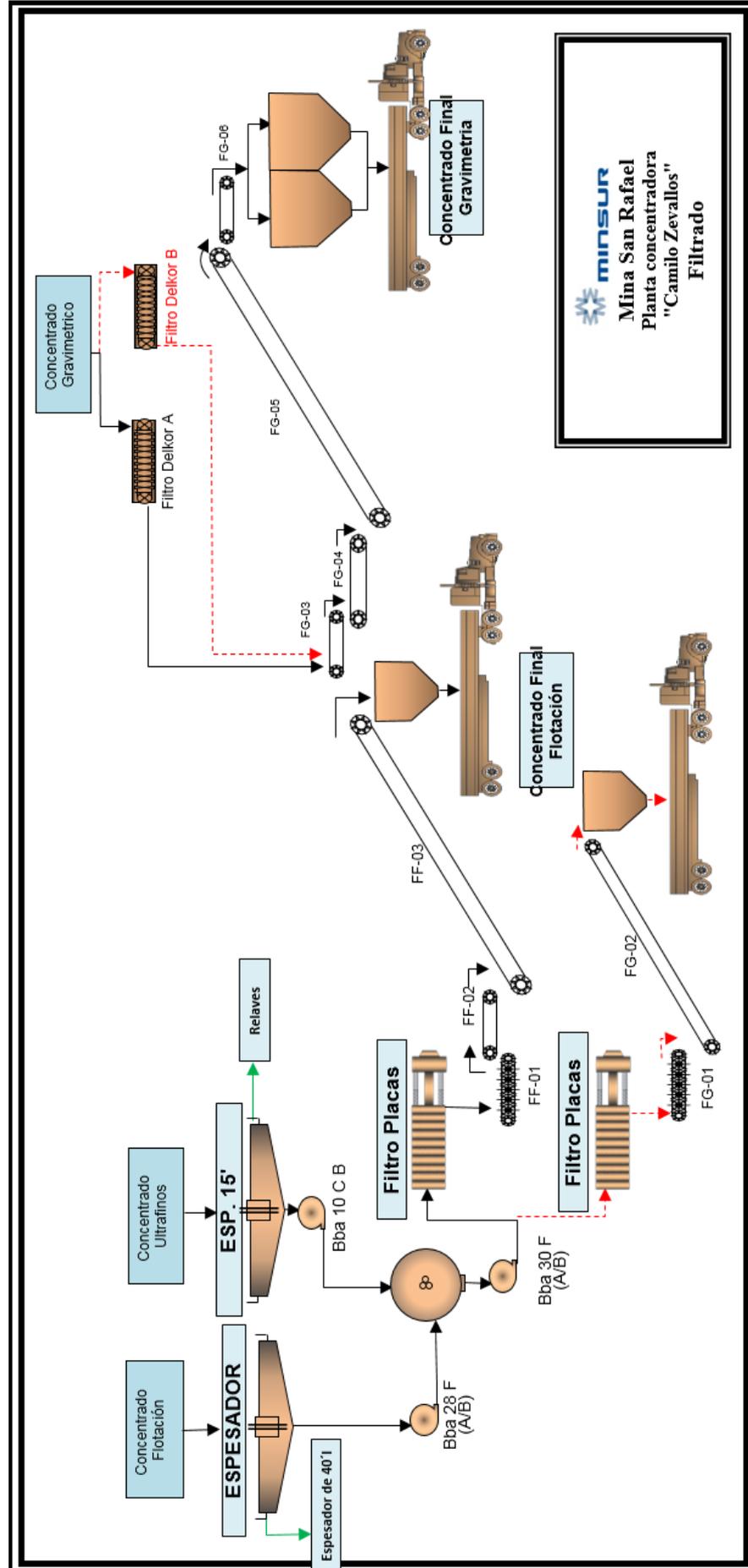
Turbidímetro



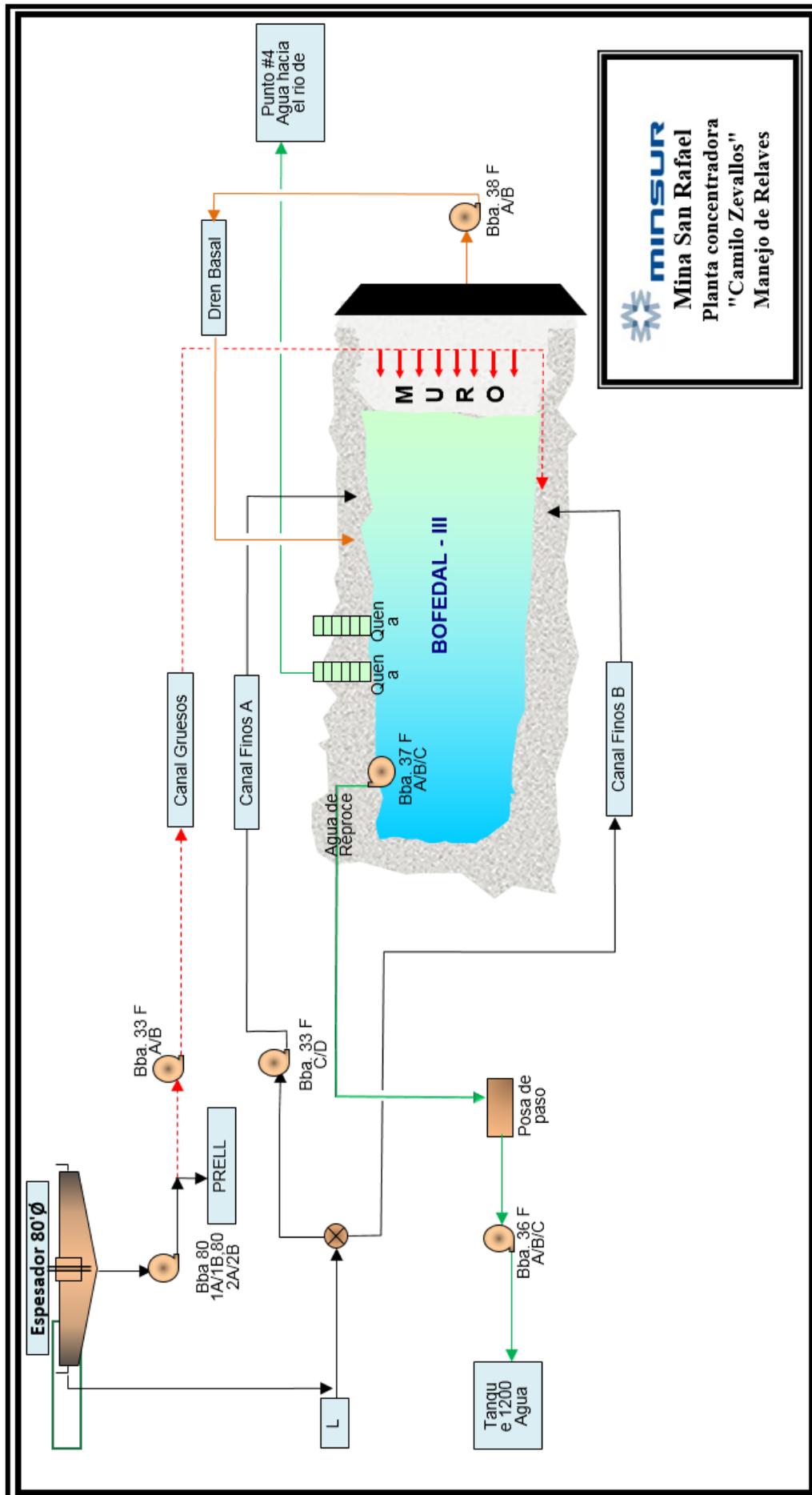
Laboratorio metalúrgico MINSUR

Anexo 4: Flow sheet planta concentradora MINSUR.

FILTRADO



MANEJO DE RELAVES



BOMBAS DE AGUA

