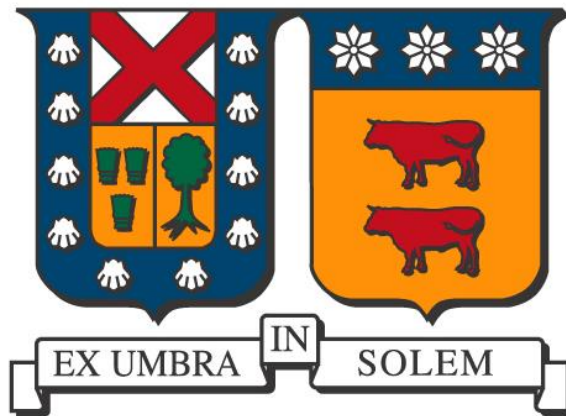


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA Y DE MATERIALES
VALPARAISO – CHILE



**“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE
AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE
CODELCO DIVISIÓN ANDINA”**

ALEJANDRA SOLEDAD VERA APABLAZA

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

Profesor Guía
ROMKE KUYVENHOVEN

Noviembre 2020

AGRADECIMIENTOS

Luego de varios años de estudio, esfuerzo y constancia, finaliza una de las etapas más importantes de mi vida y no puedo dejar de agradecer a todas las personas que estuvieron presente en alguna de las etapas que me llevaron a este momento.

A mi Mamá Mercedes le doy las gracias por estar siempre a mi lado, desde el primer momento incentivándome a ser cada día mejor, por entregarme las herramientas necesarias para enfrentar la vida, por celebrar mis triunfos, levantarme cuando caía y darme alas para volar. A mis hermanos les doy las gracias por respetar mis momentos de estudio y soportar mi estrés. A mi sobrino Agustín, por el solo hecho de existir y haber llegado a llenar de alegrías nuestra vida.

A mi tata J. Miguel Apablaza y mi mami Gladys Cabrera, por entregarme todo el amor y apoyo que pudieron e incentivarme siempre a superarme, a ser mejor que ellos y lograr todo lo que me proponga en la vida. Junto con ello le agradezco a mis tías y primos porque me siento una bendecida de haber nacido en esta familia.

A mis amadas amigas de la universidad, Nico, Andrea, Meli, Sol y Coty, por entregarme los mejores momentos de mi etapa universitaria, incluyendo las largas jornadas de estudio, no tengo duda que seguiremos cultivando nuestra amistad a pesar de la distancia y los caminos que tomen nuestras vidas.

A mi compañero de vida Juan, que llegó en el momento que más lo necesitaba, por acompañarme en mi última etapa universitaria, por apoyarme siempre, decirme que lo puedo hacer cuando veo todo oscuro y soportar mi alto nivel de estrés en esta última etapa.

A mi tutor en Andina Nicolás Miranda, quien confió en mis capacidades y me ofreció la oportunidad de desarrollar este trabajo, que fue sin duda una experiencia única. A todo el equipo del laboratorio metalúrgico DAND, don Fernando Castañeda, don Patricio



Gaete, y don Juan Nuñez, por apoyarme en la realización de mi trabajo y compartir su experiencia laboral con las nuevas generaciones. No puedo dejar fuera al equipo de Cesmec, quienes siempre estuvieron dispuestos ante los requerimientos para desarrollar mi trabajo. A Antonio Candia y Gianfranco Gámbaro, de recursos hídricos, por la buena disposición en la facilitación de instalaciones de laboratorio, responder mis infinitas consultas y estar siempre dispuestos a entregar su conocimiento.

A mis amigos memoristas en Andina, con quien sigo teniendo contacto, Javi, Dani, Mirko, Pablo, por su apoyo y amistad, por acompañarnos en esta incursión acercándonos a la vida real luego de varios años de libros.

Finalmente, a mi profesora guía, Romke Kuyvenhoven, quien estuvo en cada momento de este trabajo, por su apoyo y preocupación constante, tanto cuando estaba en faena, como cuando volví, por su disponibilidad a resolver todas mis dudas y guiarme cuando en algunos momentos me perdí. Por confiar en mis capacidades y entregarme las herramientas que me han permitido superarme cada día de este proceso, sin lugar a duda sin ella esto no hubiera sido posible.

“Gracias a todas aquellas personas que soñaron a mi lado, que me frenaron cuando di vueltas sin sentido y me empujaron a abismos en los que sólo me asomaba por miedo”



DEDICATORIA

En memoria de Gladys Cabrera Arancibia Q.E.P.D

Desde que tú no estás las noches son más oscura...

RESUMEN

Buscando mitigar la disminución continua de las leyes de mineral valioso en los yacimientos, las faenas deben aumentar la cantidad de mineral a procesar con el objetivo de mantener los beneficios. Con el aumento del tratamiento en las plantas, se requiere una mayor cantidad de agua para su procesamiento, lo que no es sencillo, debido a las condiciones actuales de sequía en el país. Planteado lo anterior y en búsqueda de la mejora continua surge este trabajo orientado en aumentar la recuperación de aguas del proceso de espesamiento de concentrados y relaves y mejorar la calidad del agua recuperada.

El desafío planteado, motiva la evaluación de nuevos floculantes para el proceso. Como resultado de un análisis del mercado, se propone la prueba de un modificador reológico Rheomax 1050, un floculante convencional aniónico, Magnafloc 338 y un floculante convencional neutro, Magnafloc 333.

Este estudio consistió en desarrollar una línea base del proceso de espesamiento de concentrado final y relave total, a través de sedimentaciones batch a nivel de laboratorio. La velocidad de sedimentación del relave total, para un sólido inicial de 17%, utilizando floculante Floerger 913sh, con una dosificación de 14 [g/t] (condiciones operacionales), es de 2,1 [m/h], con una turbidez en el agua clara de 86 [NTU] y un 73% de recuperación de agua, que permite que la planta tenga un consumo de agua fresca de 0,84 [m³/tms]. Para los experimentos de concentrado final, realizados a un sólido inicial de 20%, utilizando Floerger 913sh, con una dosificación de 10 [g/t], se obtiene una velocidad de sedimentación de 5,61 [m/h], una medición de turbidez de 29 [NTU] y una recuperación de agua de 87%.

Establecida la línea base del proceso se analiza el efecto de la concentración de sólidos inicial y la dosificación de floculante, sobre la velocidad de sedimentación, de lo cual se obtiene que el factor sólido inicial, es el que genera una mayor variabilidad en la velocidad

de sedimentación. La turbidez obtenida es definida por una contribución del efecto generado por el sólido inicial y la dosis de floculante.

De los resultados obtenidos de la evaluación a los floculantes propuestos, para el espesamiento de relaves, el floculante Rheomax 1050, genera un aumento en un 130% sobre la condición actual, alcanzando una velocidad de sedimentación de 4,83 [m/h] con una turbidez del agua recuperada de 29 [NTU] y un porcentaje de recuperación de 76% que entrega condiciones para tener un consumo de agua fresca de 0,78 [m³/tms]. Los demás floculantes estudiados no generaron mejorar técnicas en el proceso de espesamiento de relaves. Para el espesamiento de concentrados dentro de los floculantes propuestos, no se genera una mejora técnica ni económica con ninguno de ellos.

Con este estudio se genera una propuesta técnica, que consiste en realizar una prueba nivel industrial utilizando el floculante Rheomax 1050 de BASF, a un sólido inicial de 17% y una dosificación de 14 [g/ton]. Mientras que para el concentrado final se recomienda utilizar la máxima dilución que permite el espesador, que según su diseño es de 12%, pues se podría aumentar en un 12% aproximadamente la velocidad de sedimentación, sin generar un aumento significativo de turbidez en el agua recuperada.

ABSTRACT

In an effort to mitigate the continuing decline in valuable ore grades at the sites, the sites must increase the amount of ore to be processed in order to maintain profits. With increased treatment at the plants, more water is required for processing, which is not easy given the current dry conditions in the country. With this in mind, and in search of continuous improvement, this work is oriented towards increasing the recovery of water from the concentrate and tailings thickening process and improving the quality of the water recovered.

The challenge posed, motivates the evaluation of new flocculants for the process. As a result of benchmarking, it is proposed to test a Rheomax 1050 rheological modifier, a conventional anionic flocculant Magnafloc 338 and a conventional neutral flocculant Magnafloc 333.

This study consisted in developing a baseline of the process of final concentrate thickening and total tailing, through batch sedimentations at laboratory level. The sedimentation rate of the total tailings, for an initial solid of 17%, using Floerger 913sh flocculant, with a dosage of 14 [g/t] (operational conditions), is 2.1 [m/h], with a clear water turbidity of 86 [NTU] and 73% water recovery, which allows the plant to have a fresh water consumption of 0.84 [m³/tms]. For the final concentrate experiments, performed at an initial solid of 20%, using Floerger 913sh, with a dosage of 10 [g/t], a sedimentation rate of 5.61 [m/h], a turbidity measurement of 29 [NTU] and a water recovery of 87% are obtained.

Once the baseline of the process is established, the effect of the initial solids concentration and the flocculant dosage on the sedimentation rate is analyzed, from which it is obtained that the initial solid factor is the one that generates a greater variability in the sedimentation rate. The obtained turbidity is defined by a contribution of the effect generated and the flocculant dosage.



From the results obtained from the evaluation to the proposed flocculants for tailings thickening, the Rheomax 1050 flocculant generates an increase of 130% over the current condition, reaching a sedimentation rate of 4.83 [m/h] with a recovered water turbidity of 29 [NTU] and a recovery rate of 76% that provides conditions for fresh water consumption of 0.78 [m³/tms]. The other flocculants studied did not generate improved techniques in the tailings thickening process. For the thickening of concentrates within the proposed flocculants, no technical or economic improvement is generated with any of them.

With this study a technical proposal is generated, which consists of doing an industrial level test using BASF's Rheomax 1050 flocculant, at an initial solid of 17% and a dosage of 14 [g/ton]. While for the final concentrate it is recommended to use the maximum dilution that allows the thickener, which according to its design is 12%, because it could be increased in a 12% approximately the sedimentation speed, without generating a significant increase of turbidity in the recovered water.



GLOSARIO

- DAND : División Andina
- [tms/h] : Toneladas métricas secas
- ARD : Drenaje ácido de roca
- HDS : High density sludge
- E.P : Elaboración propia
- S/F : Sin floculante
- X_s : Porcentaje de sólidos inicial pulpa [%]
- X_f : Porcentaje de sólidos final pulpa [%]
- D_f : Dosis de floculante [g/t]
- V_s : Velocidad de sedimentación [m/h]

TABLA DE CONTENIDO

Listado de Figuras	13
Listado de Tablas.....	18
CAPITULO 1 Introducción	20
1.1 Trabajo de tesis	20
1.2 Codelco Andina	21
1.3 Hipótesis.....	23
1.4 Objetivos	23
1.4.1 Objetivo general	23
1.4.2 Objetivos específicos	23
CAPITULO 2 REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA.	24
2.1 El proceso mismo: Espesamiento.....	24
2.2 El equipamiento: Espesadores	24
2.3 Físicoquímica de superficies.....	26
2.3.1 Teoría DLVO	26
2.3.2 Fuerzas de Van der Waals.....	27
2.3.3 Doble capa eléctrica.....	27
2.4 Efecto de las características de la pulpa en el espesamiento	28
2.4.1 Composición mineralógica	28
2.4.2 Distribución de tamaño y forma de las partículas	29
2.4.3 Concentración de sólidos en la pulpa.....	30
2.5 Agregación de partículas	31
2.5.1 Tipos de flocculantes	34
2.5.2 Dosis de flocculante	35

2.5.3 pH del sistema	36
2.6 Calidad del agua recuperada.....	36
2.6.1 Parámetros que influyen en la calidad del agua.	38
2.6.2 Métodos de medición de calidad de agua	40
2.7 Metodología para el diseño de espesadores mediante sedimentación batch.....	41
2.7.1 Método de Mishler.....	41
2.7.2 Método de Cloe & Clevenger	43
2.7.3 Método de Kynch	43
2.7.4 Método de Talmage & Fitch	45
2.8 Diseño de experimentos y análisis estadístico.....	46
2.8.1 Diseño de experimentos.....	46
2.8.2 Análisis de resultados	51
2.8.3 . Herramientas de Análisis estadístico.....	52
CAPITULO 3 Antecedentes de la empresa	54
3.1 Descripción proceso productivo CODELCO Andina	54
3.2 Superintendencia de Recursos Hídricos DAND	56
3.3 Contexto ambiental.....	59
CAPITULO 4 Benchmarking	63
CAPITULO 5 Trabajo experimental	66
5.1 Muestras utilizadas	66
5.2 Diseño experimental	68
5.3 Procedimiento experimental	71
5.4 Equipos de laboratorio.....	76
5.4.1 Sedimentador.....	76
5.4.2 Turbidímetro.....	77

5.4.3 Espectrofotómetro	78
5.4.4 Ro-tap	79
5.4.5 Agitador magnético	80
5.4.6 Balanzas	80
5.4.7 pH-metro	81
5.4.8 Materiales e insumos	81
CAPITULO 6 Resultados.....	82
6.1 Etapa 1: Línea base con relave total y concentrador final	82
6.1.1 Resultados obtenidos con Relave Total y Concentrado Final	82
6.1.2 Resultados experimentos concentrado final	83
6.2 Etapa 2: Evaluación de floculantes	84
6.2.1 Resultados experimentos relave total	84
6.2.2 Resultados experimentos concentrado final	87
6.3 Etapa 3: Evaluación variación pH	90
6.3.1 Resultados experimentos relave total	90
6.3.2 . Resultados experimentos concentrado final.	93
6.4 Recuperación de agua desde el proceso de sedimentación	96
CAPITULO 7 Análisis y discusión técnica de resultados.....	97
7.1 Etapa 1: Desarrollo de Línea Base	97
7.1.1 Línea base: Sedimentación de relave total	97
7.1.2 Línea base: Sedimentación de concentrado final	104
7.2 Etapa 2: Impacto de cambio de floculante en la sedimentación	110
7.2.1 Sedimentación de relave total	110
7.2.2 Sedimentación de concentrado final	111
7.3 Etapa 3: Impacto de variación en pH	112

7.3.1 Sedimentación de relave total.	112
7.3.2 Sedimentación de concentrado final.....	112
7.4 Recuperación de agua.....	114
CAPITULO 8 Evaluación costo/beneficio simplificado.....	118
8.1 Metodología.....	118
8.2 Escenario base, situación actual CODELCO Andina	119
8.3 Escenario mejora operacional: Rheomax 1050.....	121
8.1 Escenario aumento de tonelaje: agua fresca disponible constante.....	124
8.1 Escenario escasez hídrica.	125
CAPITULO 9 Conclusiones y recomendaciones	126
9.1 Conclusiones	126
9.2 Recomendaciones	128
CAPITULO 10 BIBLIOGRAFÍA	130
ANEXOS.....	134

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolución de la ley de cobre y tonelaje tratado en CODELCO Chile(Pizarro & (Codelco), 2019).	21
Figura 1.2. Evolución de ley de cobeza de cobre y molibdeno CODELCO Andina(CODELCO Andina, 2018b).	22
Figura 2.1. Clasificación operacional de los espesadores (Concha, 2001).	25
Figura 2.2. Representación de las interacciones de Van der Waals (Puiu, 2013).	27
Figura 2.3. Potencial eléctrico distribuido en un sistema de una partícula sumergida en un electrolito (Concha, 2013).	28
Figura 2.4 Velocidad de sedimentación de muestras con contenido de arcillas (Briceño & Rubio, 2012).	29
Figura 2.5. Curvas de sedimentación de lodos (Cruz & Martínez-rojas, 2016).	31
Figura 2.6 Interacción entre las partículas y el polímero (Ortiz, 2012).	33
Figura 2.7. Clasificación tipos de floculantes (E.P).	35
Figura 2.8. Flotación de Pirita en la ausencia y presencia de $1,5 \times 10^{-3}$ [mol/dm ³] de iones de cobre (Peng & Lu, 1998).	38
Figura 2.9. Turbidez del agua recuperada de pruebas de sedimentación batch a pulpas de cuarzo (Ravanal, 2017).	39
Figura 2.10. Turbidez del agua recuperada de sedimentaciones batch en función de la dosis de floculante (Vera, 2019).	40
Figura 2.11. Método de Kynch para determinar concentración y velocidad de sedimentación de una suspensión mediante un sólo ensayo batch (Concha, 2001).	44
Figura 2.12. Construcción de Talmage & Fitch (Concha, 2001).	45
Figura 2.13. Ejemplo factores de proceso y variables de respuesta para un sistema (Gutierrez & De La Vara, 2008).	47
Figura 2.14. Clasificación general de diseños de experimentos (Gutierrez & De La Vara, 2008).	48
Figura 2.15. Representación geométrica diseño factorial 2^k . a) Diseño factorial 2^2 , b) Diseño factorial 2^3 (E.P).	49

Figura 2.16. Representación geométrica diseño factorial 3^k . a) Diseño factorial 3^2 , b) Diseño factorial 3^3 (E.P).	49
Figura 3.1. Flowshett general CODELCO división Andina (CODELCO Andina, 2018a).55	
Figura 3.2. Disposición espesadores de relave CODELCO Andina (CODELCO Andina, 2018a).....	56
Figura 3.3. Muestras de aguas utilizadas. a) agua haulage, b) agua ARD.	58
Figura 3.4. Diagrama general proceso planta HDS Cordillera (Gambaro, 2019).	59
Figura 3.5. Serie anual del índice regional de precipitación (RPI) de Chile Central (Garreaud et al., 2020).	60
Figura 3.6. Diagrama flujo de agua CODELCO Andina [E.P].	62
Figura 4.1. Importaciones de floculantes por fabricantes 2005-2018 (Cochilco, 2018). .64	
Figura 5.1. Representación geométrica de los experimentos a realizar en la primera etapa; a) Experimentos relave total, b) Experimentos concentrado final.	69
Figura 5.2. Representación geométrica de los experimentos a realizar en la primera etapa; a) Experimentos relave total, b) Experimentos concentrado final.	70
Figura 5.3. Esquema general de pruebas de laboratorio [E.P].	71
Figura 5.4. Sedimentación batch (Concha, 2001).	74
Figura 5.5. Probetas para sedimentación [E.P].	75
Figura 5.6. Cubeta medición de turbidez [E.P].	75
Figura 5.7. Curva de sedimentación típica [E.P].....	76
Figura 5.8. Equipo de sedimentación. a) Sedimentador Serquimet. b) Probetas modificadas.....	77
Figura 5.9. Turbidímetro HI-83414, con cubetas de medición y set de calibración.	78
Figura 5.10 Set de prueba de espectrofotometría. a) Spectroquant NOVA 60A, b) Test de cubeta, medición de iones.....	79
Figura 5.11. Equipos análisis granulométricos. a) Ro-Tap, b) set de mallas ASTM.....	79
Figura 5.12. Agitador magnético.	80
Figura 5.13. Balanzas. a) Balanza analítica, b) Balanza analítica de platillo.	81
Figura 6.1 Resultados pruebas de sedimentación relave total; floculante: Floerger 913sh; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.	83

Figura 6.2 Resultados pruebas de sedimentación concentrado final; floculante: Floerger 913sh; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.	84
Figura 6.3. Resultados pruebas de sedimentación relave final; floculante: Rheomax 1050; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.	85
Figura 6.4. Resultados pruebas de sedimentación relave final; floculante: Magnafloc 338; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.	86
Figura 6.5. Resultados pruebas de sedimentación relave final; floculante: Magnafloc 333; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.	87
Figura 6.6. Resultados pruebas de sedimentación concentrado final; floculante: Rheomax 1050; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.	88
Figura 6.7. Resultados pruebas de sedimentación concentrado final; floculante: Magnafloc 338; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.	89
Figura 6.8. Resultados pruebas de sedimentación concentrado final; floculante: Magnafloc 333; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.	90
Figura 6.9. Curvas de sedimentación relave total con variación de pH; Sólido inicial: 17%, dosis floculante: 9 [g/t], floculante: Floerger 913sh, modificador pH: agua ARD, s/f = sin floculante.	91
Figura 6.10. Turbidez agua clara en función del pH relave total; Sólido inicial 17%, dosis floculante: 14 [g/t], floculante: Floerger 913sh, modificador pH: agua ARD; a) t=10[min], b) t=30[min].....	92
Figura 6.11. Velocidad de sedimentación en función del pH relave total; Sólido inicial 17%, dosis floculante 14 [g/t], floculante: Floerger 913sh, Rheomax 1050, Magnafloc 338, Magnafloc 333, modificador pH: agua ARD.....	93
Figura 6.12. Turbidez agua clara es función del pH relave total t=30[min]; Sólido inicial 17%, dosis floculante 14 [g/t], floculante: Floerger 913sh, Rheomax 1050, Magnafloc 338, Magnafloc 333, modificador pH: agua ARD.....	93
Figura 6.13. Curvas de sedimentación concentrado final con variación de pH; Sólido inicial: 20%, dosis floculante: 10 [g/t], floculante: Floerger 913sh, modificador pH: agua haulage, s/f = sin floculante.....	94

Figura 6.14. Turbidez agua clara en función del pH concentrado final; Sólido inicial 20%, dosis floculante: 10 [g/t], floculante: Floerger 913sh, modificador pH: agua haulage; a) t=10 [min], b) t=30 [min]	94
Figura 6.15. Velocidad de sedimentación en función del pH concentrado final; Sólido inicial 20%, dosis floculante 10 [g/t], floculante: Floerger 913sh, Rheomax 1050, Magnafloc 338, Magnafloc 333, modificador pH: agua haulage.	95
Figura 6.16. Velocidad de sedimentación en función del pH concentrado final; Sólido inicial 20%, dosis floculante 10 [g/t], floculante: Floerger 913sh, Rheomax 1050, Magnafloc 338, Magnafloc 333, modificador pH: agua haulage.	95
Figura 6.17. Recuperación de agua para todas las condiciones a sedimentaciones de concentrado final (co) y relave total (r); f1: Floerger 913sh, f2: Rheomax 1050, f3: Magnafloc 338, f4: Magnafloc 333.	96
Figura 7.1. Contribución porcentual de los factores sólido inicial y dosis de floculante sobre respuesta velocidad de sedimentación [m/h]; floculante Floerger 913-sh, pulpa relave total.	98
Figura 7.2. Comparación velocidad de sedimentación relave total; floculante Floerger 913sh; Xs = sólido inicial pulpa.	99
Figura 7.3. Contribución porcentual de los factores sólido inicial y dosis de floculante sobre respuesta turbidez agua clara t=30[min]; floculante Floerger 913sh, pulpa relave total.....	100
Figura 7.4. Comparación turbidez agua clara t=30[min] relave total; floculante Floerger 913sh; Xs = sólido inicial pulpa.	101
Figura 7.5. Velocidad de sedimentación relave total; Floculante: Floerger 913sh, E: datos experimentales, M: datos modelo.	103
Figura 7.6. Sólido final pruebas sedimentación relave total; Floculante: Floerger 913sh, E: datos experimentales, M: datos modelo.....	104
Figura 7.7. Contribución porcentual de los factores sólido inicial y dosis de floculante sobre respuesta velocidad de sedimentación [m/h]; floculante Floerger 913-sh, pulpa concentrado final.....	105
Figura 7.8. Comparación velocidad de sedimentación concentrado final; floculante Floerger 913sh; Xs = sólido inicial pulpa.	106

Figura 7.9. Contribución porcentual de los factores sólido inicial y dosis de floculante sobre respuesta turbidez agua clara $t=30$ [min]; floculante Floerger 913-sh, pulpa concentrado final.....	107
Figura 7.10. Comparación turbidez agua clara $t=30$ [min] concentrado final; floculante Floerger 913sh; X_s = sólido inicial pulpa.	107
Figura 7.11. Velocidad de sedimentación concentrado final; Floculante: Floerger 913sh, E: datos experimentales, M: datos modelo.....	108
Figura 7.12. Sólido final pruebas sedimentación relave total; Floculante: Floerger 913sh, E: datos experimentales, M: datos modelo.....	109
Figura 7.13. Orden de floculante según peso molecular (Avilés, 2020).	111
Figura 7.14. Probetas sedimentación batch concentrado final.	114
Figura 7.15. Probetas sedimentación batch relave total.	114
Figura 7.16. Área unitaria experimentos relave total; f1: Floerger 913sh, f2: Rheomax 1050, f3: Magnafloc 338, f4: Magnafloc 333.....	116
Figura 7.17. Área unitaria experimentos concentrado final; f1: Floerger 913sh, f2: Rheomax 1050, f3: Magnafloc 338, f4: Magnafloc 333.....	117
Figura 8.1. Velocidad de sedimentación relave total. Dosis floculante 14 [g/t], sólido inicial 17%.....	121
Figura 8.2. Turbidez agua clara sedimentación relave total. Dosis floculante 14 [g/t], sólido inicial 17%.	122
Figura 8.3. Concentración de sólidos en el sedimento. Sólido inicial 17%, dosis floculante 14 [g/t].....	123
 Figura B. 1. % Sulfuros en base mineral - Cabeza mina rajo (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, CODELCO Division Andina, 2018)	135
Figura B. 2. % Ganga base mineral - Cabeza mina rajo (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, CODELCO Division Andina, 2018).	136
 Figura D. 1. Instructivo sedimentación de sólidos en suspensión CODELCO Andina, primera parte.....	143

Figura D. 2. Instructivo sedimentación de sólidos en suspensión CODELCO Andina, segunda parte.	144
Figura D. 3. Extracto instructivo turbidímetro HI83414 CODELCO Andina.	145
Figura D. 4. Procedimientos para mediciones en Spectroquant Nova 60A. a) iones Cu+2, b) iones Ca+2, c) iones Al+3, d) iones Mg+2 (Supelco Analytical Products, 2019).	146
Figura D. 5. Procedimientos para mediciones en Spectroquant Nova 60A. a) iones SO4-2, b) iones Cl-, c) iones Fe+3 (Supelco Analytical Products, 2019)	147
Figura D. 6. Extracto instructivo análisis granulométrico CODELCO Andina, primera parte.....	148
Figura D. 7. Extracto instructivo análisis granulométrico CODELCO Andina, segunda parte.....	149

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1. Medición de parámetros del agua (E.P).	41
Tabla 2.2. Tabla de ANOVA genérica (Gutierrez & De La Vara, 2008).	52
Tabla 4.1. Marcas de floculantes utilizados en minería chilena.	63
Tabla 4.2. Especificación técnica floculantes [E.P].....	65
Tabla 5.1. Resultado análisis granulométrico muestras utilizadas, P80.	66
Tabla 5.2. Caracterización de aguas utilizadas en los experimentos [E.P].	67
Tabla 5.3. Factores experimentos primera etapa.	68
Tabla 5.4. Niveles de experimentos primera etapa para los factores seleccionados.	68
Tabla 5.5. Factores experimentos segunda etapa.....	69
Tabla 5.6. Niveles de experimentos segunda etapa para los factores seleccionados. ...	69
Tabla 5.7. Factores experimentos tercera etapa.	71
Tabla 5.8. Niveles experimentos tercera etapa para los factores seleccionados.	71
Tabla 5.9. Dimensiones probetas de sedimentación equipo Serquimet.	77
Tabla 5.10. Materiales e insumos para el trabajo.	81
Tabla 7.1 ANOVA respuesta velocidad de sedimentación; floculante Floerger 913sh relave total.	97

Tabla 7.2. ANOVA respuesta turbidez agua clara; floculante Floerger 913sh relave total.	100
Tabla 7.3. ANOVA respuesta velocidad de sedimentación; floculante Floerger 913sh concentrado final.....	104
Tabla 7.4. ANOVA respuesta turbidez agua clara; floculante Floerger 913sh concentrado final.....	106
Tabla 8.1. Base de cálculo análisis costo/beneficio.....	119
Tabla 8.2. Resultados caso base.	120
Tabla 8.3. Resultados escenario cambio floculante a Rheomax 1050.....	124
Tabla 8.4. Escenario aumento tonelaje 7%, floculante Rheomax 1050.....	124
Tabla 8.5. Resultados escenario escasez hídrica.	125
 Tabla A. 1. Especificaciones espesadores de relaves CODELCO Andina (Rios, Misle , & Silva , 2016).....	134
Tabla A. 2. Especificaciones espesador de concentrado CODELCO Andina (CODELCO Andina , 2013).....	134
 Tabla C. 1.Diseño de experimentos primera etapa relave total.	137
Tabla C. 2.Diseño de experimentos primera etapa concentrado final.....	138
Tabla C. 3. Diseño de experimentos segunda etapa relave total.....	138
Tabla C. 4. Diseño de experimentos segunda etapa concentrado final.	139
Tabla C. 5. Diseño de experimentos tercera etapa relave total.	140
Tabla C. 6. Diseño de experimentos tercera etapa concentrado final.....	142



CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Trabajo de tesis

Este trabajo se desarrolla para dar cumplimiento a los requerimientos académicos para la obtención del título de Ingeniero Civil Metalúrgico en la Universidad Técnica Federico Santa María. En la industria minera en Chile, pero también a nivel mundial, se ha observado una disminución de las leyes de mineral valioso en los yacimientos, lo que implica que se han debido aumentar los tonelajes a tratar para obtener los mismos o similares beneficios que en el pasado. CODELCO vive la situación mundial planteada en sus divisiones (Pizarro & (Codelco), 2019), como se muestra en la Figura 1.1. El aumento de tonelaje implica un aumento en la cantidad de agua requerida en el proceso y un aumento en la cantidad de relaves que se llevan una gran cantidad del agua utilizada. A menudo se observa que el aumento de tonelaje de relaves, en conjunto con una mineralización más compleja, principalmente asociada a arcillas, dificultan el proceso de espesamiento, perjudicando la cantidad y calidad del agua recuperada. Lo anteriormente expuesto junto con la escasez hídrica a nivel mundial, hace fundamental poder maximizar la cantidad de agua recuperada para reutilizarla.

En la búsqueda de recuperar la mayor cantidad de agua, en algunas ocasiones, se pierde el control de la calidad del agua recuperada. Un agua de menor calidad implica un aumento de material sólido en suspensión, lo que genera un impacto negativo en el proceso al que se recircula.

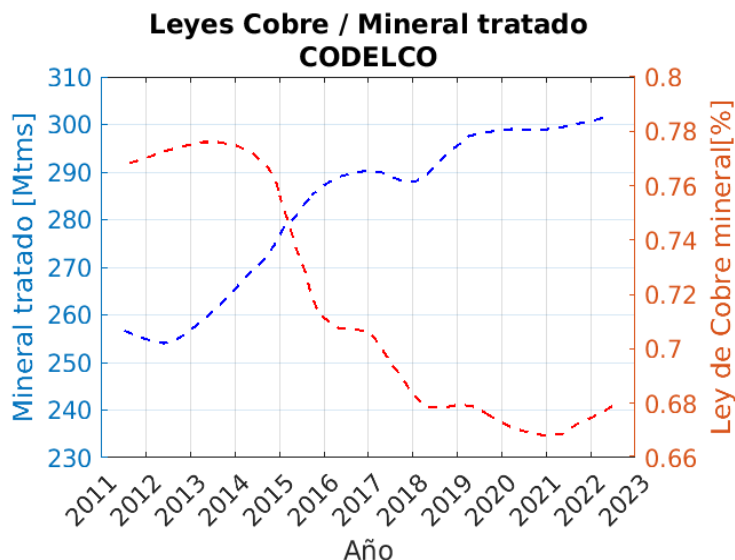


Figura 1.1. Evolución de la ley de cobre y tonelaje tratado en CODELCO Chile(Pizarro & (Codelco), 2019).

1.2 Codelco Andina

En CODELCO Andina actualmente para su proceso de producción, se consumen aproximadamente 0,8 [m³] de agua fresca (Make-Up), y 1,2 [m³] de agua recuperada por cada tonelada de mineral procesada. Debido a la sequía que atraviesa el país, según el pronóstico de la gerencia de recursos hídricos, concentrados y relaves, se estima una disminución para el año 2020, de un aproximadamente un 2% del agua fresca disponible (Gerencia de Recursos Hídricos, 2019). Es importante destacar que en el plan de negocios y desarrollo divisional año 2019, se identifica como un riesgo crítico, la falta de suministro de agua para procesos (CODELCO Andina, 2018b).

Andina no está exento a la situación actual mundial en la minería, sin embargo su ley de cabeza de cobre no se ha visto muy afectada, como se observa en la Figura 1.2 (CODELCO Andina, 2018b). específicamente según la planificación de producción se comenzará a explorar un sector de la mina rajo abierto sur-sur de mayor complejidad (Fase V). El sector fase V, se caracteriza por tener menores leyes de cobre, una disminución del contenido de calcopirita y un aumento en el contenido de pirita. La

disminución en la ley de cabeza de mineral se asocia a la necesidad de aumentar el tratamiento para mantener los indicadores de producción.

Lo expuesto anteriormente y en alineamiento con la mejora continua operacional, se presenta la alternativa de evaluar el proceso de espesamientos de relaves y concentrados en Andina. La propuesta de realizar este trabajo surge pues se detectó un aumento en la mantención de los filtros de agua recuperada, ya que se ensucian con mayor frecuencia al tratar un agua de menor calidad (mayor sólido en suspensión).

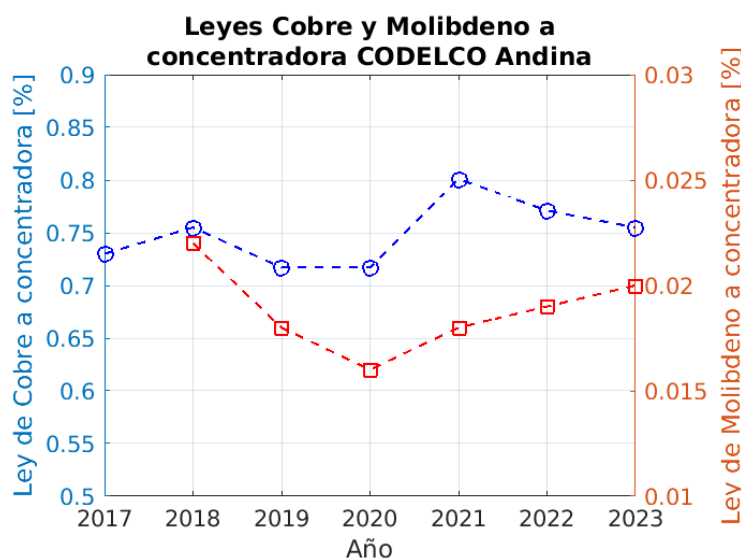


Figura 1.2. Evolución de ley de cobeza de cobre y molibdeno CODELCO Andina(CODELCO Andina, 2018b).

El desarrollo de este trabajo permitirá conocer las condiciones actuales de operación, y de esta forma poder optimizar el proceso mediante la manipulación de las variables porcentaje de sólido de alimentación a los espesadores y dosificación de floculante. El estudio de las variables mencionadas permitirá manejar las variables para optimizar la velocidad de sedimentación y la turbidez del agua recuperada. Adicionalmente mediante pruebas de laboratorio se probarán nuevos productos floculantes para el proceso, intentando obtener una optimización respecto a las condiciones actuales de operación.

Con los resultados de este trabajo, se buscará aumentar la cantidad y calidad del agua recuperada y de un punto de vista económico, se espera - sin sacrificar la cantidad y calidad de esta - una reducción de costos de operación.

1.3 Hipótesis

Se postula que, mediante la manipulación de la dilución de la pulpa, tipo y dosis de floculantes en trabajos a nivel de laboratorio, se puede obtener los datos necesarios para identificar oportunidades a nivel industrial de mejorar la cantidad y calidad del agua recuperada en el proceso de espesamiento de relaves y concentrados.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

El objetivo de la tesis es cuantificar a nivel laboratorio el impacto de las variables más relevantes en el espesamiento de relaves y concentrados en cuanto a la velocidad de sedimentación y la calidad del agua recuperada, para asegurar la disponibilidad de agua de proceso a futuro y así contribuir a la continuidad operacional.

1.4.2 Objetivos específicos

A continuación, se enumeran los objetivos específicos que permiten cumplir el objetivo general a conseguir con el desarrollo de este trabajo.

1. Identificar las variables más relevantes en el proceso de espesamiento y su factibilidad de estudio.
2. Analizar de forma crítica las variables seleccionadas y definir línea base usando información del PI-System.
3. Evaluar un cambio de tipo y dosis de floculante, con énfasis en determinar la relación entre las variables manipulables y las variables medidas.
4. Analizar las mejores alternativas identificadas en cuanto a costo/beneficio.

CAPITULO 2 REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA.

2.1 El proceso mismo: Espesamiento

El proceso de espesamiento se basa en el fenómeno de sedimentación y corresponde a una operación unitaria que se pueden dividir en 2 subgrupos según su funcionalidad (espesamiento y clarificación). El espesamiento tiene como objetivo el incremento de la concentración de sólidos con respecto a la corriente de entrada, mientras que la clarificación busca eliminar las partículas en suspensión y obtener un líquido claro (Minera Escondida, 2015).

En esta operación se separa el contenido sólido en una suspensión, de la fase líquida por decantación. Debido a la mayor densidad del sólido, la caída del sedimento ocurre debido a la fuerza gravitatoria. En asistencia a la fuerza gravitatoria, se emplea apoyo mecánico (parte del equipo de espesamiento) y con reactivos, con el fin de acelerar el proceso (Concha, 2001).

En la industria minera, el espesamiento es la operación más utilizada para la recuperación de agua desde los relaves y en menor cantidad, de los concentrados, para ser recirculada a la operación. Generalmente tanto al proceso de relaves y concentrados, se le denomina espesamiento, aunque técnicamente en el caso del concentrado se tiene un espesamiento y en para el relave una clarificación (Minera Escondida, 2015).

Los equipos más utilizados para la recuperación de aguas en la industria corresponden a los espesadores, pudiendo recuperar un alto porcentaje de ella a relativamente bajos costos y se describen en la siguiente sección.

2.2 El equipamiento: Espesadores

Los espesadores desde que fueron creados en el 1905 no han variado mucho en su apariencia, es decir un estanque cilíndrico con base cónica, una alimentación o feedwell, una canaleta que rodea el cuerpo del espesador en la parte superior, llamada rebalse u

overflow launder, un sistema de rastras y una apertura en la parte inferior central donde se produce la descarga o underflow. Todos los elementos nombrados, son comunes en todos los espesadores y estos han variado en el tiempo en su diseño (configuración de alimentación, tipo de rastras, entre otros) y material de construcción (Concha, 2001).

Operacionalmente los espesadores se pueden clasificar en tres tipos, espesadores convencional, espesadores de alta capacidad y espesadores de alta densidad, como se grafica en la Figura 2.1 (Concha, 2001).

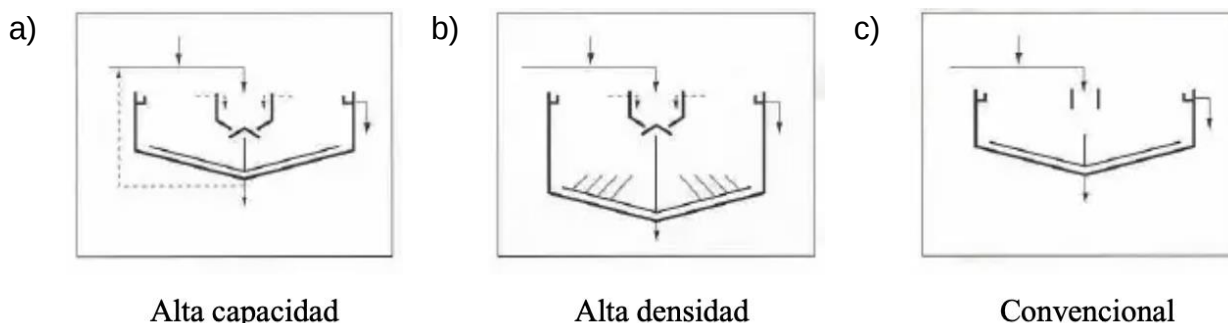


Figura 2.1. Clasificación operacional de los espesadores (Concha, 2001).

Los espesadores convencionales tienen su alimentación en la parte superior del espesador y la pulpa se diluye al mezclarse con parte del agua recuperada. La suspensión diluida sedimenta a velocidad constante generándose una interfase clara de agua clara (parte superior) y un sedimento en la parte inferior. Se estima que el tiempo de residencia en estos espesadores es del orden de horas(Concha, 2001).

Los espesadores de alta capacidad tienen la alimentación más profunda que los convencionales, de esta forma se busca que la pulpa alimentada se mezcle con parte del sedimento, alcanzando la concentración crítica. Estos espesadores tienen una mayor capacidad que los convencionales, tienen un tiempo de residencia del orden de minutos, pero se considera que su operación es más compleja e inestable (Concha, 2001). En cuanto a dimensiones, estos espesadores son de grandes diámetros, siendo este mucho

mayor que su profundidad y la descarga del espesador puede variar entre 45% y 65% aproximadamente, en la minería del cobre (David, 2016).

Los espesadores de alta densidad son espesadores convencionales, pero con menor diámetro y una mayor profundidad. La gran profundidad permite que, a través de la presión generada por el sedimento, este sea descargado con un porcentaje de sólidos sobre el 65%, pudiendo llegar a ser pastas. Estos espesadores surgen ante la necesidad de aumentar la recuperación de agua en grandes faenas que comenzaron a disminuir su ley (Wills, 2006).

2.3 Fisicoquímica de superficies

2.3.1 Teoría DLVO

La teoría DLVO, explica el comportamiento y agregación de suspensiones coloidales y a demás describela fuerzas de atracción entre las partículas cargadas eléctricamente en un medio acuoso. Esta teoría fue propuesta en base a estudios realizados en la década de los 40`s, por B. Derjaguin, L. Landau, E. Verwey y T. Overbeek, he ahí el origen del nombre.

Esta teoría resulta ser la base para explicar el fenómeno de coagulación y floculación, se plantea que existe una barrera energética, que resulta en fuerzas repulsivas que no permiten que las partículas se acerquen. El movimiento del sistema produce colisiones entre las partículas y si predomina la fuerza de atracción entre las partículas (fuerzas de Van der Waals), luego de la colisión, las partículas se aglomerarán, mientras que si predominan las fuerzas repulsivas (doble capa eléctrica), las partículas permanecen separadas (Ghosh, 2012).

2.3.2 Fuerzas de Van der Waals

Las fuerzas de Van der Waals, son fuerzas intermoleculares distintas a los enlaces atómicos, este tipo de fuerzas se compone por 3 casos (Ghosh, 2012):

- Fuerza de atracción de Keesom: atracción de dos moléculas permanentemente polarizadas (dipolo-dipolo).
- Fuerza de atracción de Debye: Molécula polar con una molécula con polaridad inducida (dipolo-dipolo inducido).
- Fuerza de dispersión de London: dos dipolos moleculares inducidos (dipolo transitorio).

Producto de la cercanía de dos moléculas, se distorsiona la nube de moléculas, que la rodean, como se muestra en la Figura 2.2, generando cargas locales provocan la atracción. Este tipo de fuerzas predomina cuando se tiene distancias reducidas entre las superficies (Ghosh, 2012).

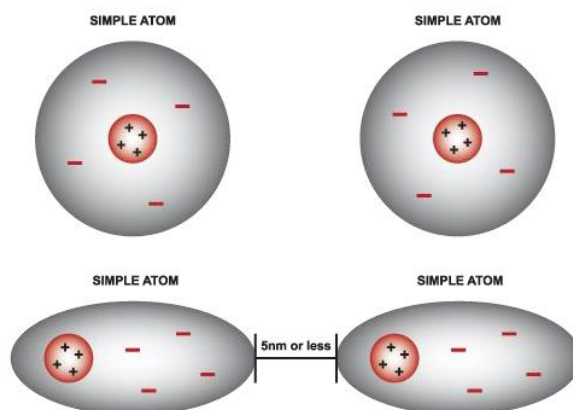


Figura 2.2. Representación de las interacciones de Van der Waals (Puiu, 2013).

2.3.3 Doble capa eléctrica

Las partículas que se encuentran dentro de un medio acuoso presentan una carga eléctrica superficial, por lo tanto, en una suspensión de partículas del mismo tipo, todas presentarán la misma carga y se provocará una repulsión entre las partículas. Comúnmente en el procesamiento de minerales, los sistemas acuosos son alcalinos y la mayoría de las partículas tienen carga superficial negativa (Concha, 2001). Al tener una superficie de carga negativa, los iones positivos en la solución son atraídos y adsorbidos

en la superficie. La capa que es adsorbida permanentemente, forma la denominada capa de Stern, como se observa en la Figura 2.3. Luego de la capa de Stern, en dirección al seno de la solución, se forma una capa difusa de iones positivos, los cuales serán en mayor proporción negativos, equilibrando el exceso de iones positivos en la capa de Stern, estas dos capas o zonas, se conocen como doble capa y son muy importantes para determinar las fuerzas superficiales que actúan entre las partículas. Luego de la capa difusa, la distancia límite donde se produce un arrastre de agua por la partícula en la solución, se denomina plano de corte y la diferencia entre el potencial en el plano de corte y el resto de la solución se denomina potencial zeta (ζ) (Concha, 2013).

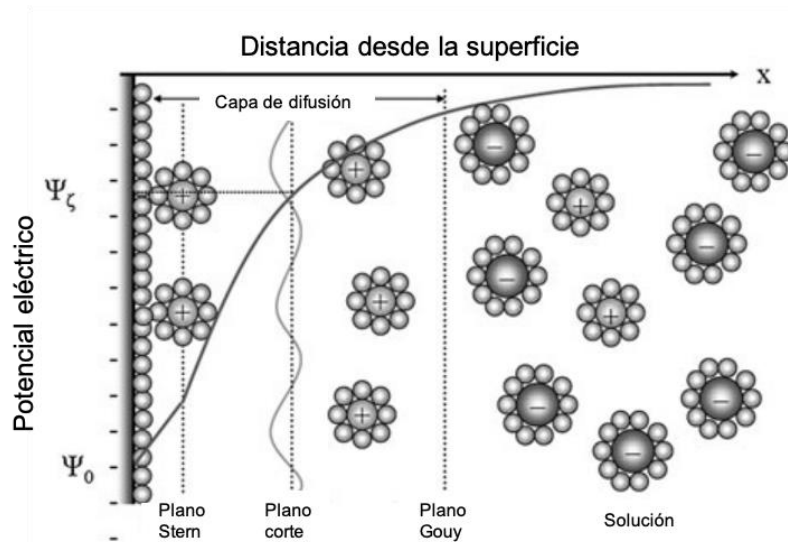


Figura 2.3. Potencial eléctrico distribuido en un sistema de una partícula sumergida en un electrolito (Concha, 2013).

2.4 Efecto de las características de la pulpa en el espesamiento

2.4.1 Composición mineralógica

La composición mineralógica de las pulpas puede tener un gran impacto sobre los procesos metalúrgicos. Según estudios realizados, el contenido y tipo de arcillas son de los componentes que generan un impacto negativo en varios procesos, debido a su morfología y granulometría. En la flotación las arcillas se mantienen en suspensión y afecta la espuma adquiriendo una textura fina incapaz de transportar partículas gruesas,

requieren una mayor cantidad de etapas de limpieza y aumenta el consumo de reactivos. Las arcillas se mantienen en suspensión en medios acuosos, por lo que en el espesamiento no sedimentan, siendo arrastradas en el agua que rebosa del espesador. En un estudio realizado en CODELCO división Radomiro Tomic (Briceño & Rubio, 2012), donde se tomaron muestras de diferentes unidades geológicas, cada una con distintas proporciones de arcillas, a las que se le realizaron pruebas de sedimentación batch a escala de laboratorio, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 2.4. Para las condiciones estudiadas, se concluye que a medida que aumenta el contenido de arcillas en la muestra, la velocidad de sedimentación disminuye, llegando a un punto donde la velocidad se mantiene relativamente estable mientras sigue aumentando el contenido de arcillas.

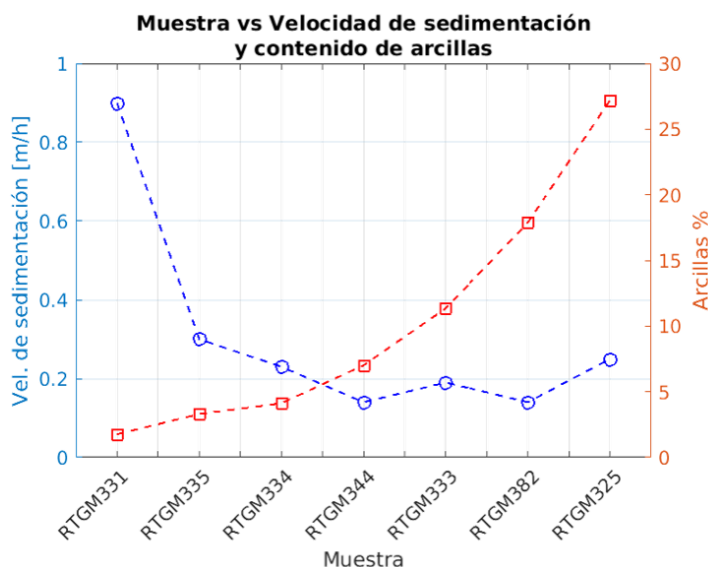


Figura 2.4 Velocidad de sedimentación de muestras con contenido de arcillas (Briceño & Rubio, 2012).

2.4.2 Distribución de tamaño y forma de las partículas

El tamaño de las partículas tiene directa relación con la velocidad de sedimentación, puesto que partículas pequeñas sedimentan más lento que las de mayor tamaño. La diferencia de velocidades se debe a que las partículas grandes, tienen una mayor masa, lo que hace que naturalmente sedimenten más rápido. Las partículas de menor tamaño

quedan suspendidas mayor tiempo en el líquido, aumentando la probabilidad de ser arrastradas en el agua recuperada del espesador, aumentando el sólido en suspensión.

Como resultado de algunos estudios se ha comprobado que no sólo es relevante el tamaño de las partículas, sino que también la forma de ellas. La forma ideal de las partículas es la esférica, disminuyendo la velocidad al alejarnos de la esfericidad. En el caso de algunas arcillas de forma laminar como la bentonita, se disponen como infinitas laminas una tras otra dificultando el paso del agua, lo que genera una disminución de la velocidad de sedimentación (Ros, 2014).

2.4.3 Concentración de sólidos en la pulpa

La concentración o porcentaje de sólidos en la pulpa, modifica la forma de sedimentar de las partículas. Con una pulpa diluida, la sedimentación de las partículas se asemeja a la caída libre de las partículas, mientras que, en una pulpa concentrada, se asemeja a una caída interferida.

El fenómeno de sedimentación de partículas discretas por caída libre es sólo función de las propiedades del fluido y las características de la partícula. En este caso las partículas sedimentan desplazando el líquido hacia arriba a través de área suficientemente grande, por lo tanto, no se interfiere en la caída de las demás partículas (Ros, 2014).

En la sedimentación interferida, al tener una gran cantidad de partículas, con un espacio reducido entre ellas, se genera una especie de atrapamiento del líquido, dificultando su desplazamiento. Las partículas generan interferencia entre ellas, haciendo que su sedimentación sea más lenta debido a que el flujo del líquido sea aleja de las trayectorias paralelas de la caída libre, transformándose en trayectorias irregulares (Ros, 2014).

Existen diversos estudios realizados a pulpas que corroboran lo planteado anteriormente (Fawell et al., 2009)

En la Figura 2.5 se muestran los resultados obtenidos de una serie de pruebas de sedimentación realizadas a lodos producidos en el proceso de lavado de una planta procesadora de áridos en Támano (Cruz & Martínez-rojas, 2016). De este trabajo se concluye que a medida que el porcentaje de sólidos de la pulpa aumenta, la velocidad de sedimentación disminuye, logrando incluso una menor compresión del sólido final de la prueba.

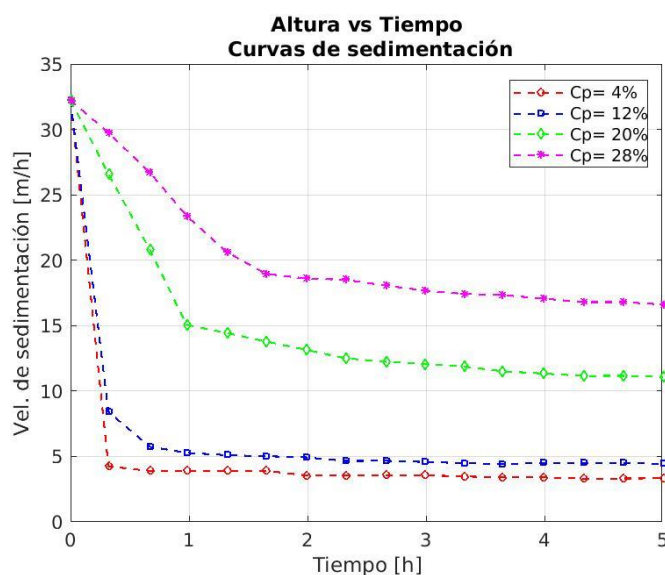


Figura 2.5. Curvas de sedimentación de lodos (Cruz & Martínez-rojas, 2016).

2.5 Agregación de partículas

Debido a que las partículas finas tienen bajas velocidades de sedimentación y afectan el rendimiento de los equipos de espesamiento, se utilizan algunos productos que pueden disminuir este efecto negativo, estos pueden ser coagulantes, floculantes o una mezcla de ellos. Los distintos tipos de productos se distinguen principalmente por el mecanismo de agregación, pero todos buscan aumentar el tamaño aparente de las partículas y que estas adquieran una mayor velocidad de sedimentación.

Los coagulantes reducen la repulsión entre las partículas mediante dos mecanismos, neutralización de carga superficial y compresión de la doble capa eléctrica que rodea a las partículas. Las partículas de bajo tamaño no sedimentan debido a una fuerza

electrostática repulsiva que impide su acercamiento, pero esto se puede modificar con la adición de coagulantes o contraiones. Los coagulantes o contraiones neutralizan las partículas, permitiendo la actuación de las fuerzas atractivas, se formen coágulos, aumentando el tamaño de las partículas en suspensión (flóculos de mayor tamaño) (Concha, 2001).

Los floculantes, son los más utilizados en la industria y permiten la agregación de las partículas mediante la adsorción de largas cadenas de polímeros en la superficie de las partículas, como se muestra en la Figura 2.6. Los floculantes se pueden distinguir por la forma en que el polímero actúa sobre las partículas, descritas a continuación. Es importante mencionar que todos estos tipos de floculación se deben generar con todos los tipos de floculantes, excepto los neutros que sólo generan floculación en pellets (Concha, 2001).

- Floculación por puente: se adsorbe una cantidad pequeña de polímero de largas cadenas, los cuales actúan sobre varias partículas de forma simultánea, generando puentes de hidrógeno entre el polímero y los iones de oxígeno presentes en el agua. Los flóculos formados son muy fuertes, en comparación con los flóculos formados por otros mecanismos de desestabilización.
- Floculación por red: se produce cuando dos o más polímeros se adsorben en la partícula, las que forman una red tridimensional entre las partículas.
- Floculación en pellets: este tipo de floculación se genera cuando se tiene un buen control de la adición de floculantes y se generan flóculos muy compactos llamados pellets.

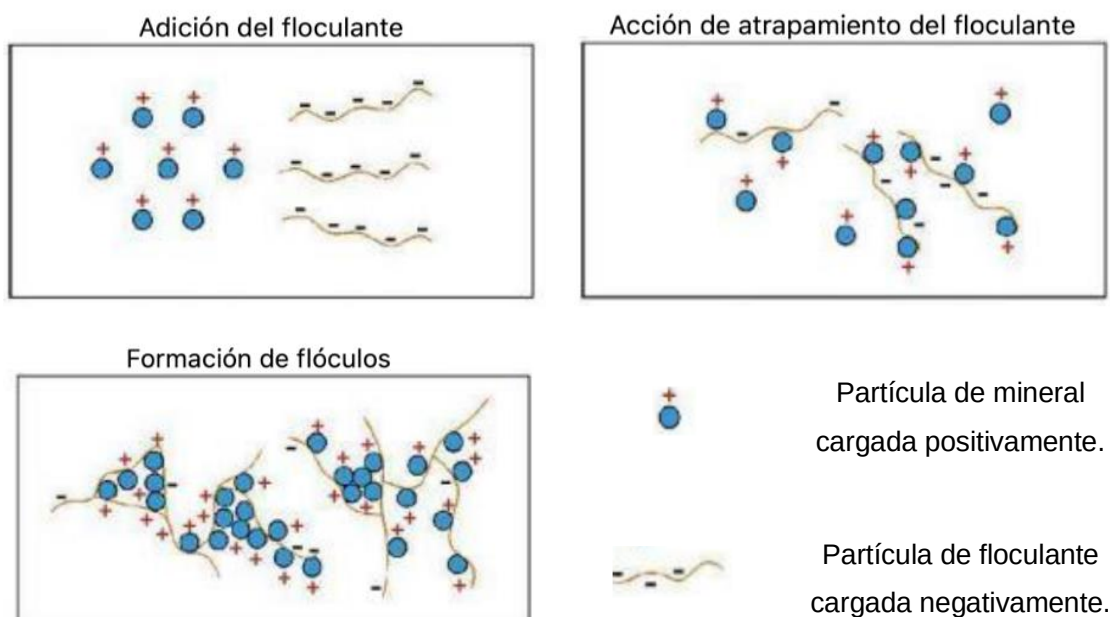


Figura 2.6 Interacción entre las partículas y el polímero (Ortiz, 2012).

La floculación por puente, en algunas ocasiones ocurre a pesar de la repulsión eléctrica, sin embargo, esto dependerá de la extensión de la doble capa eléctrica. Una vez adsorbidas las cadenas Una vez que son adsorbidos, las cadenas poliméricas pueden extender parte de su estructura (llamados “loops” o colas) desde la superficie de la partícula hacia la solución con lo cual es posible que estos segmentos puedan ser adsorbidos de la misma forma en la superficie de otras partículas formando puentes entre ellas.

Para lograr abarcar la distancia por sobre la cual opera la repulsión eléctrica es necesario que las cadenas de polímeros se extiendan “lo suficiente” desde la superficie de la partícula (De Witt & Van De Ven, 1992). Esta distancia depende de la extensión de la doble capa eléctrica y, por lo tanto, depende de la fuerza iónica. Abarcar esta distancia depende de la densidad de carga de los polielectrolitos. La razón de esto es que las cadenas poliméricas con alta carga aniónica son fuertemente repelidas por las superficies negativas lo cual, una vez adsorbidas a la superficie por puentes de hidrógeno, se genera una conformación de cadena más expandida debido a la repulsión de los segmentos iónicos.

2.5.1 Tipos de floculantes

Como se menciona en el apartado anterior, los floculantes son los más utilizados en la industria, por lo tanto, en la Figura 2.7 se muestra la clasificación general de los distintos tipos de floculantes en el mercado y se describen a continuación.

Los floculantes de origen inorgánico corresponden principalmente a sales metálicas, como sulfato de aluminio, sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico y aluminio de sodio, los cuales, al ser disueltos, forman complejos hidratados. Estas sales poseen una gran capacidad de floculación y se utilizaban ampliamente en el tratamiento de aguas, sin embargo, se detectó que podrían tener efectos nocivos en la salud humana y el medio ambiente (Hitner, 2004).

Los floculantes orgánicos son polímeros solubles en agua de gran peso molecular, formados por unidades repetidas de monómeros. Dentro de los floculantes orgánicos, se encuentran aquellos denominados naturales, ya que provienen de polímeros naturales que se extraen de sustancias animales o vegetales. Los floculantes naturales han sido desplazados a lo largo del tiempo, sin embargo, hoy en día los más utilizados son el almidón, en la industria del papel, y la goma guar utilizada en la separación del proceso de hidrometalurgia (Hitner, 2004).

Dentro de los floculantes orgánicos, se encuentran los polímeros sintéticos o de síntesis, los cuales son macromoléculas de una gran cadena, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos de peso molecular elevado. Los floculantes orgánicos han desplazado al resto, ya que pueden ser producidos con las especificaciones requeridas por el consumidor, lo que otorga una ventaja técnica y económica (Hitner, 2004).

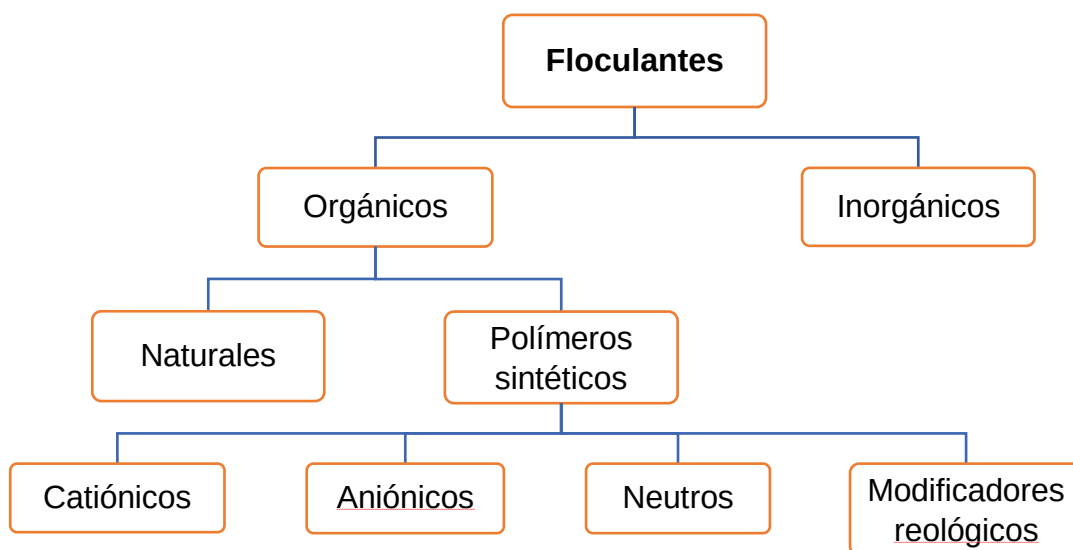


Figura 2.7. Clasificación tipos de floculantes (E.P).

Dentro de los polímeros sintéticos, encontramos los modificadores reológicos, los que también pueden tener carga iónica, como los catiónicos aniónicos o ser neutros, sin embargo, presentan algunas diferencias técnicas. Los modificadores reológicos se destacan por un bajo peso molecular, baja viscosidad y su eficiencia atrapando sólidos de diversos tamaños, mientras que los otros son eficientes atrapando ultrafinos y coloides. El uso de ellos produce una pulpa más compacta sin modificar las propiedades reológicas y un agua recuperada más clara.

2.5.2 Dosis de floculante

Es fundamental determinar la dosificación óptima del floculante o coagulante a utilizar, debido que un exceso o déficit de este podría tener consecuencias negativas en el rendimiento del proceso. Por lo general la dosificación óptima se determina mediante pruebas de laboratorio.

Un exceso de floculante podría generar el efecto contrario al deseado, es decir, las partículas no formarán los flóculos y la velocidad de sedimentación no aumentará. De a

cuerto a estudios realizados (Gregory, 1988), el floculante se podría absorber completamente en la superficie de la partícula, disminuyendo la probabilidad de formar enlaces con otra, lo que generaría una re-estabilización de la suspensión. Fuera de lo técnico, el dosificar en exceso el floculante implica un aumento de los costos operacionales.

Una dosificación deficiente, implica la no formación de los flóculos, o la formación de flóculos débiles, los cuales pueden volver a su tamaño original en cualquier momento, o pueden ser deshechos con la mínima perturbación mecánica, lo que implica no aumentar la velocidad de sedimentación y aumentar los sólidos suspendidos en el agua recuperada (Gregory, 1988).

2.5.3 pH del sistema

El pH corresponde la medida de la actividad del ion hidrógeno en una solución y es una de las variables químicas más relevantes del proceso, ya que cada floculante tiene un pH óptimo de trabajo, en el cual la floculación ocurrirá de forma rápida y efectiva. Según lo planteado, es relevante conocer el pH óptimo de trabajo del floculante que se está utilizando y mantener una medición constante del pH en la operación (Andía, 2000).

2.6 Calidad del agua recuperada

La calidad del agua se define mediante las característica físicas, químicas y biológicas, los cuales tiene sub-parámetros detallados a continuación. La calidad deseada del agua se define dependiendo del uso de ellas, es decir un agua de consumo humano requiere especificaciones distintas a un agua de uso para procesos industriales y por ende se rigen por diferentes normativas (Sánchez Ramos, 2013).

Es relevante controlar la calidad del agua dependiendo de su uso, por ejemplo, la calidad del agua potable tiene incidencias directas en la salud del ser humano, o un agua de uso agrícola o como medio acuático, incide en el ecosistema presente.

Los parámetros físicos son índices relativos de contaminación y este parámetro se caracteriza principalmente con la medición de turbidez, conductividad, temperatura y sólidos en suspensión (Sánchez Ramos, 2013).

Los parámetros químicos permiten identificar y cuantificar agentes causales de contaminación. Se mide el pH, demanda química de oxígeno, oxígeno disuelto, carbono orgánico disuelto y total, dureza, salinidad e iones presentes (bicarbonatos, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio y sodio) (Sánchez Ramos, 2013).

En cuanto a los parámetros biológicos, representan la actividad biológica en el agua, mediante el control de la presencia y abundancia de algunos microorganismos (patógenos, fitoplancton, zoobentos e ictiofauna) (Sánchez Ramos, 2013).

Para el agua potable existen normativas que definen los límites de los componentes del agua, sin embargo, en el ámbito industrial, dependerá del proceso las características requeridas. Para el agua recuperada mediante el espesamiento en la minería del cobre, para ser recirculada al proceso, se busca lo siguiente.

- pH básico, ya que en el proceso de flotación colectiva cobre molibdeno (donde se recircula el agua), tiene un pH óptimo de operación sobre pH 10 (Yianatos & Vinett, s. f.).
- Bajo contenido de iones de cobre, metálicos y de fierro, pues generan la activación de la pirita en la flotación favoreciendo su flotabilidad, lo que no es deseable en el proceso, ya que aumenta el contenido de Fe en el concentrado final, reduciendo su calidad. En la Figura 2.8 se muestran los resultados de un estudio de la activación de la pirita mediante la adición de iones de Cobre, donde se concluye que la presencia de iones cobre aumentan la recuperación de pirita en la flotación a un mismo potencial electroquímico (Peng & Lu, 1998).
- Bajo contenido de sólidos en suspensión debido a que estos que principalmente son finos y ultrafinos. El material fino en la flotación al ser de tan bajo tamaño sigue las líneas de flujo, disminuyendo la probabilidad de chocar con las burbujas

y flotar, por lo tanto, se van a la cola básicamente por arrastre (Yianatos & Vinett, s. f.). Debido al arrastre del fino se genera una carga circulante que a través del tiempo reducirá la capacidad del sistema de procesamiento de minerales.

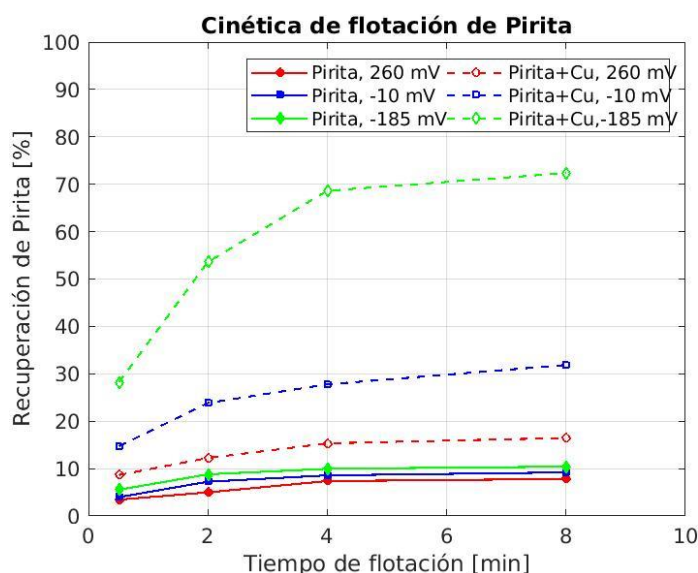


Figura 2.8. Flotación de Pirita en la ausencia y presencia de $1,5 \times 10^{-3}$ [mol/dm³] de iones de cobre (Peng & Lu, 1998).

2.6.1 Parámetros que influyen en la calidad del agua.

Las variables descritas anteriormente con influencia sobre el proceso de espesamiento están estrictamente relacionadas con la calidad y cantidad del agua recuperada de la siguiente manera:

- **Distribución de tamaño:** partículas muy pequeñas (finos y ultrafinos) no sedimentan con facilidad, manteniéndose en suspensión en el agua, siendo arrastrada en el agua recuperada por el overflow del espesador, aumentando la cantidad de sólidos en suspensión y la turbidez del agua.
 - **Dilución de la pulpa:** debido a que la menor dilución retarda la sedimentación, aumenta la probabilidad de que sólidos sean arrastrados con el agua recuperada.
- en la Figura 2.9, se muestran los resultados de turbidez de agua recuperada de

sedimentaciones de pulpas de cuarzo a escala de laboratorio, donde se observa la tendencia al aumento de la turbidez del agua recuperada con el aumento del porcentaje de sólidos de la pulpa (Ravanal, 2017).

- **Dosificación de floculante:** el aumento de la dosis de floculante favorece la formación de flóculos, logran la sedimentación de una mayor cantidad de partículas, disminuyen los sólidos en suspensión del agua recuperada. En la Figura 2.10, se muestran los resultados de un estudio realizado a relave de minera los pelambres, donde se observa la disminución de la turbidez del agua recuperada con el aumento de la dosis de floculante (Vera, 2019), sin olvidar la importancia de determinar la dosis óptima.
- **pH de la pulpa:** como se observa en los resultados de las pruebas de sedimentación a pulpas de cuarzos mostrado en la Figura 2.9 (Ravanal, 2017), el pH tiene un claro efecto en la turbidez del agua recuperada, teniendo una mayor turbidez a un mayor pH. Esto no siempre ocurre estrictamente con la misma relación, ya que dependerá del tipo de floculante utilizado y su pH óptimo de uso.

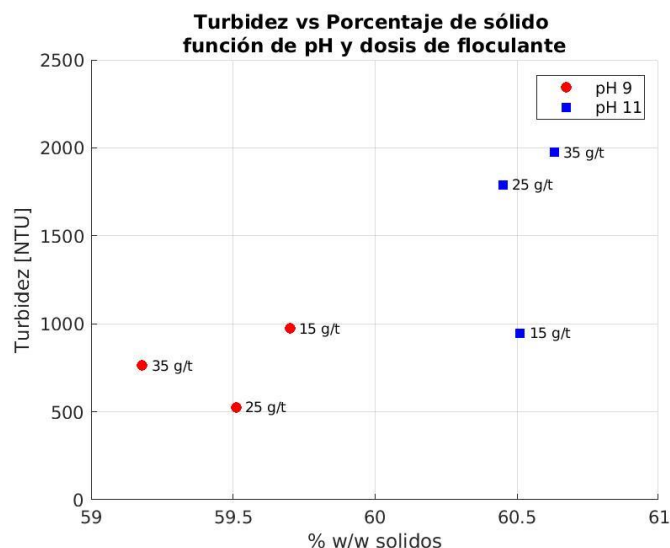


Figura 2.9. Turbidez del agua recuperada de pruebas de sedimentación batch a pulpas de cuarzo (Ravanal, 2017).

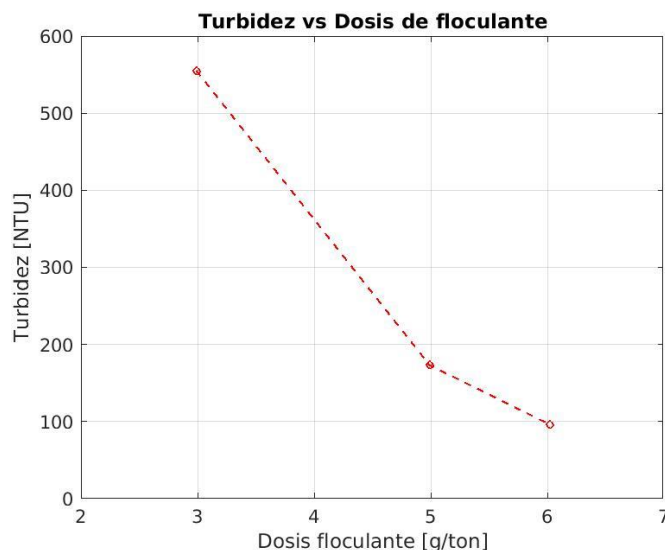


Figura 2.10. Turbidez del agua recuperada de sedimentaciones batch en función de la dosis de floculante (Vera, 2019).

2.6.2 Métodos de medición de calidad de agua

Para determinar la calidad del agua, se debe hacer con la medición de los parámetros físicos, químicos y biológicos (Sánchez Ramos, 2013).

2.6.2.1 MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL AGUA

Existen varios instrumentos o métodos que nos permiten medir los parámetros que definen la calidad del agua. En la Tabla 2.1, se indica algunos de ellos, para los parámetros relevantes en el proceso de espesamiento y calidad del agua recuperada, de acuerdo con la revisión de literatura y trabajos anteriores.

Es importante especificar que la medición de la turbidez del agua en NTU corresponde a una **aproximación** del contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, por lo que puede ser indicio de contaminación (Espigares & Fernandez-Crehuet, 1999), sin embargo sólo puede ser utilizado para comparar muestras de un mismo origen. Se emplea con mayor frecuencia la medición de turbidez, puesto a la facilidad y rapidez con que se pueden analizar las muestras y obtener resultados.

Tabla 2.1. Medición de parámetros del agua (E.P).

	Parámetro.	Método o instrumentos de medición.
Físicos	Temperatura	-Termómetros o sensores de temperatura.
	Conductividad	-Conductímetro.
	Turbidez	-Turbidímetro.
	Sólidos en suspensión	-Diferencia de masa, mediante secado de muestra o secado de filtro por el que se pasa la muestra.
Químicos	pH	-Medidor de pH portátil. -Sensores en línea de pH. -Papel indicador de pH.

2.7 Metodología para el diseño de espesadores mediante sedimentación batch

A lo largo de los años se han desarrollado diversos métodos para el diseño de espesadores, cada uno de ellos formulados con distintos fundamentos. Cada método presenta las limitaciones que le impone la base teórica de su desarrollo. A continuación, se presentan algunos de los métodos más utilizados.

2.7.1 Método de Mishler

El método de Mishler, considera un balance macroscópico, para un espesador en estado estacionario, con un flujo másico de alimentación F , una concentración de sólidos D_F y un flujo másico de descarga D con una concentración D_D y un flujo de rebalse (agua clara), de O , de esta forma, al realizar el balance para el sólido y agua se obtienen las ecuaciones (1) y (2), respectivamente (Concha, 2001).

$$\text{Sólido} \quad F = D \quad (1)$$

$$\text{Agua} \quad FD_F = DD_D + 0 \quad (2)$$

Despejando el flujo másico de agua al ser transformado en flujo volumétrico Q_o , se obtiene la expresión (3).

$$Q_o = \frac{F(D_F - D_D)}{\rho_f} \quad (3)$$

Mishler postula que el flujo de agua Q_o es igual al producto de la velocidad de agua formada en una columna de sedimentación por el área de la columna S para una concentración igual a la de la alimentación, obteniendo la expresión (4), donde R es la velocidad de descenso de la interfase agua-suspensión (Concha, 2001).

$$S = \frac{F(D_F - D_D)}{\rho_f R} \quad (4)$$

La expresión (4), se puede presentar como área unitaria (AU), como se muestra en la ecuación (5).

$$AU = \frac{D_F - D_D}{\rho_f R} \quad (5)$$

Para realizar el diseño utilizando el método de Mishler, se debe realizar una prueba a nivel de laboratorio para calcular la velocidad de sedimentación R a la concentración de alimentación (Concha, 2001).

La falla de este método radica en que supone que la concentración de sólidos dentro del espesador es igual a la de la alimentación, lo que no es cierto, por lo tanto, la velocidad R , no estaría bien calculada (Concha, 2001).

2.7.2 Método de Cloe & Clevenger

Cloe & Clevenger, parten realizando el mismo balance que Mishler, sin embargo, atienden la falla de Mishler y postulan que la concentración dentro del espesador no es igual a la de la alimentación y va variando (D_k) a medida que desciende en el espesador, por lo tanto, las ecuaciones de balance y diseño mostradas anteriormente, según Cloe & Clevenger, quedan de la siguiente manera (Concha, 2001).

$$\text{Sólido:} \quad F = D \quad (6)$$

$$\text{Agua:} \quad FD_k = DD_D + O \quad (7)$$

$$Q_o = \frac{F(D_k - D_D)}{\rho_f} \quad (8)$$

$$S = \frac{F(D_k - D_D)}{\rho_f R} \quad (9)$$

$$AU = \frac{D_k - D_D}{\rho_f R} \quad (10)$$

Como no se conoce de antemano la concentración de sólidos en las distintas zonas del espesador, se deben hacer sedimentaciones batch, con distintas concentraciones iniciales (entre la concentración de alimentación y la de descarga). Para cada ensayo realizado, se debe calcular el área unitaria y seleccionar el mayor valor obtenido para el diseño (Concha, 2001).

2.7.3 Método de Kynch

El método de Kynch es una herramienta que simplifica otras metodologías y postula que la velocidad de sedimentación es sólo función de la concentración de sólidos local de la pulpa. Este método permite dimensionar un espesador mediante la realización de sólo

una prueba, a diferencia del método de Coe & Clevenger que requería un número mayor (Concha, 2001).

De acuerdo a Kynch, teniendo la curva de sedimentación batch, se pueden trazar varias tangentes a la curva, determinando el par $(\phi_k, v_s(\phi_k))$ para $\phi_0 \leq \phi_k \leq \phi_c$, donde ϕ_k se define como la ecuación (11), ver Figura 2.11, donde se muestra el procedimiento. Una vez obtenidos los valores de la concentración y la velocidad de sedimentación, se puede aplicar la ecuación de Coe & Clevenger para obtener el área unitaria, expresada como se muestra en la ecuación (12) (Concha, 2001).

$$\phi_k = \phi_0 \frac{L}{Z} \quad (11)$$

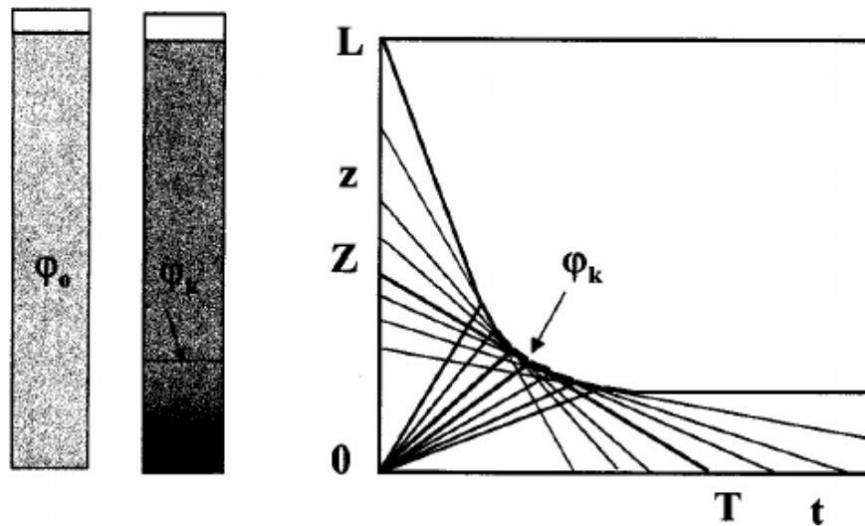


Figura 2.11. Método de Kynch para determinar concentración y velocidad de sedimentación de una suspensión mediante un sólo ensayo batch (Concha, 2001).

$$AU_0 = \max_z \left(\frac{t_u}{\rho_s \phi_0 L} \right) = \frac{t_U}{\rho_s \phi_0 L} \quad (12)$$

2.7.4 Método de Talmage & Fitch

Talmage & Fitch, utilizaron como base, la teoría propuesta por Kynch y a partir de lo presentado en la Figura 2.12, se plantea la ecuación (13).

$$\frac{Z}{T} = \frac{Z - Z_D}{t_u} \quad (13)$$

Donde Z_D es la tangente a la curva de sedimentación para la concentración de descarga, φ_D y t_u es la intersección de la tangente $Z-T$ con la horizontal trazada a partir de Z_D , la coordenada Z_D se obtiene a partir de la ecuación (14), donde φ_0 corresponde a la concentración de sólidos inicial. La intersección de la horizontal trazada desde Z_D hasta la curva de sedimentación, define la coordenada t_u (Concha, 2001).

$$Z_D = \frac{\varphi_0 L}{\varphi_D} \quad (14)$$

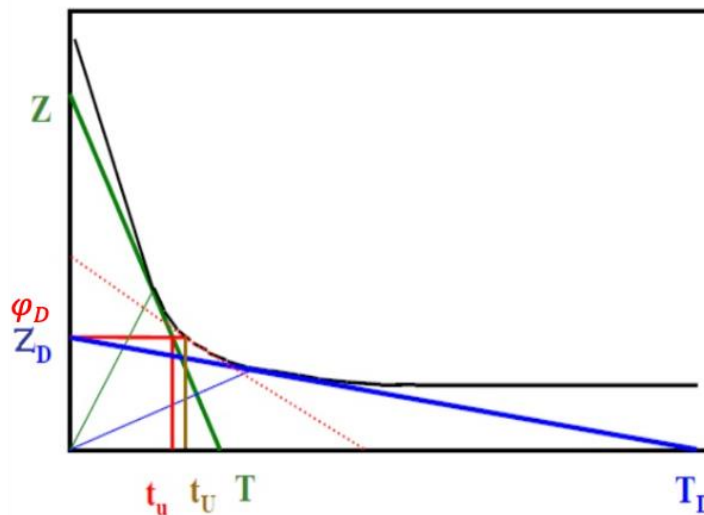


Figura 2.12. Construcción de Talmage & Fitch (Concha, 2001).

Según lo anteriormente planteado, se obtiene la expresión (21) para obtener el área unitaria.

$$AU = \frac{t_U}{\rho_S \phi_0 L} \quad (15)$$

Debido a que el método de Talmage & Fitch se puede usar tanto para pulpa compresibles como incompresibles, surgirán algunos casos donde la recta trazada desde Z_D , no cortarían la curva, para estos casos se recomienda trazar la tangente Z-T para concentración crítica, ϕ_c y obtener, t_u como la intersección de esta recta con la horizontal trazada desde Z_D (Concha, 2001)

2.8 Diseño de experimentos y análisis estadístico

2.8.1 Diseño de experimentos

En ocasiones para realizar estudios es necesario ejecutar experimentos, donde se evalúan dos o más factores. Los experimentos buscan recabar la mayor cantidad de información posible que nos permitan a través de métodos estadísticos llegar a obtener conclusiones validas y objetivas de un proceso.

Para diseñar un experimento se debe conocer el proceso que se busca evaluar e identificar los factores que influyen en el proceso y las variables de respuesta del proceso. Es fundamental tener ese conocimiento pues nos permitirá diseñar de forma correcta los experimentos a realizar (Gutierrez & De La Vara, 2008). En la Figura 2.13 se ejemplifica lo descrito anteriormente para un proceso de fabricación de envases plásticos, que es el mismo ejercicio que se debe hacer para cualquier proceso de interés de estudio.

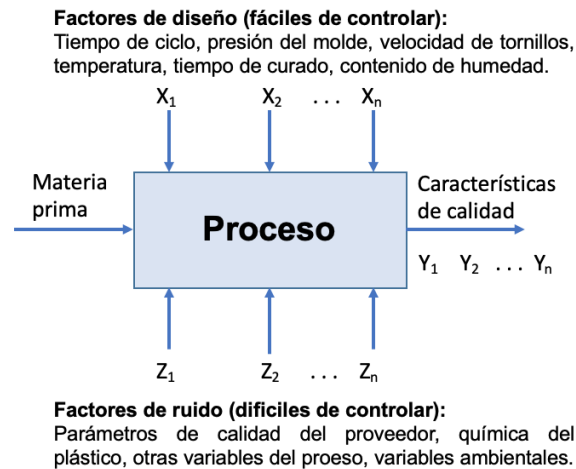


Figura 2.13. Ejemplo factores de proceso y variables de respuesta para un sistema (Gutierrez & De La Vara, 2008).

Existe un gran número de diseño de experimentos para estudiar problemas, por lo cual resulta relevante saber cómo seleccionar el más adecuado para una situación en particular. Los aspectos más relevantes para seleccionar un diseño de experimentos son (Gutierrez & De La Vara, 2008):

1. Objetivos del experimento.
2. Número de factores a estudiar.
3. Número de niveles que se prueban de cada factor.
4. Efectos de interés a investigar.
5. Costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

En la Figura 2.14, se muestra una clasificación de los diseños de experimento en función del objetivo y cada ramificación se clasifica dependiendo del número de factores, tipo de efectos, restricciones, entre otros. En la Figura 2.14, se observa que se repite el diseño factorial, ya sea completo o fraccionado, esto sucede ya que los diseños factoriales, son muy eficientes en distintas situaciones.

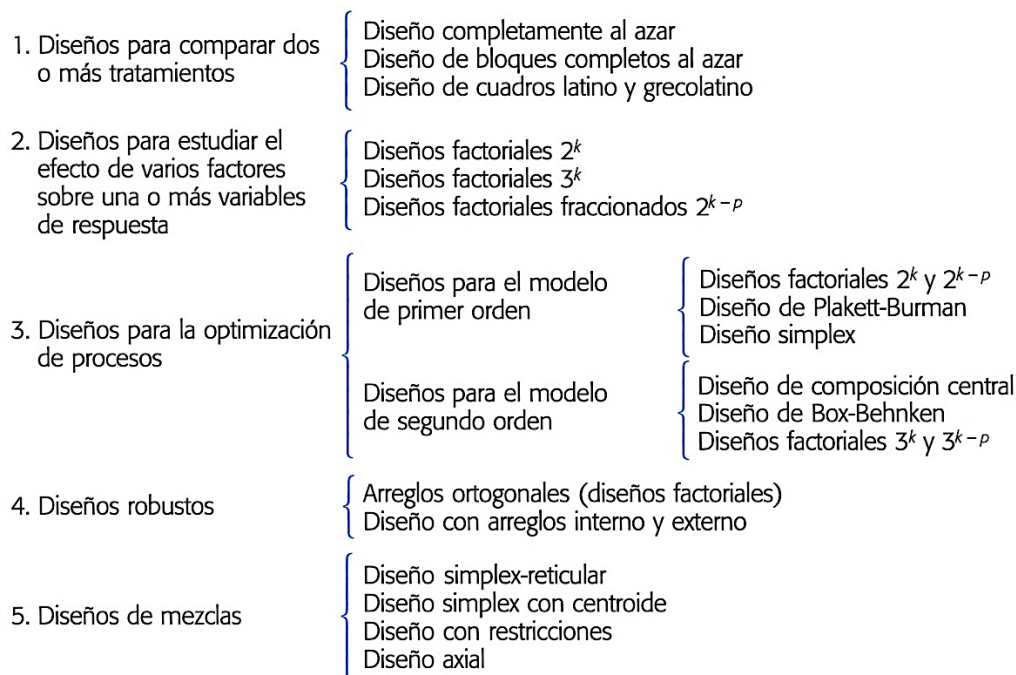


Figura 2.14. Clasificación general de diseños de experimentos (Gutierrez & De La Vara, 2008).

2.8.1.1 DISEÑO FACTORIAL

Un diseño factorial consiste en definir variables y los niveles a probar en cada uno de ellos, para así estudiar todas las combinaciones posibles. Con la realización de los experimentos se busca evaluar el efecto de cada factor y la interacción de ellos sobre una respuesta (Gutierrez & De La Vara, 2008). El conjunto de experimentos se denota como X^k , donde k corresponde al número de factores y X es el número de niveles estudiados por cada factor. Los diseños factoriales más comunes y sencillos son los 2^k , donde se estudian sólo 2 niveles por factor, denotados genéricamente como nivel bajo (- o -1) y nivel alto (+ o 1). En la Figura 2.15 a) y b), se representa geométricamente los diseños factoriales 2^2 y 2^3 , donde las variables o factores de estudio se denominan genéricamente con las letras A, B y C. En la representación, cada vértice indica las condiciones de un experimento, logrando estudiar todas las combinaciones posibles entre los niveles de cada factor. Comparando la Figura 2.15 a) y b), se puede observar que,

agregando un factor al estudio, el número de experimentos finales crece considerablemente.

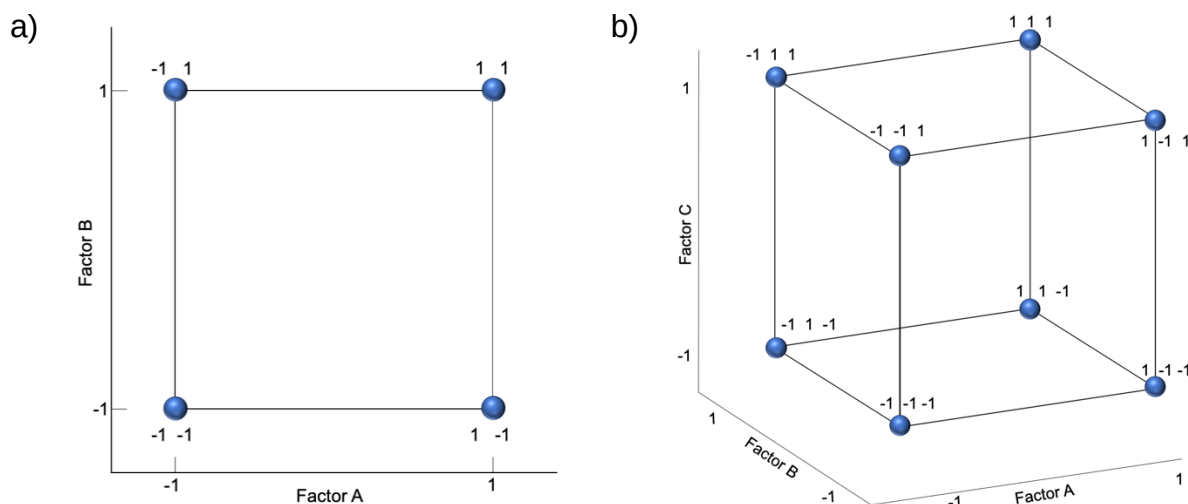


Figura 2.15. Representación geométrica diseño factorial 2^k . a) Diseño factorial 2^2 , b) Diseño factorial 2^3 (E.P).

En el diseño factorial 3^k , se estudian 3 niveles para cada factor de estudio, los cuales comúnmente son denotados como, nivel bajo (-1), nivel medio (0) y nivel alto (1). De forma análoga a la explicación del modelo factorial 2^k , en la Figura 2.16 a) y b), se muestra de forma geométrica un diseño factorial 3^2 y 3^3 respectivamente.

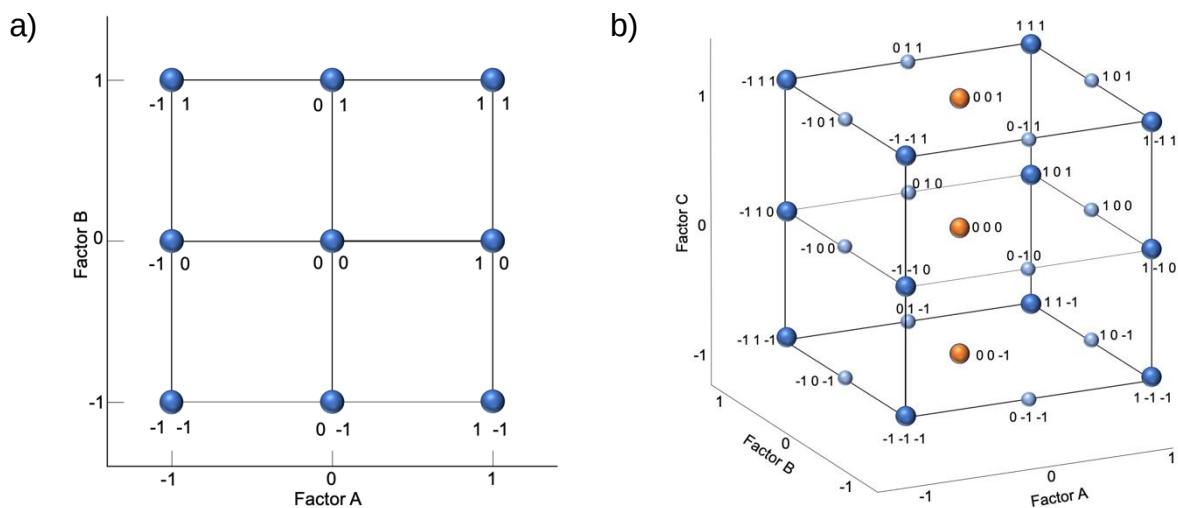


Figura 2.16. Representación geométrica diseño factorial 3^k . a) Diseño factorial 3^2 , b) Diseño factorial 3^3 (E.P).

En el diseño factorial se tienen 3 principios básicos, los cuales se nombran a continuación (Montgomery, 2004).

- Realización de réplicas: el realizar replicas, consiste en repetir todos los experimentos originales. Las réplicas permiten estimar el error experimental, convirtiéndose en una medición básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente diferentes. Es importantes destacar que no es lo mismo una réplica que una medición repetida. Por ejemplo, si tenemos una probeta fabricada de un material x y se mide la dureza de esta 3 veces, estamos en presencia de una medición repetida y no una réplica, la cual, siguiendo el ejemplo anterior, se deberían fabricar 2 probetas iguales y medir la dureza a cada una de ellas (Montgomery, 2004).
- Aleatorización: este punto es fundamental para el uso de métodos estadísticos. Por aleatorización se entiende que tanto el material experimental, como el orden en que se realizan los experimentos, debe ser definido al azar. Existen programas computacionales que nos entregan el diseño experimental de forma aleatoria. El aleatorizar los experimentos, nos permitirá equilibrar los efectos de condiciones externas o no controlables que puedan influir en los resultados obtenidos (Montgomery, 2004).
- Formación de bloques: esta técnica se utiliza para aumentar la precisión de las comparaciones entre los factores de interés. Busca reducir o eliminar la variabilidad transmitida por factores perturbadores, es decir aquellos efectos que no son de interés de estudio, pero que, si pueden tener una influencia sobre la respuesta del proceso y se clasifican en factores controlables, no controlables o de ruido (Montgomery, 2004).

2.8.2 Análisis de resultados

2.8.2.1 ANÁLISIS DE VARIANZA

El análisis de varianza o también conocido como test de ANOVA, es la prueba estadística mayormente utilizada cuando se requiere comparar las medias de dos o más grupos. Este análisis se puede generalizar para estudiar los efectos fijos de los factores y sus combinaciones, sobre la varianza de una variable (Montgomery, 2004), (Gutierrez & De La Vara, 2008).

El test de ANOVA, presenta una hipótesis nula que plantea que la media de las variables estudiadas es la misma para todos los grupos, mientras que se genera una hipótesis alternativa propone que al menos una de las medias es diferente en forma significativa. ANOVA permite comparar las medias, mediante el análisis de las varianzas (Gutierrez & De La Vara, 2008).

Para probar la hipótesis mediante ANOVA, se debe descomponer la variabilidad total de los datos en variabilidad debido al tratamiento y en la que corresponde al error aleatorio, como se muestra a continuación (Gutierrez & De La Vara, 2008).

Una medida de la variabilidad total presente en las observaciones es la suma total de cuadrados (SC_T), dada por:

$$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (16)$$

Donde $Y_{..}$ es la suma de los $N = \sum_{i=1}^k n_i$ datos en el experimento. Desarrollando la ecuación (16), se puede separar en dos componentes, donde el primer componente corresponde a la suma de cuadrados de tratamiento (SC_{TRAT}) y el segundo componente corresponde a la suma de cuadrados del error (SC_E), como se muestra en la ecuación

$$SC_T = \sum_{i=1}^k n(\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2 \quad (17)$$

Cuando se tiene $N = \sum_{i=1}^k n_i$ observaciones, los grados de libertad son N-1, para k tratamientos, se tiene k-1 grados de libertad, mientras que la suma de cuadrados del error tiene N-k grados de libertad.

La suma de cuadrados dividida por los grados de libertad respectivos, se denomina cuadrados medios, teniendo cuadrados medios tanto para el cuadrado medio del tratamiento, como el cuadrado medio del error.

Toda la información necesaria para el análisis de ANOVA, se recopila en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Tabla de ANOVA genérica (Gutierrez & De La Vara, 2008).

Fuente Variabilidad	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀	valor P
Tratamiento	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_{i.}^2}{n_i} - \frac{Y_{..}^2}{N}$	k-1	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k-1}$	$\frac{CM_{TRAT}}{CM_{error}}$	P(F>F₀)
Error	$SC_E = SC_T - SC_{TRAT}$	N-k	$CM_E = \frac{SC_E}{N-k}$		
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$	N-1			

2.8.3. Herramientas de Análisis estadístico

2.8.3.1 MINITAB Y STATGRAPHICS

Tanto Minitab como Statgraphics, son softwares de análisis estadístico que automatizan los cálculos y gráficos que permiten analizar un set de datos. El automatizar los cálculos estadísticos, permite que el usuario o investigador, se pueda centrar netamente en el análisis de los resultados entregados por el programa para dar sus conclusiones.



Los 2 Softwares, nos muestran análisis similares, variando la interfaz de cada uno de ellos, siendo ambos bastante amigables con el usuario.

Dentro de este trabajo se utilizan estas herramientas, tanto para la realización de los diseños de experimentos a realizar, como para el análisis de los resultados y la generación de un modelo que permita estimar una respuesta ante la manipulación de ciertas variables.

CAPITULO 3 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

3.1 Descripción proceso productivo CODELCO Andina

La División Andina se ubica en el sector Río Blanco de la ciudad de los Andes región de Valparaíso, aproximadamente a 80 Km al noroeste de Santiago. La faena se encuentra sobre los 3.500 m.s.n.m y su explotación es mixta, con minería subterránea (mina Río Blanco) y rajo abierto (mina Sur Sur).

Los recursos de Andina son principalmente minerales sulfurados y tienen una ley de corte de 0,5% Cobre y 0,022% molibdeno, lo que se traduce en 195.531 toneladas métricas de cobre fino al año aproximadamente. Debido a las características de sus recursos (minerales sulfurados), la división los valoriza mediante el proceso de concentración, mostrado en la Figura 3.1. Actualmente cuenta con una capacidad de tratamiento de 88.000 toneladas métricas de mineral, contando con etapas de reducción de tamaño, compuesta por Chancado, Molienda semi-autógena (SAG) y molienda convencional húmeda, para la que se ocupan molinos de barra y bolas. Posterior a la reducción de tamaño se tiene el proceso de flotación colectiva, compuesto por un circuito de flotación Rougher, Flotación de limpieza (Cleaner), mediante columnas, flotación de barrido (Scavenger) y un proceso de remolienda para el que se utilizan molinos verticales (Vertimill). El producto de la flotación colectiva (concentrado Cobre-Molibdeno), es enviado al espesador de concentrado, para posteriormente ser transportado mediante un concentraducto hasta la planta de filtros (SPMFC), en donde se separa el cobre del molibdeno mediante flotación selectiva (flotación inversa), posteriormente por separado pasan a procesos de filtración, secado, almacenamiento y despacho de concentrado de cobre y concentrado de molibdeno, vía terrestre (tren) hacia CODELCO división Ventanas.

Como residuos de la operación principal de concentración, se obtiene relave que corresponde a una suspensión fina de sólidos en líquido, constituida fundamentalmente por el mismo material presente in-situ en el yacimiento al cual se ha extraído la fracción con mineral valioso, es decir, presenta especies minerales y estériles que ya han pasado una o más veces por el proceso (Ramírez, 2007).

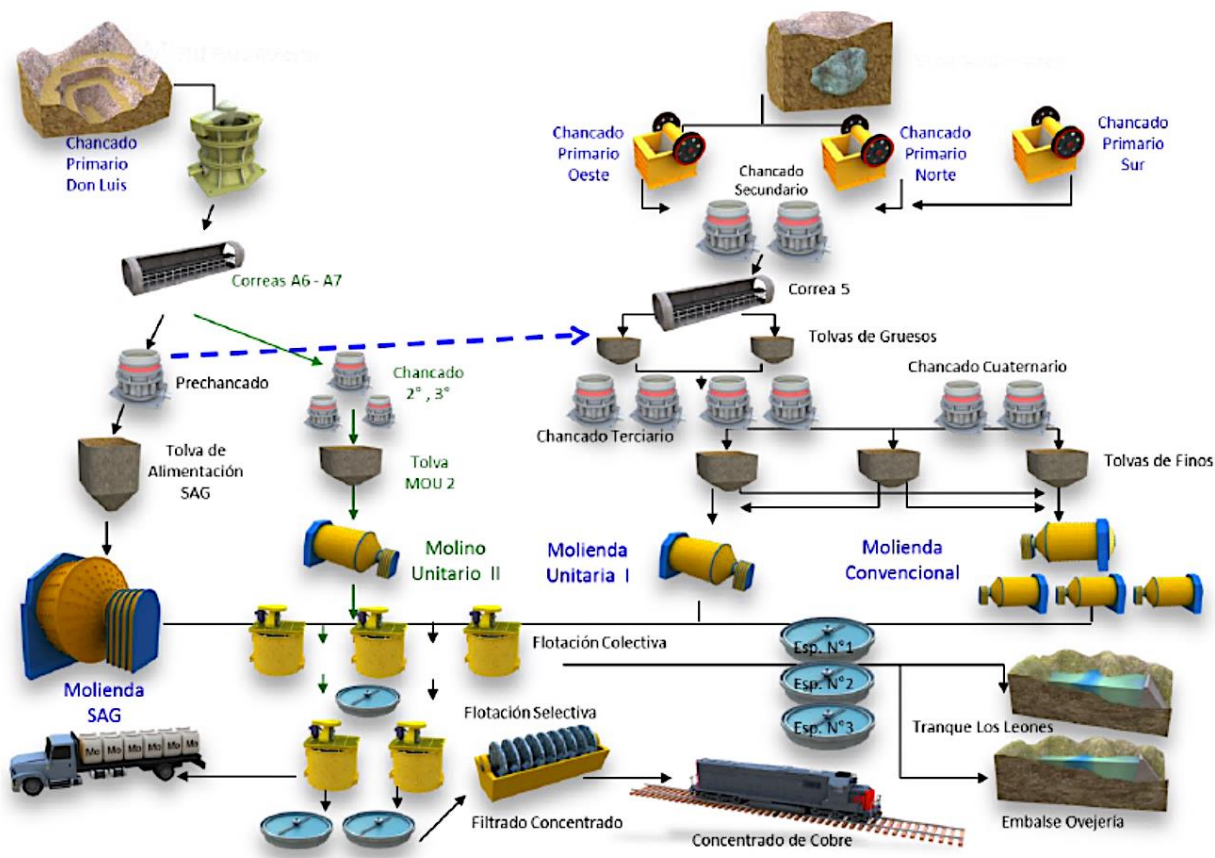


Figura 3.1. Flowshett general CODELCO división Andina (CODELCO Andina, 2018a).

En CODELCO Andina, el encargado del tratamiento de relaves, desde que sale del proceso de flotación, es la Superintendencias de Recursos Hídricos, la cuál en conjunto con lo mencionado anteriormente, se encarga del tratamiento y suministro de aguas a la operación. Estos procesos tienen una gran relevancia, debido a que el tratamiento de sulfuros es uno de los procesos que mayor consumo de agua con respecto a volúmenes totales tiene en la industria minera, incluyendo el proceso de reducción de tamaño, flotación, clasificación y espesamiento. Debido al alto consumo y a que la mayor cantidad del agua ingresada al proceso de flotación se va en los relaves, es necesario que ellos pasen por un proceso de espesamiento, donde se recupere la mayor cantidad de agua, tanto como el proceso de transporte y deposición lo permita.

En división Andina, se tienen 3 espesadores para el relave, distribuidos como se muestra en la Figura 3.2.

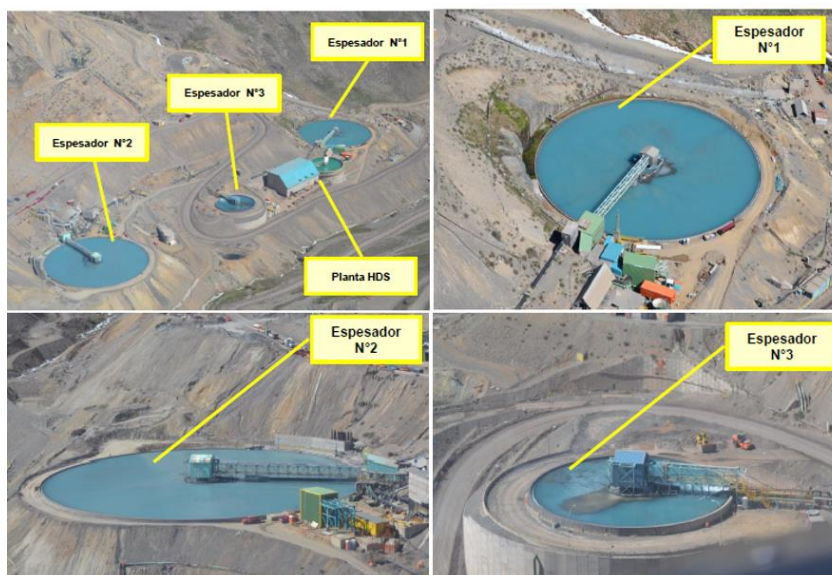


Figura 3.2. Disposición espesadores de relave CODELCO Andina (CODELCO Andina, 2018a).

Los espesadores 1 y 2 corresponden a espesadores high rate o alta capacidad y el espesador número 3 es high density o alta densidad.

Para el concentrado mixto, se tienen 2 espesadores, teniendo en operación sólo uno de ellos, que corresponde a un espesador high rate. Las especificaciones técnicas de los espesadores se encuentran en el ANEXOS

Anexo A.

3.2 Superintendencia de Recursos Hídricos DAND

CODELCO Andina, cuenta con varias fuentes de agua, las cuales son utilizadas en la operación, estas fuentes, mostradas en la Figura 3.6, son debido a las características geográficas de ubicación de la operación y sus características, las cuales se detallan a continuación y en la Figura 3.6, se muestra de forma general el flujo de estas aguas en la división.

- **Agua Fresca:** El agua fresca utilizada en la división, se utiliza principalmente para consumo humano, suministro en los laboratorios. Cuando se tienen perdidas del agua de proceso, ya sea por filtraciones, evaporación, retención en los productos y desechos, entre otros y nos encontramos bajo el Make-Up, se utiliza agua fresca para

alcanzarlo. Estas aguas pueden ser de origen superficial, subterráneo o suministrada por terceros (COCHILCO, 2012).

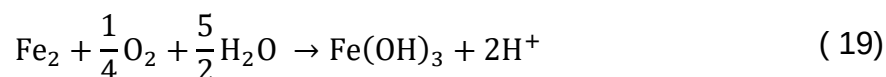
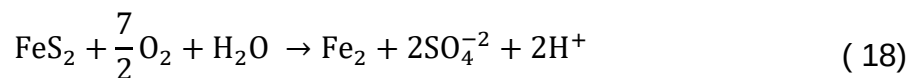
- **Agua Haulage:** También conocida como Drenaje Ácido de Mina (DAM), es una fuente de agua proveniente desde la mina subterránea Río Blanco y corresponde a un agua de origen subterráneo. Mediante un proceso natural físico químico, esta agua se “contamina”, pues al entrar en contacto la roca sulfurosa, con agua y aire, los minerales se oxidan generando la lixiviación de algunos metales asociados, dependiendo del tiempo.

Esta agua se caracteriza por tener un pH ácido, variando desde 7 a 1.5, concentración elevada de sulfatos, metales disueltos o totales y sólidos disueltos totales. Se caracteriza por tener un color marrón en ocasiones marrón rojizo, como se muestra en la Figura 3.3 a) lo que se atribuye a la presencia de Fe.

En particular en la división, esta agua es considerada un agua sucia, ya que arrastra material sólido, incluyendo desechos de los trabajadores. En otras faenas, esta agua es tratada, sin embargo, en Andina, es transporta directamente al TK-SAG (estanque de agua que alimenta al SAG).

- **Agua ARD:** Llamada con drenaje ácido de roca, es una fuente de agua proviene del deshielo de la nieve que cae en la cordillera. El agua al descender pasa por el muro del rajo abierto, donde hay sulfuros oxidados, debido a su contacto con el oxígeno de la atmósfera. La combinación de agua, oxígeno y sulfuro da como resultado la liberación de acidez, disminuyendo el pH. La mayoría de los metales contenidos en la roca, a medida que disminuye el pH aumenta la solubilidad, por lo que los fenómenos mencionados anteriormente producen un agua de drenaje con bajo pH y una gran cantidad de metales disueltos. Se caracteriza por tener un color verde azulado, como se observa en la Figura 3.3 b), lo que indica que el hierro disuelto está en estado ferroso.

A continuación, se muestra la reacción de la pirita en contacto con oxígeno y agua, ya que es uno de los minerales sulfurados más comunes (Rocco, 2013).



En la época de deshielo, el agua ARD tiene un flujo sobre los 500 [L/s], por lo tanto, es tratada en la planta HDS Cordillera, donde se efectúa la neutralización del agua ARD, mediante lechada de cal mezclada con lodos residuales. La solución neutralizada se envía a un clarificar donde parte del lodo se recircula a la etapa anterior y la otra parte es descartada. El rebose del clarificador corresponde a agua tratada para ser recirculada a la operación, como se observa en la Figura 3.4 (Gambaro, 2019).

Fuera de la época de deshielo, se mantiene un flujo de agua menor (no justificable para operar la planta HDS Cordillera) y este es desviado hasta el espesador de relaves N° 2.

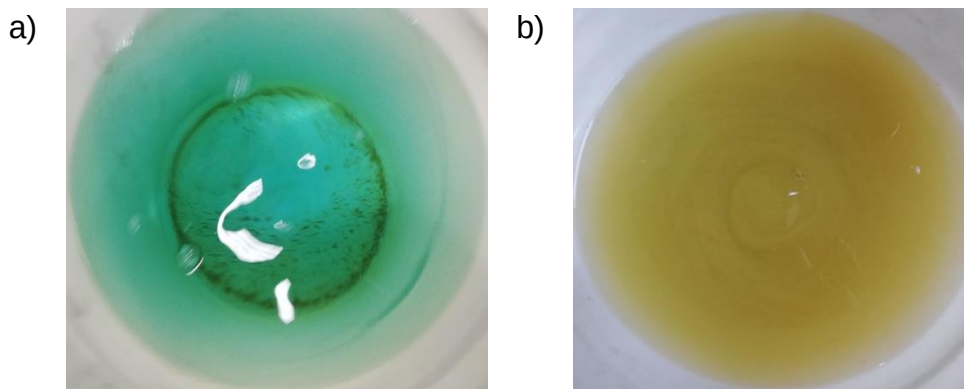


Figura 3.3. Muestras de aguas utilizadas. a) agua haulage, b) agua ARD.

- **Agua recuperada:** Esta fuente de agua, proviene del rebose en los espesadores, en el proceso de espesamiento del concentrado de cobre mixto y relave. El agua es recirculada a la operación para ser reutilizada, en el proceso de concentración, o como agua de dilución en los espesadores. Para este tipos de agua, si bien no se cuenta con un parámetro establecido que contenido de sólidos en suspensión o

turbidez máxima, a partir de experiencias en otro sitios, se recomienda que la turbidez, no supere las 100 [NTU] (França et al., 2017)

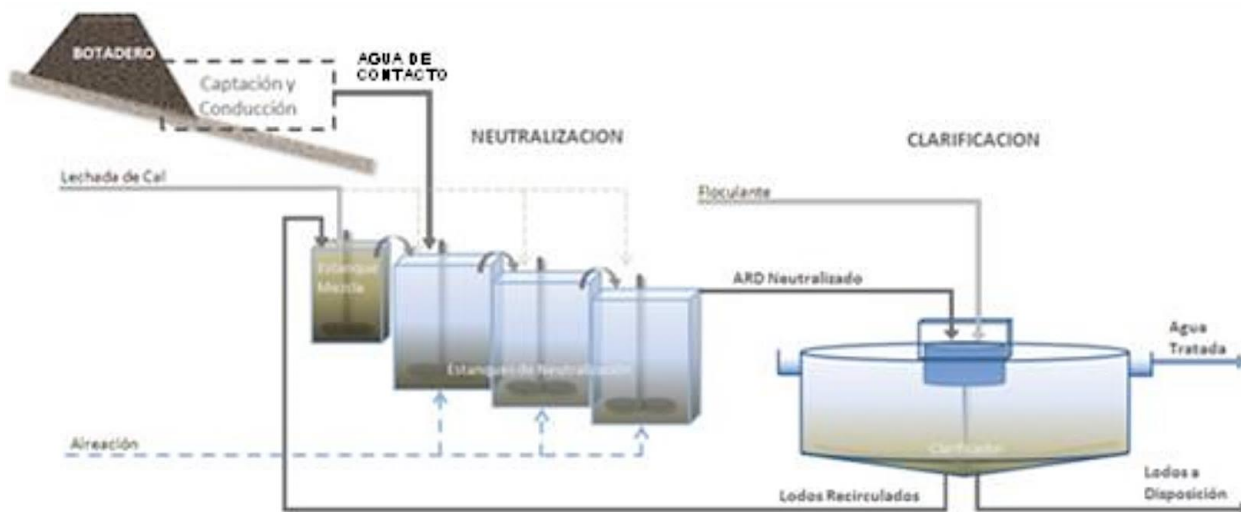


Figura 3.4. Diagrama general proceso planta HDS Cordillera (Gambaro, 2019).

En la Figura 3.6, se muestra el diagrama de flujo de aguas simplificado de Andina. Como se detalla anteriormente se tienen diversas fuentes de aguas, las cuales poseen diversas características. Durante la recopilación de información para desarrollar este trabajo, se intentó mediante balances hídricos, obtener una proporción del origen del agua que ingresa a cada proceso o estanque de almacenamiento, sin embargo, no fue posible llevar a cabo con la información posible. El contar con un análisis de este tipo permitiría poder determinar y predecir el impacto del origen del agua sobre determinada etapa del proceso. Al conocer el impacto, la operación podría tomar acciones de forma oportuna sin generar impacto sobre el proceso en cuestión.

3.3 Contexto ambiental

Durante el último tiempo, el déficit hídrico que se vive en el país ha sido un tema crítico, viviendo los diez años más secos de toda la historia registrada. En el año 2019, se tuvo un déficit de un 80% en las lluvias entre las regiones de Coquimbo y el Maule y un 30% aproximadamente entre el Biobío y Los Lagos (Garreaud et al., 2020). La escasez de

lluvias, junto con que nos encontramos en la década más cálida de los últimos 100 años, el agua disponible en los embalses y lagos sufre la evaporación, disminuyendo más aún la cantidad de agua disponible. Este evento persistente se denomina “megasequía” y no existen registros de haber vivido algo similar (CR2, 2015).

En la Figura 3.5, se presentan los datos del índice regional de precipitaciones (RPI) en la zona central de Chile, desde el año 1910 hasta el año 2020. Un año con sequía se considera cuando se tiene un RPI menor o igual a 80% (déficit de lluvia mayor o igual a 20%), los cuales se marcan con círculos rojos en la Figura 3.5. Se observa que, si bien en años anteriores se presentó sequía, esta situación no era persistente en el tiempo, mientras que desde el 2010, esta situación se mantiene, constituyendo así la megasequía (MD).

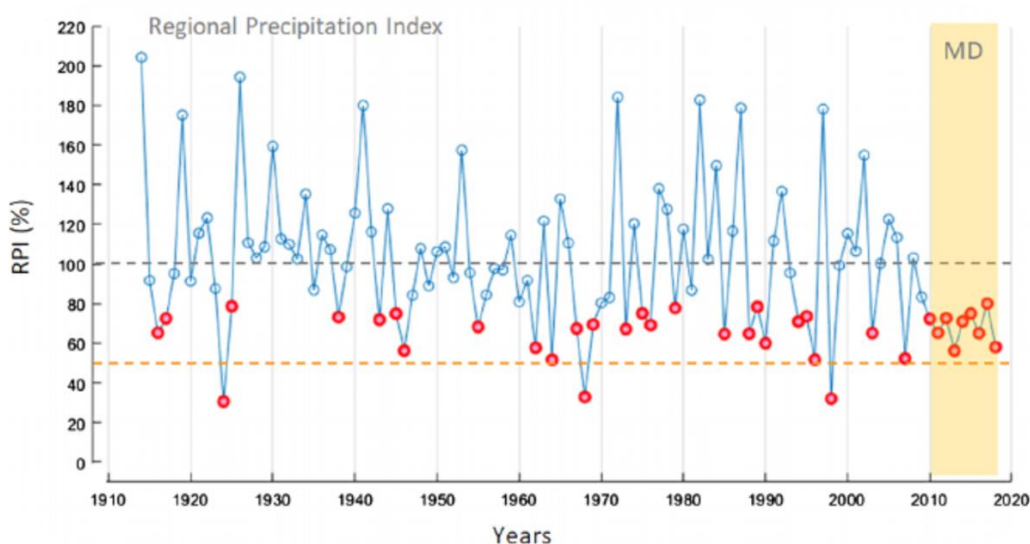


Figura 3.5. Serie anual del índice regional de precipitación (RPI) de Chile Central (Garreaud et al., 2020).

Según información registrada en la estación meteorológica de Lagunitas de CODELCO Andina, ubicada en el sector del cajón del Río Blanco a 2.765 m.s.n.m, el año 2019 reporta el año con menor acumulación de nieve desde el inicio de sus registros (1958). Con fecha 31 de Julio de 2019, se registran sólo 200 [cm] de nieve, aproximadamente un 70% menos de lo que se debería tener (700 [cm] aproximadamente) (Vicencio, 2019).



CODELCO Andina, requiere una gran cantidad de agua para su proceso de concentración, las cuales provienen principalmente del deshielo de la cordillera y el posterior almacenamiento en los embalses. Es por esto por lo que, la megasequía pone en alerta a la división, ya que un déficit de agua podría repercutir en una disminución del tratamiento de mineral, disminuyendo los ingresos de la división. Por los motivos anteriores y debido a que en el plan de negocios y desarrollos para el 2020 (CODELCO Andina, 2018b), se reconoce como riesgos crítico la disponibilidad de agua para el proceso, es que han surgido diversos proyectos para mitigar los efectos de la megasequía. Dentro de los proyectos, se encuentra las acciones en áreas operacionales, destacando la “Revisión y oportunidad de mejoramiento de capacidad de espesamiento y sistema de recirculación de la Gerencia de Recursos Hídricos, Concentrados y Relaves”(Gerencia de Recursos Hídricos, 2019).

CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE
CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”

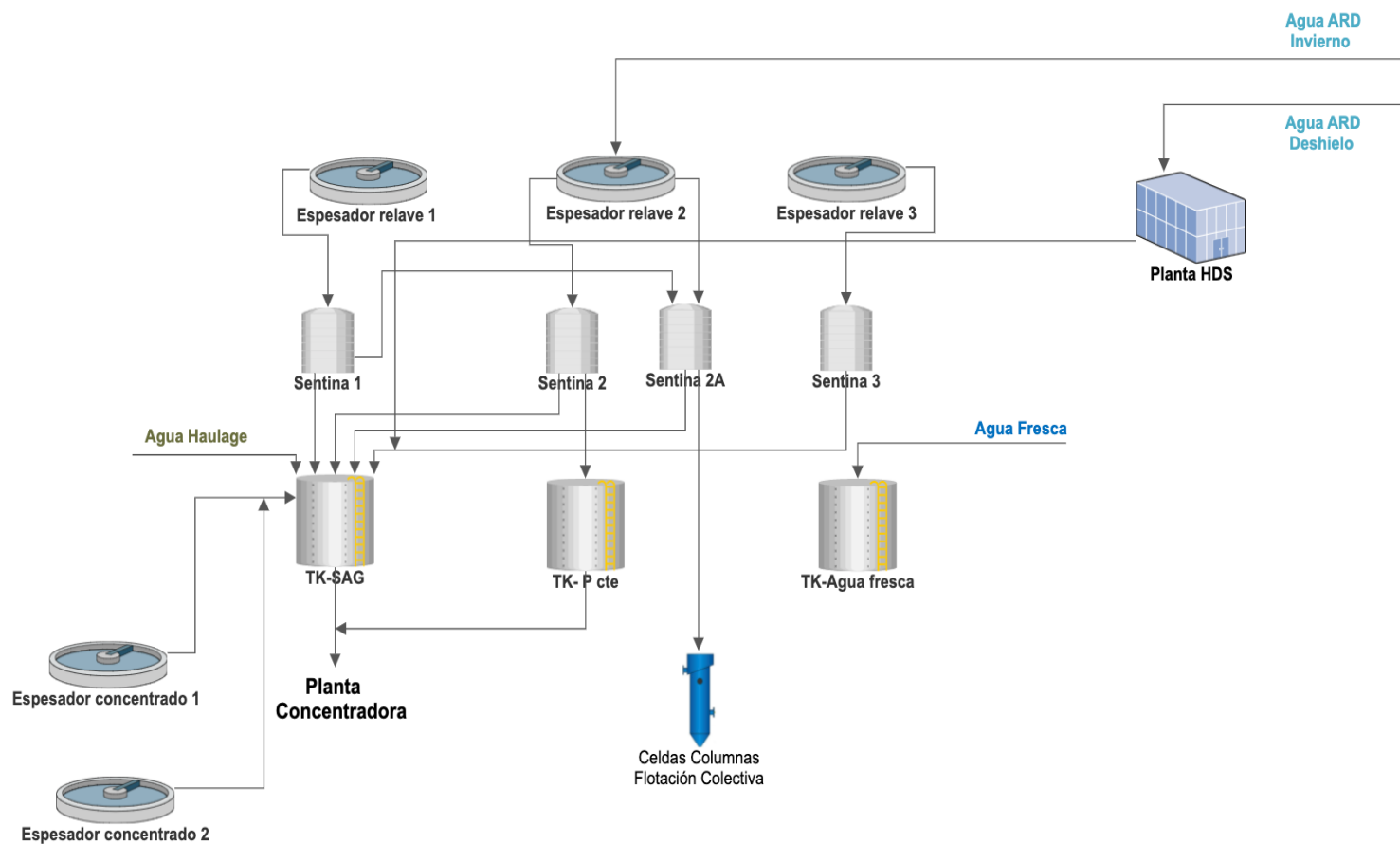


Figura 3.6. Diagrama flujo de agua CODELCO Andina [E.P].

CAPITULO 4 BENCHMARKING

Para el desarrollo de este trabajo, es importante conocer las alternativas presentes en el mercado en cuanto a productos para el espesamiento. Luego de una investigación, se determina que los proveedores con mayor presencia en la industria minera son SNF, BASF, Orica y Kemira, lo que concuerda con la información de importaciones realizadas en el año 2019 de floculantes (Cochilco, 2018).

Existe una gran cantidad de productos poliméricos, sin embargo, a partir de la información recopilada por Cochilco, los floculantes más utilizados en la minería del cobre chilena son los mostrados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Marcas de floculantes utilizados en minería chilena.

Fabricante	Producto
SNF	FLOERGER 913-SH
	FLOERGER 923-SH
	TEC-2050
	SNF 603 (*)
	SNF 604 CH (*)
BASF	Magnafloc 1011
	Magnafloc 155
	Magnafloc 2025
	Magnafloc 333
	Rheomax 1050 (*)
Orica	Orifloc AP 2020
Kemira	Superfloc A-110
(*) Floculante reológico (no convencional)	

A partir de la recopilación de importaciones desde el año 2005 al 2018, mostradas en la Figura 4.1, se observa que, en los primeros años, SNF, era el proveedor con mayor cantidad de dinero en importaciones, sin embargo, en los últimos años, esto se ha ido revirtiendo, tomando mayor importancia la empresa BASF. En los últimos 5 años, sobre el 50% del valor total de las importaciones son de BASF, siendo su producto más relevante el floculante no convencional Rheomax 1050. Este aumento puede ser debido a dos razones, una es que al ser Rheomax un floculante no convencional, su costo es mayor, o que una mayor cantidad de mineras están utilizando este reactivo.

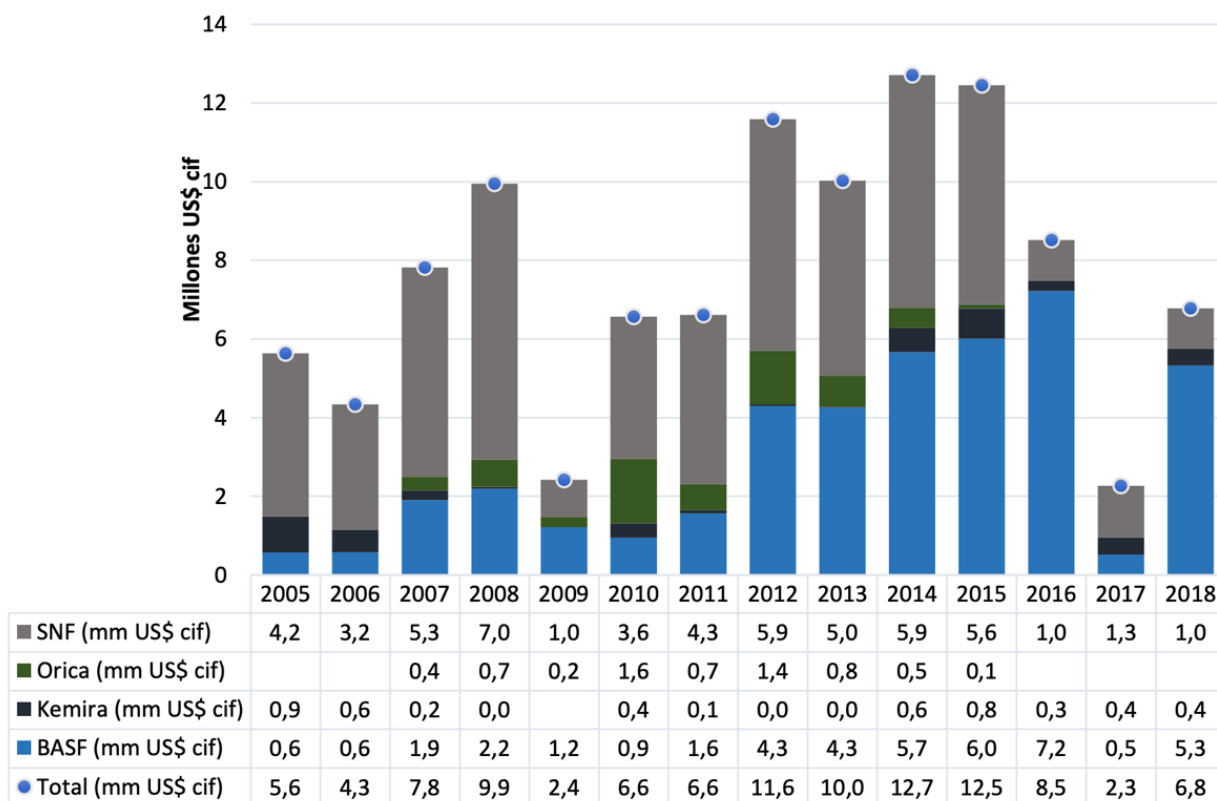


Figura 4.1. Importaciones de floculantes por fabricantes 2005-2018 (Cochilco, 2018).

A partir de las conclusiones de la investigación, se decide tomar contacto con la empresa BASF Chile, los que, a partir de información entregada de las características mineralógicas de la división, propone el uso de los floculantes detallados a continuación y envía una muestra de ellos para hacer pruebas de laboratorio.

- Magnafloc 1011 → Floculante aniónico.
- Magnafloc 338 → Floculante aniónico.
- Magnafloc 333 → Floculante no iónico (neutro).
- Rheomax 1050 → Modificador reológico aniónico.

En la Tabla 4.2, se muestra una recopilación de algunos datos técnicos de los floculantes. Es importante recalcar que las empresas fabricantes se reservan muchas de las características, ya se de composición o síntesis.

Tabla 4.2. Especificación técnica floculantes [E.P].

	Floerger 913sh	Rheomax 1050	Magnafloc 338	Magnafloc 333	Magnafloc 1011
Empresa	SNF Chile S.A	BASF Chile	BASF Chile	BASF Chile	BASF Chile
Tipo	Convencional	Modificador reológico	Convencional	Convencional	Convencional
Composición	Poliacrilamida aniónica	Poliacrilamida aniónica	Poliacrilamida aniónica	Poliacrilamida no iónica	Poliacrilamida aniónica
Estructura	Lineal	Lineal	Lineal		
Densidad [g/mL]	0,75	0,75	0,5	0,75	0,75
Peso molecular (escala empresa)	Muy alto	Medio-alto	Medio-alto	Muy alto	Alto
	Media	Media	Media	Sin carga	Media
Costo [USD/t]	3.060	4.190	3.270	5.410	

CAPITULO 5 TRABAJO EXPERIMENTAL

5.1 Muestras utilizadas

En la etapa de planificación de los experimentos, se debe tomar la decisión de las muestras a sedimentar y debido a la gran cantidad de pruebas esperadas, se determina que la sedimentación se hará con pulpa de la planta. En el caso del concentrado, se toman muestras del concentrado final producto de las columnas de flotación, mientras que para el relave se toman las muestras de la canaleta de relave final. Por lo general todas las pruebas deben ser realizadas con la misma muestra, sin embargo, por la gran cantidad de pulpa necesaria y el tiempo que toman estas, al tomar una gran muestra de pulpa, esta sufre envejecimiento y degradación de reactivos, influyendo en los resultados obtenidos. A partir del análisis de la planificación anual de producción (P0) (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, 2019), se determina que durante el tiempo que se realizarán las pruebas, no se tendrá una gran variación mineralógica en cuanto a sulfuros y gangas del mineral que ingresa a la planta, por lo tanto, se decide tomar pulpa de la planta una vez a la semana y realizar las pruebas planificadas. Al tomar las pulpas, se depositan en un balde de 25 [L] correctamente cerrados y se almacena en un lugar con temperatura controlada para evitar grandes variaciones en las características de la pulpa. La única condición para tomar las muestras es que la planta se encuentre estable, es decir, sobre 2.500 [t/h] y verificar que no haya perturbaciones que se considere influyente sobre el producto. La caracterización inicial de la muestra corresponde a la determinación de densidad, porcentaje de sólidos y análisis granulométrico. El análisis granulométrico se realiza para monitorear que no se tengan grandes variaciones en la distribución de tamaño, que generen alteraciones en los resultados obtenidos, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Resultado análisis granulométrico muestras utilizadas, P80.

Muestra	P ₈₀ muestras utilizadas [μm]								Promedio	Desv. estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Relave total	216	206	20	188	194	190	199	214	201	10
Concentrado final	50	52	49	51	50	50	50	51	50	0,99

En el Anexo B, se encuentra un gráfico con el resumen de la caracterización mineralógica del mineral de cabeza mina rajo del plan de producción anual, observando en la Figura B. 1 la distribución en sulfuros base mineral y en la Figura B. 2 la distribución de la ganga base mineral. De esto se destaca que en durante el año no se espera una gran cantidad porcentual ni gran variación del contenido de arcillas, que de a cuerdo con la revisión bibliográfica, son las que generan un mayor impacto en el espesamiento. Para el desarrollo de este trabajo, no fue posible incluir caracterización mineralógica de lo que efectivamente ingresó en la planta durante los meses de trabajo, lo cual resultaría interesante conocer, para corroborar o refutar lo planteado anteriormente, con el detalle del plan de producción.

Las aguas utilizadas en los experimentos son la detalladas a continuación y sus características se presentan en la Tabla 5.2

- **Agua fresca:** es tomada del laboratorio metalúrgico y se utiliza para el ajuste de porcentaje de sólidos de la pulpa, es decir para diluirla.
- **Agua haulage:** es tomada en el refugio haulage que es el punto de recolección de aguas de percolación de la mina subterránea. Se utiliza para el ajuste de pH de la pulpa de concentrado.
- **Agua ARD:** se obtiene de una toma de muestras en la cañería del flujo ARD hacia el espesador de relaves. Se utiliza para el ajuste de pH de la pulpa de relaves.

Tabla 5.2. Caracterización de aguas utilizadas en los experimentos [E.P].

Característica		Agua fresca	Agua haulage	Agua ARD
[mg/L]	pH / Eh		6,86 / 6,00	4,58 / 120,40
	Ca ⁺²	<10,00	725,00	990,00
	Mg ⁺²	<5,00	152,00	-
	Cl ⁻	5,00	46,00	-
	Cu ⁺²	<0,05	3,11	38,00
	Fe ⁺³	<0,05	14,85	7,45
	Al ⁺³	0,05	0,21	168,75
	SO ₄ ⁻²	<100,00	1350,00	5125,00
	Mn ⁺²	<0,1	14,45	80

5.2 Diseño experimental

Para determinar el número de experimentos a realizar en este trabajo, se hace en función de los objetivos. En una primera etapa, nos interesa generar la línea base del proceso de espesamiento a escala de laboratorio y determinar la influencia de las variables porcentaje de sólido inicial y dosificación de floculante sobre las respuestas velocidad de sedimentación y la calidad del agua recuperada, lo cual se hace con un diseño factorial 3^k (k factores con 3 niveles cada uno). El diseño factorial nos permitirá medir la influencia de 2 factores sobre una respuesta, Tabla 5.4, evaluándolos en 3 niveles distintos, como se muestra en la Tabla 5.4, por lo tanto, se tiene un diseño factorial 3^2 . En la ejecución de los experimentos es importante que estos tengan una réplica y se hagan de forma aleatoria para reducir el error, para esto se utiliza el software Minitab el cual nos entrega la propuesta de experimentos, que son un total de 18 experimentos para pulpa concentrado y 18 para pulpa relave, teniendo en consideración niveles y aleatoriedad, como se muestra en el diseño que se encuentra en la Tabla C. 1 y Tabla C. 2, ANEXOS Anexo A. Para definir cada nivel, se tomó en consideración los rangos operacionales.

Tabla 5.3. Factores experimentos primera etapa.

Factores
Dosis de floculante [g/t]
Sólido inicial [%]

Tabla 5.4. Niveles de experimentos primera etapa para los factores seleccionados.

		Dominio experimental		
		Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
Concentrado final	Dosis [g/t]	5	10	15
	Sólido inicial [%]	15	20	25
Relave total	Dosis [g/t]	9	14	19
	Sólido inicial [%]	12	17	22

En la Figura 5.1, se muestra de forma geométrica los experimentos a realizar, donde cada vértice (esfera), representa una prueba experimental de la primera etapa.

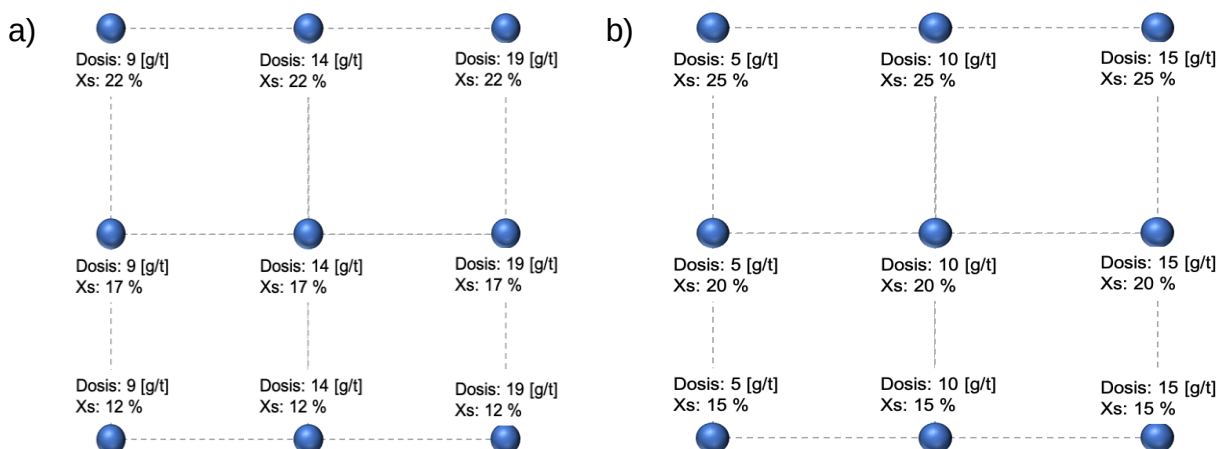


Figura 5.1. Representación geométrica de los experimentos a realizar en la primera etapa; a) Experimentos relave total, b) Experimentos concentrado final.

Concluida la primera etapa de experimentos tanto para concentrados y relaves, se hace una segunda etapa que incluye un factor más, que es el floculante, seleccionados con el resultado de la etapa de benchmarking. Al incluir el floculante, se tiene un diseño factorial 3^3 , con 2 réplicas, teniendo un total de 54 experimentos para pulpa relave y 54 para pulpa concentrado. El orden de los experimentos al igual que en la primera fase, se determina con el uso de Minitab y se encuentra el detalle en la Tabla C. 3 y Tabla C. 4 del Anexo C.

Tabla 5.5. Factores experimentos segunda etapa.

Factores
Floculante
Dosis de floculante [g/t]
Sólido inicial [%]

Tabla 5.6. Niveles de experimentos segunda etapa para los factores seleccionados.

		Dominio experimental		
		Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
Concentrado final	Floculante	Magnafloc 333	Magnafloc 338	Rheomax 1050
	Dosis [g/t]	5	10	15
	Sólido inicial [%]	15	20	25
Relave total	Floculante	Magnafloc 333	Magnafloc 338	Rheomax 1050
	Dosis [g/t]	9	14	19
	Sólido inicial [%]	12	17	22

En la Figura 5.2, se muestra geoméricamente los experimentos a realizar en la segunda etapa, donde de forma análoga a la primera etapa, cada vértice representa una prueba experimental.

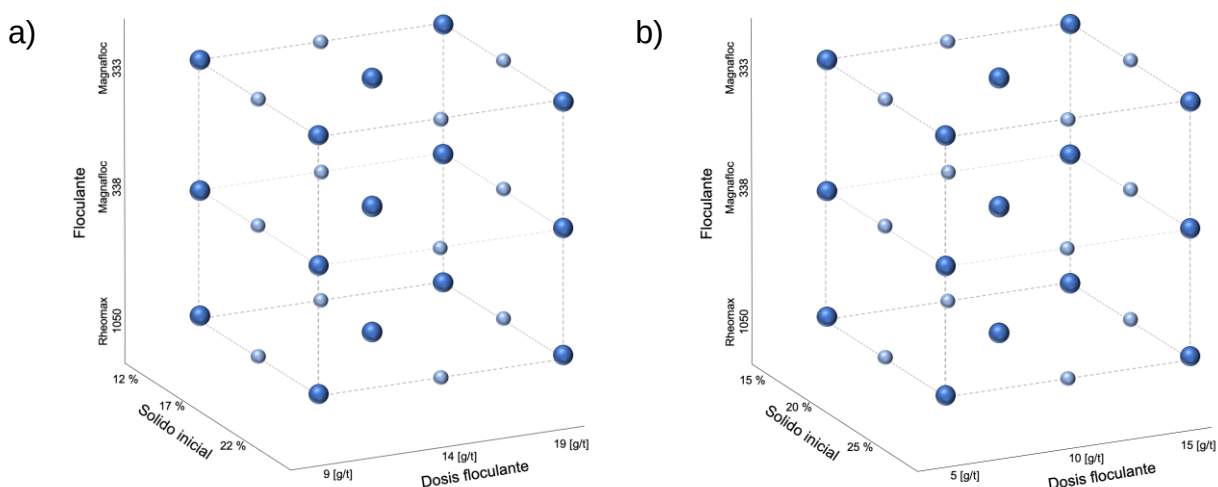


Figura 5.2. Representación geométrica de los experimentos a realizar en la primera etapa; a) Experimentos relave total, b) Experimentos concentrado final.

En la tercera etapa experimental se busca conocer la influencia del pH en la efectividad de los floculantes estudiados, incluyendo el floculante planta. Los factores de estudios en la etapa son dos, floculante y pH, manteniendo el porcentaje de sólidos inicial y dosificación de floculante como el estándar de la planta. En el caso del espesamiento de relave, debido a las condiciones operacionales resulta más probable que el pH tenga una mayor disminución que en el caso del espesamiento de concentrado, por lo tanto, se estudian distintas cantidades de niveles. Debido a que para el floculante estudiaremos 4 niveles y este es distinto a la cantidad de niveles de pH, no corresponde a un diseño factorial, corresponde más a un barrido de pH para cada floculante. La interacción de todos los niveles y factores, incluyendo los duplicados, da un resultado de 40 experimentos para las pulpas de relaves y 24 para las pulpas de concentrado. El diseño experimental se muestra en la Tabla C. 5 y Tabla C. 6 del Anexo C.

Tabla 5.7. Factores experimentos tercera etapa.

Factor
Floculante
pH

Tabla 5.8. Niveles experimentos tercera etapa para los factores seleccionados.

Dominio experimental					
Niveles					
Concentrado final	Floculante	Floerger 913sh (*)	Magnafloc 333	Magnafloc 338	Rheomax 1050
	pH	8,67	10,5	10,5	11,33
Relave final	Floculante	Floerger 913sh (*)	Magnafloc 333	Magnafloc 338	Rheomax 1050
	pH	4,6	6,5	8,5	10,6
(*) Floculante actual planta					

5.3 Procedimiento experimental

Cada trabajo para realizar se describe detalladamente en los anexos correspondientes, sin embargo, el esquema general de trabajo se muestra en la Figura 5.3 y a continuación se describen brevemente cada uno de ellos.

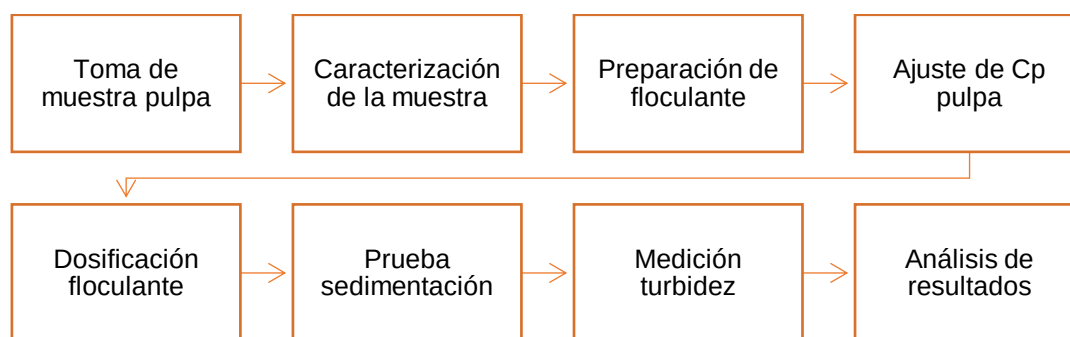


Figura 5.3. Esquema general de pruebas de laboratorio [E.P].

- **Toma de muestra pulpa:** este trabajo está a cargo de la empresa colaboradora Cesmec y se realiza bajo condiciones detalladas anteriormente.

- **Caracterización de la muestra:** se registra el pH y se determina el porcentaje de sólido inicial de la pulpa, mediante la homogenización de la muestra y llenado de una probeta de 1[L], al registrar la masa total y conocer el volumen se puede determinar la densidad y luego el porcentaje de sólido inicial. La pulpa utilizada para determinar el sólido es secada en el horno, para realizar un análisis granulométrico.

$$\rho_{pulpa} = \frac{m_{pulpa}}{V_{pulpa}} \quad (20)$$

$$Cp_{pulpa} = \frac{(\rho_{pulpa} - 1) \cdot SG_{mineral}}{(SG_{mineral} - 1) \cdot \rho_{pulpa}} \quad (21)$$

$$\rho_{pulpa 2} = \frac{SG_{mineral}}{\left(SG_{mineral} - (SG_{mineral} - 1) \cdot \frac{Cp_{pulpa 2}}{100} \right)} \quad (22)$$

$$V_{pulpa \text{ ajuste}} = 1000 \cdot \frac{\rho_{pulpa} - 1}{\rho_{pulpa 2} - 1} \quad (23)$$

- ρ_{pulpa} : densidad pulpa.
- m_{pulpa} : masa pulpa.
- Cp_{pulpa} : Porcentaje de sólido pulpa.
- V_{pulpa} : volumen pulpa.
- $SG_{mineral}$: gravedad específica mineral.
- $\rho_{pulpa 2}$: densidad pulpa esperada (luego de diluir).

- **Preparación floculante:** se masa la cantidad deseada de floculante dependiendo de la concentración y cantidad de floculante deseada. La muestra masada, se disuelve en un vaso precipitado con agua y la ayuda de un agitador magnético. Para este trabajo, la concentración de floculante de la solución madre, es de 2 [g/L].

$$m_{\text{floculante.s}} = [\text{floculante}] \left[\frac{\text{g}}{\text{mL}} \right] \cdot V_{\text{mezcla}} [\text{mL}] \quad (24)$$

- $m_{\text{floculante.s}}$: masa floculante sólido.
- $[\text{floculante}]$: concentración deseada de floculante.
- V_{mezcla} : volumen a preparar de floculante líquido.

- **Ajuste sólido inicial pulpa:** mediante las ecuaciones (25) y (26), se determina la cantidad de pulpa a depositar en la probeta de sedimentación y la diferencia de volumen hasta alcanzar 1[L], se completa con agua fresca. De esta forma se diluye la pulpa desde el sólido inicial hasta el sólido deseado.

$$\rho_{\text{pulpa 2}} = \frac{SG_{\text{mineral}}}{\left(SG_{\text{mineral}} - (SG_{\text{mineral}} - 1) \cdot \frac{Cp_{\text{pulpa 2}}}{100} \right)} \quad (25)$$

$$V_{\text{pulpa ajuste}} = 1000 \cdot \frac{\rho_{\text{pulpa}} - 1}{\rho_{\text{pulpa 2}} - 1} \quad (26)$$

- $Cp_{\text{pulpa 2}}$: Porcentaje de sólido esperado en pulpa diluida.
- $V_{\text{pulpa ajuste}}$: volumen de pulpa inicial en [mL] que se debe depositar en una probeta de 1[L] para obtener el sólido deseado.

- **Dosificación de floculante:** Mediante el cálculo de la ecuación (27), se determina la cantidad en [cm³] de floculante que se necesita para tener una dosificación determinada. La muestra se toma con una micropipeta y se deposita en una probeta que contiene una cantidad del agua de la pulpa a sedimentar, aquí se disuelve mediante agitación y luego esta mezcla se deposita dentro de la probeta para comenzar la sedimentación.

$$V_{\text{floculante}} = \frac{\text{masa}_{\text{mineral seco}} [\text{g}] \cdot \text{dosis}_{\text{floculante}} \left[\frac{\text{g}}{\text{tms}} \right] \cdot \frac{1 [\text{tms}]}{10^6 [\text{g}]}}{\text{Concentración}_{\text{solución madre floculante}} \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right] \cdot \frac{1 [\text{L}]}{1000 [\text{cm}^3]}} \quad (27)$$

- **Prueba de sedimentación:** Antes de dosificar el floculante, es importante poner en la probeta una cinta métrica, desde la marca de 1 [L], hasta la base de la probeta (ver Figura 5.5). Una vez dosificado el floculante en las probetas, el equipo se cierra y se pone en movimiento para homogenizar la pulpa y favorecer el contacto del sólido con el floculante (se puede definir la cantidad de vueltas que se desee, para este estudio se programan 30 vueltas). Terminada la homogenización, se comienza a cronometrar y en la cinta métrica, se marca la altura de la interfase cada 1 [min], durante los primeros diez minutos de la prueba y transcurrido este tiempo, se marca la interfase cada 5 [min], hasta completar los 30 [min], finalizando la prueba. El descenso de la interfase se muestra en la Figura 5.4 . este procedimiento se encuentra detallado en el Anexo D, ya que se realiza de acuerdo con el procedimiento estándar de la división.

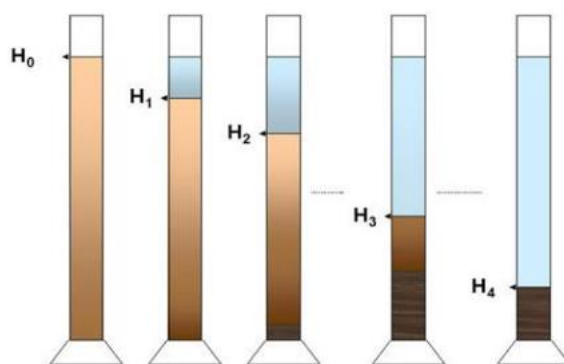


Figura 5.4. Sedimentación batch (Concha, 2001).

- **Medición de turbidez:** la medición de la turbidez se realiza mediante la toma de una muestra de agua clara, a través de la válvula instalada en cada probeta, como se observa en la Figura 5.5. La toma de muestras consiste en abrir la válvula y no tomar la muestra los primeros segundos, puesto que puede salir sólido depositado en el borde de la válvula e interferir en el resultado de la medición. Luego de dejar salir el agua aproximadamente 3 segundos, se llena una cubeta de medición por cada probeta. La cubeta debe estar aforada en los 10 [mL] con la muestra tomada. Una vez cerrada la cubeta, se homogeniza la muestra y se procede a disponer dentro del equipo de medición, turbidímetro. El procedimiento de medición para cada cubeta se repite dos veces. El tiempo entre la homogenización y medición,

debe ser lo más breve posible para evitar la sedimentación del sólido en suspensión. La configuración del equipo para la correcta medición, y el procedimiento detallado, se encuentra en el Anexo D. La toma de muestra de agua clara y posterior medición, se realiza dos veces durante la prueba, a los 10 [min], medición intermedia y a los 30 [min], en la finalización de la prueba.



Figura 5.5. Probetas para sedimentación [E.P].



Figura 5.6. Cubeta medición de turbidez [E.P].

- **Análisis de resultados:** las mediciones de altura de interfase realizadas se registran en una planilla Excel y se procesan para obtener curvas de sedimentación, velocidad de sedimentación, variación de turbidez y cantidad de agua recuperada. Procedimientos detallados a continuación.
 - Velocidad de sedimentación: La medición de altura interfase pulpa agua clara, se registra en la planilla Excel y se grafica altura pulpa versus tiempo, obteniendo una curva de sedimentación como se muestra en la Figura 5.7. Para obtener la velocidad de sedimentación inicial, se traza una recta tangente a la parte de la curva donde se mantiene la pendiente constante como se muestra en la Figura 5.7. La pendiente de la recta trazada (roja), corresponde a la velocidad de sedimentación.

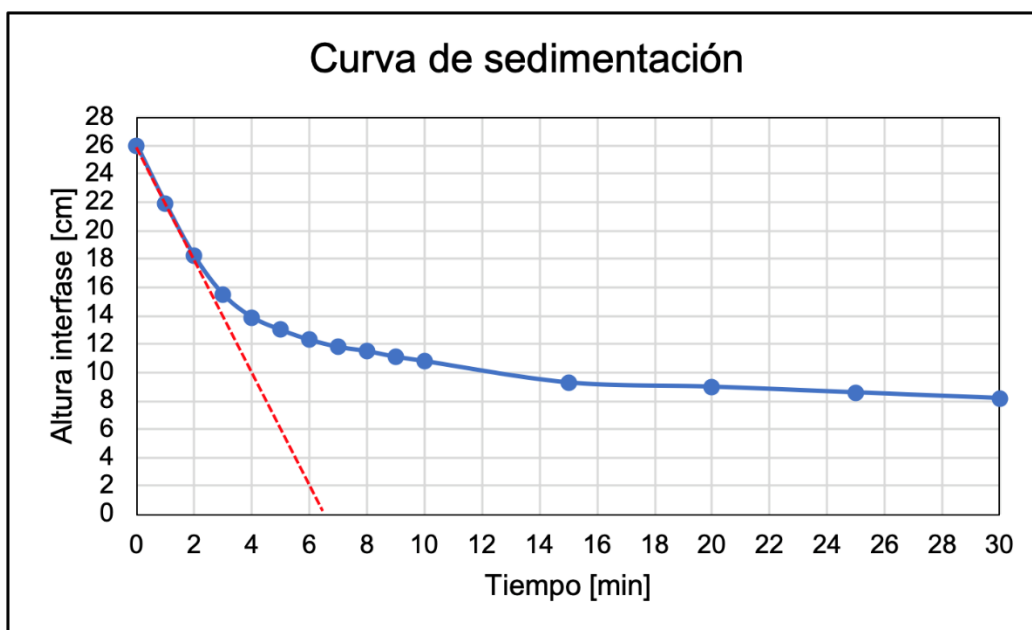


Figura 5.7. Curva de sedimentación típica [E.P].

- **Turbidez:** Se registran las mediciones para cada condición (2 por cada toma de muestra) y se reporta el promedio de las mediciones.
- **Porcentaje de agua recuperada:** conociendo la masa inicial de la pulpa, el porcentaje de sólidos inicial de cada probeta y las dimensiones de la probeta (ver Tabla 5.9), se puede conocer la cantidad de agua inicial para cada prueba. En un tiempo determinado, conociendo la altura de la columna de agua en ese instante, se puede conocer la cantidad de agua en mL, de esta forma se puede conocer el porcentaje de agua recuperada con respecto al agua total en cualquier instante.

5.4 Equipos de laboratorio

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizan los equipo e insumos de laboratorio detallados a continuación.

5.4.1 Sedimentador

El equipo de sedimentación utilizado es fabricado a pedido por la empresa Serquimet mostrado en la Figura 5.8 a). Cuenta con un soporte metálico que sostiene 4 probetas de

1 [L], el cual, mediante un sistema eléctrico gira las probetas, reduciendo de esta forma el error humano en la homogenización de las pulpas. Debido a los requerimientos de este trabajo, se modifican las probetas, incorporando válvulas que permitan tomar las muestras de agua clara para la medición de turbidez, ubicadas aproximadamente a 8 [cm] de la marca de 1 [L], quedando como se muestra en la Figura 5.8 b). El instructivo detallado de sedimentación se muestra en la Figura D. 1 y Figura D. 2, Anexo D.

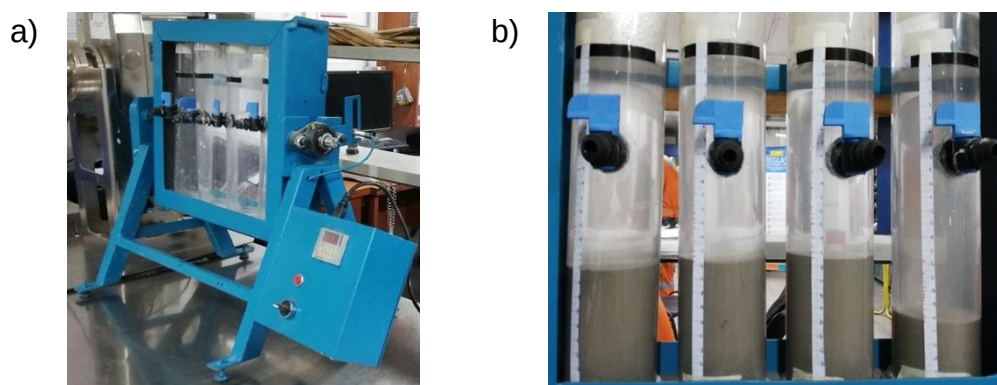


Figura 5.8. Equipo de sedimentación. a) Sedimentador Serquimet. b) Probetas modificadas.

Tabla 5.9. Dimensiones probetas de sedimentación equipo Serquimet.

Dimensiones probeta sedimentación	
Altura completa	35 [cm]
Altura en graduación 1[L]	26 [cm]
Altura toma de agua	18 [cm]
Díámetro	7 [cm]

5.4.2 Turbidímetro

El turbidímetro utilizado corresponde al de Hanna Instruments, modelo HI83414, el cual tiene como principio de funcionamiento la reflexión y difracción de una luz que se emite en dirección a la cubeta que contiene la muestra.

En este trabajo el equipo se emplea para medir la turbidez del agua clara una vez finalizada la prueba de sedimentación. El procedimiento en específico para las pruebas y su calibración se encuentra en la Figura D. 3 del Anexo D.



Figura 5.9. Turbidímetro HI-83414, con cubetas de medición y set de calibración.

5.4.3 Espectrofotómetro

El espectrofotómetro corresponde a un equipo que permite medir algunos parámetros del agua, dentro de los más relevantes, es la medición de iones mediante el uso de test de cubetas que contienen reactivos o una mezcla de ellos, selectivos para un parámetro, como el mostrado en la Figura 5.10 Set de prueba de espectrofotometría. a) Spectroquant NOVA 60A, b) Test de cubeta, medición de iones. b). Los reactivos producen una reacción que se evidencia con un cambio de color en la muestra y dependiendo de su intensidad, el equipo cuantifica el parámetro medido.

En este trabajo, se utiliza el espectrofotómetro Spectroquant NOVA 60A, perteneciente al laboratorio de la planta HDS y se utiliza para caracterizar iónicamente el agua haulage y ARD utilizadas para las pruebas de sedimentación con variación de pH. El procedimiento de mediciones depende de cada ion a medir y se adjunta en la Figura D. 4 y Figura D. 5 en el Anexo D.

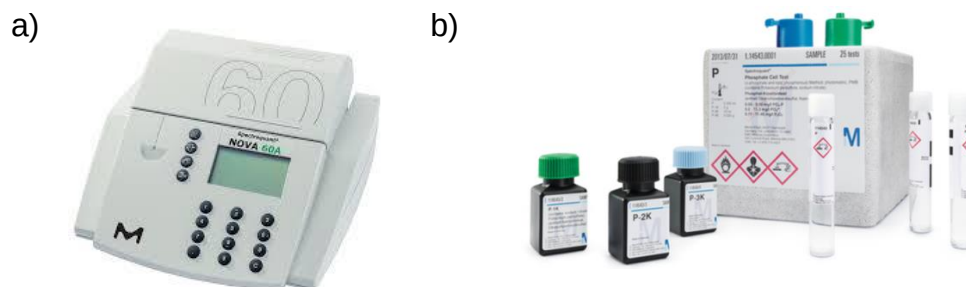


Figura 5.10 Set de prueba de espectrofotometría. a) Spectroquant NOVA 60A, b) Test de cubeta, medición de iones.

5.4.4 Ro-tap

El equipo Ro-tap se emplea para el análisis de laboratorio de granulometría, utilizando una columna de tamices que son sometidos a vibración y movimientos rotatorios intensos, para de esta forma distribuir la muestra ingresada en la columna de tamices. Mediante la masa retenida en cada malla y un procesamiento de los datos en una planilla Excel, se puede obtener la curva de distribución granulométrica de una muestra y su P_{80} .

En este trabajo, se utiliza el Ro-tap mostrado en la Figura 5.11 para determinar el p_{80} de las pulpas de relaves y concentrados utilizadas para sedimentar, posterior a su secado en un horno. En el caso de las muestras de concentrado la serie de tamices va hasta la #325, mientras que, para el relave, hasta #200. El procedimiento detallado bajo el cual se realizaron los análisis granulométricos se encuentra en la Figura D. 6 y Figura D. 7 del Anexo D.

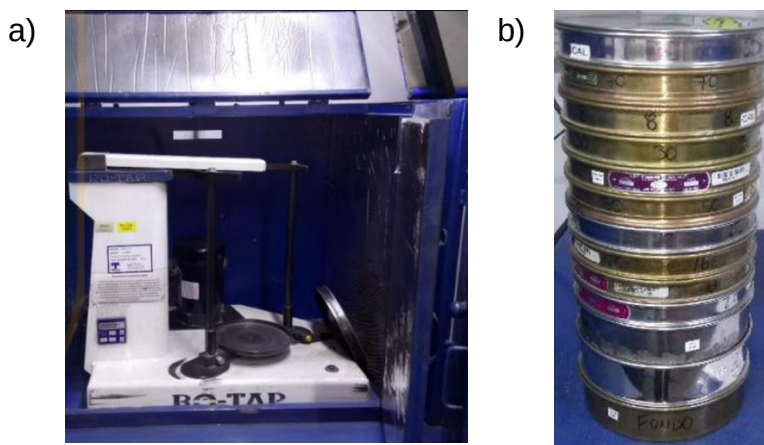


Figura 5.11. Equipos análisis granulométricos. a) Ro-Tap, b) set de mallas ASTM.

5.4.5 Agitador magnético

Los agitadores magnéticos se utilizan para mezclar soluciones o líquidos, mediante la generación de un campo magnético que permite el movimiento de un imán cubierto de teflón dentro de la muestra.

En este trabajo se utiliza un agitador como el de la Figura 5.12, para la preparación de floculante, ya que este viene sólido y debe ser diluido en cierta cantidad de agua dependiendo de la concentración deseada. Para que la dilución sea correcta, se utiliza el agitador, y se deja el tiempo necesario hasta que no se observan diferencias de fases, ya que, de existir, podría disminuir la efectividad del floculante dosificado.



Figura 5.12. Agitador magnético.

5.4.6 Balanzas

Existen diversos tipos de balanzas y en este trabajo se emplea una balanza analítica como la Figura 5.13 a), para masar la cantidad de floculante para su preparación. Mientras que, para masar la pulpa y probetas, se utiliza una balanza analítica de platillo como la mostrada en la Figura 5.13 b).

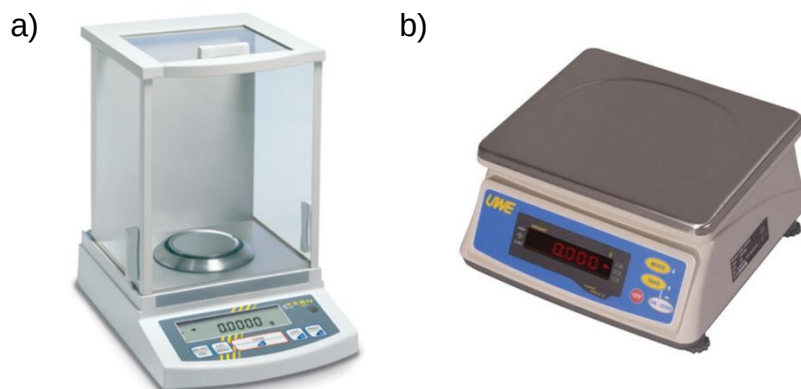


Figura 5.13. Balanzas. a) Balanza analítica, b) Balanza analítica de platillo.

5.4.7 pH-metro

Una de las variables importantes en la sedimentación, son el valor de pH de la muestra, por lo tanto, en este trabajo se emplea un pH-metro para tomar las medidas de pH y Eh de las pulpas sedimentadas y de las aguas utilizadas como modificadores de pH.

El método de medición y calibración del equipo, se hacen en base al manual del equipo utilizado.

5.4.8 Materiales e insumos

Para el correcto funcionamiento de los equipos mencionados anteriormente, y el desarrollo de los experimentos, se utilizan los materiales e insumos detallados en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Materiales e insumos para el trabajo.

Materiales	Insumos
Vasos precipitados	Agua desionizada
Probetas	Papel filtro
Micropipetas	Guantes de látex
Vidrio reloj	Test de cubeta medición de iones
Espátula	(Ca ⁺² , Mg ⁺² , Cl ⁻ , Cu ⁺² , Fe ⁺³ , Al ⁺³ , SO ₄ ⁻²)
Embudo	Buffer de calibración
Piseta	
Bandejas de aluminio	

CAPITULO 6 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos de los experimentos detallado en el capítulo anterior. Para facilitar el análisis de los resultados, se decide reportar el valor de velocidad de sedimentación inicial en lugar de las curvas de sedimentación de cada experimento. Las mediciones registradas de altura de interfase, velocidad de sedimentación y turbidez, para cada experimento realizado, se reportan en el Anexo E, desde la Tabla E. 1, hasta la Tabla E. 8.

6.1 Etapa 1: Línea base con relave total y concentrador final

La primera etapa de los experimentos corresponde a sedimentaciones y medición de turbidez agua clara para pulpas de relave total y concentrado final.

6.1.1 Resultados obtenidos con Relave Total y Concentrado Final

En la Figura 6.1 a), se presentan los resultados de velocidad de sedimentación de todas las pruebas realizadas al relave final con el floculante Floerger 913sh (actual planta), los que varían entre 1 [m/h] y 3,5 [m/h]. Se observa que, dentro del rango estudiado, para bajos porcentajes de sólido se obtiene una mayor velocidad de sedimentación y esta disminuye con el aumento del porcentaje de sólido inicial. También se observa que, con el aumento del porcentaje de sólidos, la diferencia en la velocidad de sedimentación a diferentes dosificaciones es más notoria, obteniendo mayor velocidad de sedimentación a mayor dosificación de floculante. En cuanto a la turbidez medida en el agua clara reportada en la Figura 6.1 b), se observa que en la muestra tomada a los 10 [min] de comenzada la prueba, una leve disminución con el aumento de la dosificación de floculante y con el aumento del porcentaje de sólidos inicial, en el orden de aproximadamente 200 [NTU]. En la muestra tomada al finalizar la prueba, 30 [min], se evidencia en mayor medida el efecto de la dosificación de floculante sobre la turbidez medida. A su vez, se presenta una disminución en la turbidez medida a través del tiempo. Las medidas de turbidez final varían entre 140 [NTU] y 70 [NTU] aproximadamente.

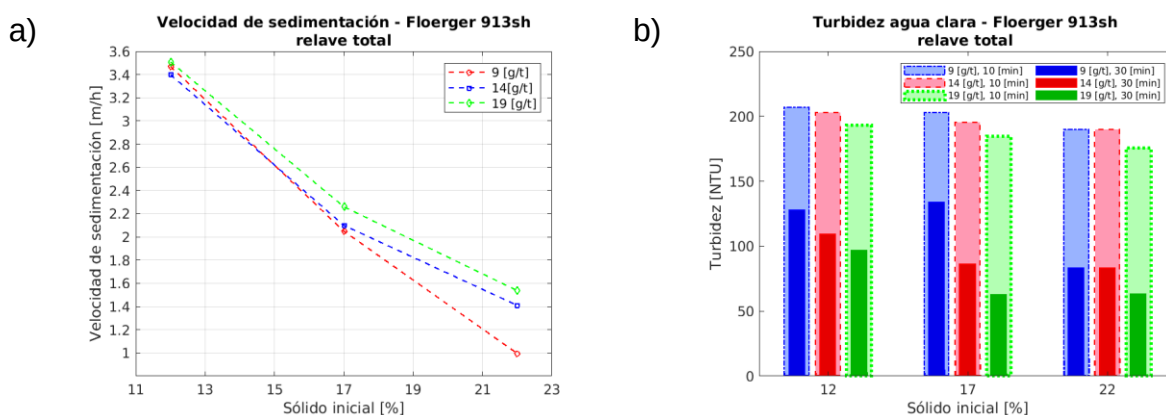


Figura 6.1 Resultados pruebas de sedimentación relave total; floculante: Floerger 913sh; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.

Los valores reportados en las figuras anteriores corresponden al promedio entre la prueba original y el duplicado, los cuales tienen una desviación estándar de $\pm 0,03$ [m/h] en la velocidad de sedimentación y una desviación estándar de $\pm 20,96$ [NTU] para los valores de turbidez.

6.1.2 Resultados experimentos concentrado final

En la Figura 6.2 se compilan los resultados de velocidad de sedimentación de concentrado para todas las pruebas realizadas con el floculante Floerger 913sh, los cuales varían entre 3,5 [m/h] y 6,3 [m/h]. Se observa que al igual que en el caso del relave, la velocidad de sedimentación disminuye conforme aumenta el porcentaje de sólidos inicial, sin embargo, esta disminución no es lineal. Entre 15% y 20 % de sólidos, la disminución de la velocidad de sedimentación ocurre de forma más suave, sin embargo, sobre el 20%, el descenso es mucho más rápido. Según lo observado, la dosis de floculante aplicada sólo tiene un efecto de disminución de la velocidad con el 17% sólido. Respecto a la turbidez obtenida mostrada en la Figura 6.2 b), se observa una disminución con el aumento de la dosificación de floculante y con el porcentaje de sólidos. En concordancia con los resultados obtenidos de velocidad de sedimentación, la caída de turbidez es más abrupta sobre el 17% de sólidos. El tiempo en el que son tomadas las muestras tiene una gran influencia en la turbidez, mientras que para la muestra tomada

a los 10 [min], la turbidez varía entre 130 [NTU] y 50 [NTU], para la muestra final, la turbidez varía entre 70 [NTU] y 30 [NTU] aproximadamente.

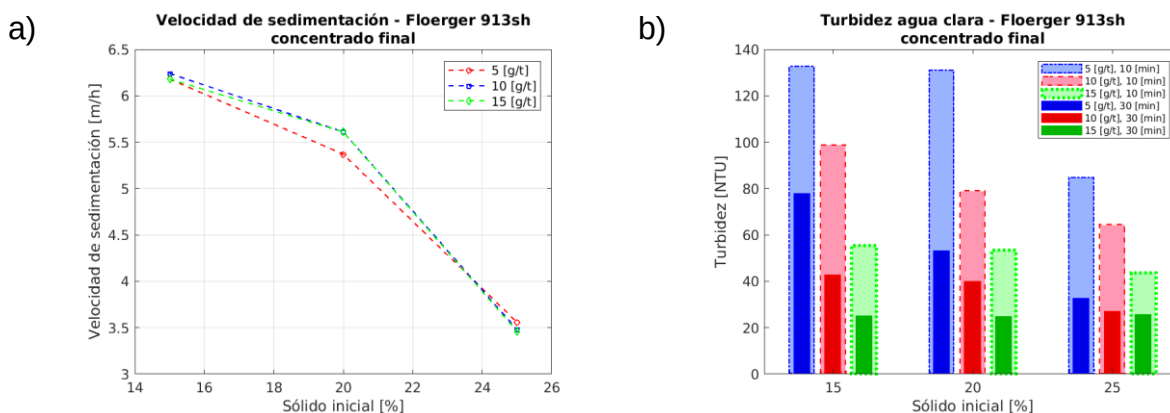


Figura 6.2 Resultados pruebas de sedimentación concentrado final; floculante: Floerger 913sh; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.

Los valores reportados anteriormente corresponden al promedio entre la prueba original y el duplicado, los cuales tienen una desviación estándar de $\pm 0,06$ [m/h] en la velocidad de sedimentación y una desviación estándar de $\pm 6,56$ [NTU] para los valores de turbidez.

6.2 Etapa 2: Evaluación de floculantes

La segunda etapa de experimentos se realiza para comparar el rendimiento a escala de laboratorio de los floculantes propuestos tanto en la sedimentación de relaves como concentrados y contrastar los resultados con los obtenidos en la primera etapa.

6.2.1 Resultados experimentos relave total

En la Figura 6.3 a), se muestran los resultados de velocidad de sedimentación obtenidos para el floculante Rheomax 1050 en la sedimentación de relave total, resultados que varían en un amplio rango entre $1,5 \pm 0,03$ [m/h] y $7 \pm 0,03$ [m/h]. Se observa que la velocidad de sedimentación disminuye con el aumento del porcentaje de sólidos, y a su

vez disminuye con menores dosis de floculante, siendo esta disminución mayor, a bajos porcentajes de sólidos inicial. La disminución de velocidad de sedimentación respecto al sólido inicial se vuelve más lineal a medida que aumenta la dosificación de floculante. En la Figura 6.3 b), se observa que la medición de turbidez a los 10 [min], varía entre los $250 \pm 11,45$ [NTU] y $300 \pm 11,45$ [NTU], sin gran variación con respecto al cambio de dosis de floculante y al sólido inicial utilizado para las pruebas. La turbidez obtenida al finalizar la prueba, para todas las pruebas es menor a $50 \pm 11,45$ [NTU].

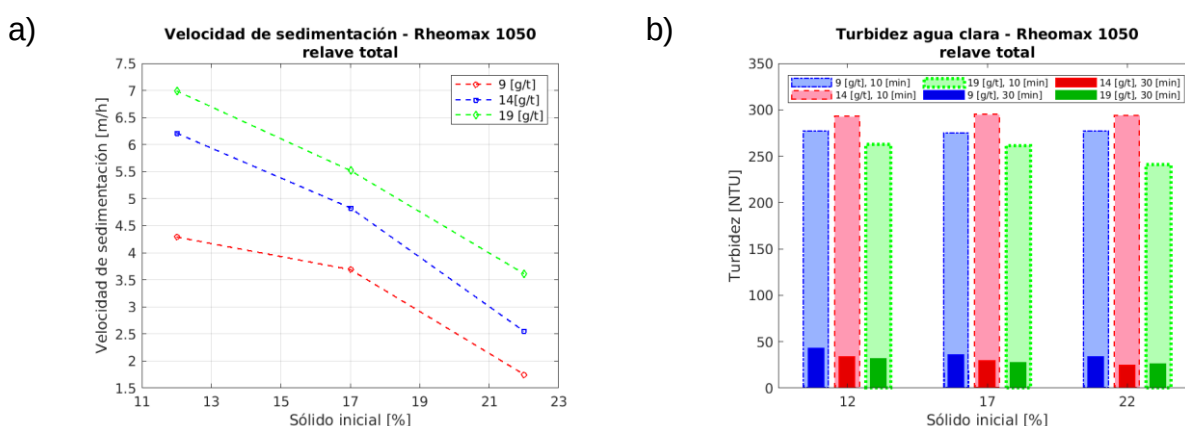


Figura 6.3. Resultados pruebas de sedimentación relave final; floculante: Rheomax 1050; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.

En la Figura 6.4 a), se encuentran los resultados de velocidad de sedimentación de relave total utilizando el floculante Magnafloc 338, los cuales varían entre $0,9 \pm 0,05$ [m/h] y $2,7 \pm 0,05$ [m/h]. De la Figura 6.4, se desprende que hay una disminución de la velocidad de sedimentación con el aumento del sólido inicial, sin embargo, esta disminución es más acelerada entre 12% y 17% de sólidos, mientras que, sobre este valor, la disminución es más paulatina. Se observa que todas las curvas presentan prácticamente la misma tendencia y que el efecto de la dosificación de floculantes es mínimo. En la Figura 6.4, se observa que las mediciones de turbidez a los 10 [min], son entre $400 \pm 20,88$ [NTU] y $550 \pm 20,88$ [NTU], variando con la dosificación de floculante y en menor medida con el aumento del sólido inicial. Las mediciones obtenidas al finalizar la prueba son todas bajo 50 [NTU], con una leve disminución en la medida que aumente la dosis de floculante.

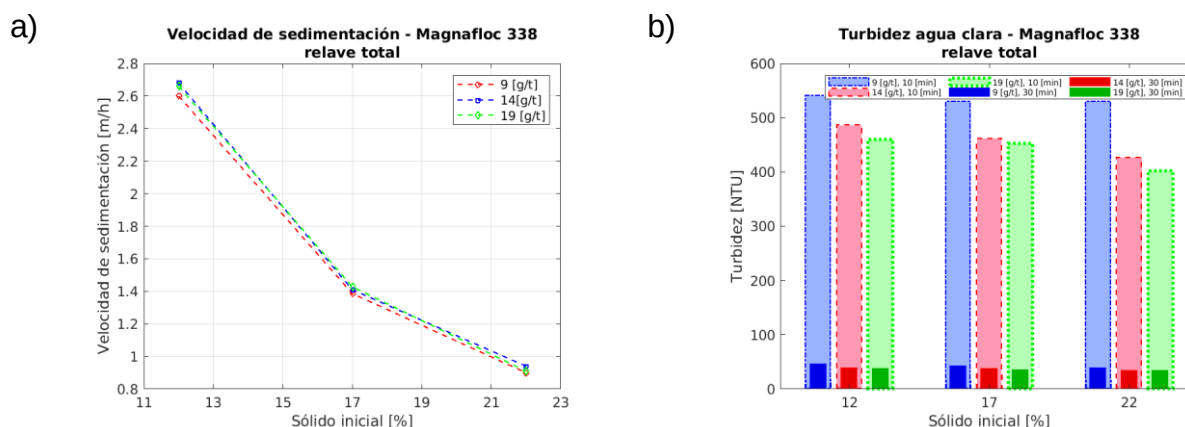


Figura 6.4. Resultados pruebas de sedimentación relave final; floculante: Magnafloc 338; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.

En la Figura 6.5, se presentan los resultados obtenidos de velocidad de sedimentación de relave total para las pruebas realizadas con floculante Magnafloc 333, los cuales varían entre $1 \pm 0,05$ [m/h] y $3,1 \pm 0,05$ [m/h]. De forma análoga a los resultados obtenidos con el Magnafloc 338, la disminución de velocidad con el aumento de sólido inicial ocurre de forma más acelerada entre 12 y 17% de sólidos y esta disminución es en menor medida sobre 17% de sólidos. La dosificación de floculante no tiene gran influencia sobre la velocidad de sedimentación. En la Figura 6.5 b) se observa que las mediciones de turbidez al agua clara tomada a los 10 [min], varía entre $480 \pm 18,65$ [NTU] y $550 \pm 18,65$ [NTU], valor que aumenta con la disminución del floculante y con la disminución del porcentaje de sólidos inicial. Es evidente la disminución de la turbidez con el paso del tiempo, obteniendo valores bajo los $50 \pm 18,65$ [NTU], para la muestra tomada a los 30 [min]. Para estas muestras, el efecto del porcentaje de sólidos es prácticamente nulo y el efecto de la dosificación es en menor medida que en la muestra tomada a los 10 [min].

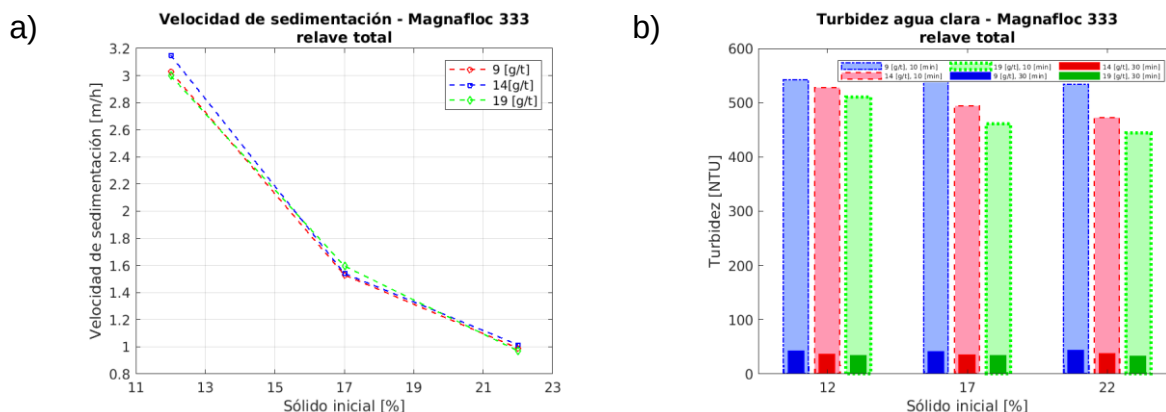


Figura 6.5. Resultados pruebas de sedimentación relave final; floculante: Magnafloc 333; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.

6.2.2 Resultados experimentos concentrado final

En la Figura 6.6 a), se muestran los resultados obtenidos de velocidad de sedimentación para las pruebas de concentrado final utilizando el floculante Rheomax 1050, los cuales varían entre $3,5 \pm 0,08$ [m/h] y $6,4 \pm 0,08$ [m/h]. Velocidad de sedimentación aumenta de forma no lineal conforme aumenta el porcentaje de sólidos inicial, siendo menos abrupta la disminución entre 15 y 20%, mientras que sobre 20% de sólidos tiene una mayor influencia sobre la velocidad de sedimentación. Al observar las líneas de tendencias, siendo cada una de ellas con distintas dosificaciones, la diferencia entre ellas es muy mínima, donde al 20% de sólidos es más notoria, pero no es una diferencia mayor a 0,2 puntos. Los valores de turbidez obtenidos mostrados en la Figura 6.6 b), muestran que, para cada sólido estudiado, la turbidez obtenida disminuye con el aumento de dosificación de floculante, en mayor medida para la muestra tomada a los 10 [min] y en menor proporción en la muestra tomada al finalizar la prueba. Se observa que para la muestra de 10 [min], con el aumento del porcentaje de sólidos no se tiene un efecto lineal en la turbidez, teniendo un peak en el sólido intermedio estudiado (20%), obteniendo los menores valores de turbidez con un 15% de sólidos inicial. Lo descrito anteriormente no se repite en la muestra tomada a los 30 [min], en el cual se tiene una disminución en la turbidez con el aumento del porcentaje de sólidos. Los valores registrados de turbidez

para la primera toma de muestras, varía entre $55 \pm 5,34$ [NTU] y $150 \pm 5,34$ [NTU], mientras que en la muestra final el rango disminuye, teniendo valores entre $20 \pm 5,34$ [NTU] y $45 \pm 5,34$ [NTU] aproximadamente.

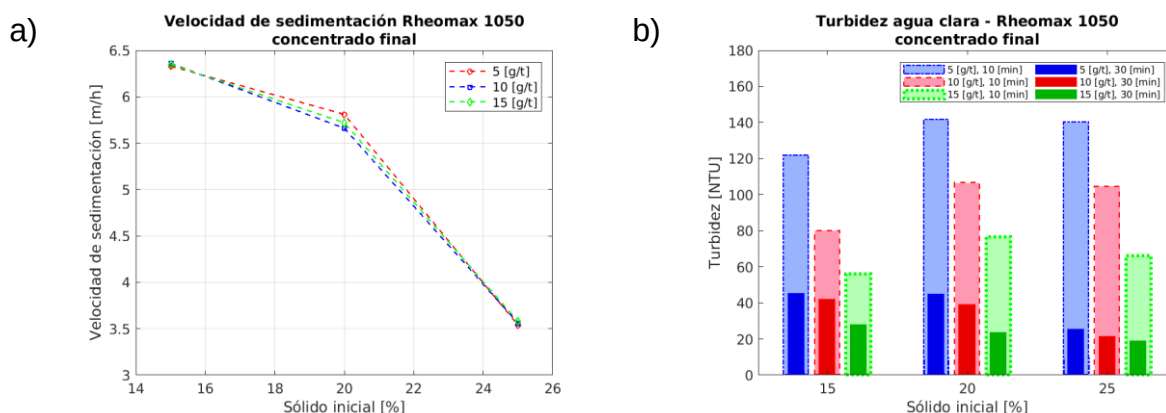


Figura 6.6. Resultados pruebas de sedimentación concentrado final; floculante: Rheomax 1050; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.

En la Figura 6.7 a) se tienen los resultados de velocidad de sedimentación de concentrado final utilizando floculante Magnafloc 338, los cuales varían entre $3,5 \pm 0,14$ [m/h] y $6,4 \pm 0,14$ [m/h]. Se observa que, con el aumento del porcentaje de sólido inicial, la velocidad de sedimentación disminuye, siendo la caída más abrupta sobre 20% de sólidos, sin embargo, si se compara con la curva obtenida para el floculante Rheomax 1050, en este caso tenemos una caída que se acerca más a la linealidad a excepción de la curva que se tiene para una dosificación de 5 [g/t]. No se observa una gran variación en la velocidad de sedimentación con la modificación de la dosis de floculante, a excepción de las pruebas realizadas con una dosis de 5 [g/t], el cual presenta un peak en la prueba de 20% de sólidos, superando las realizadas con las demás dosificaciones. Sin embargo, observando las tendencias en los extremos (15% y 25% de sólido), podría considerarse una medición anómala. En la Figura 6.7 b), se encuentran los resultados obtenidos para las mediciones de turbidez, los cuales varían entre $90 \pm 11,12$ [NTU] y $140 \pm 11,12$ [NTU] para la muestra tomada a los 10 [min] y entre $30 \pm 11,12$ [NTU] y $60 \pm 11,12$ [NTU] para las muestras finales. La turbidez obtenida disminuye con la dosificación

de floculante y con el aumento del sólido inicial, sin embargo, el efecto de la dosificación disminuye a medida que aumenta el sólido, pues se observa menor diferencia entre las barras.

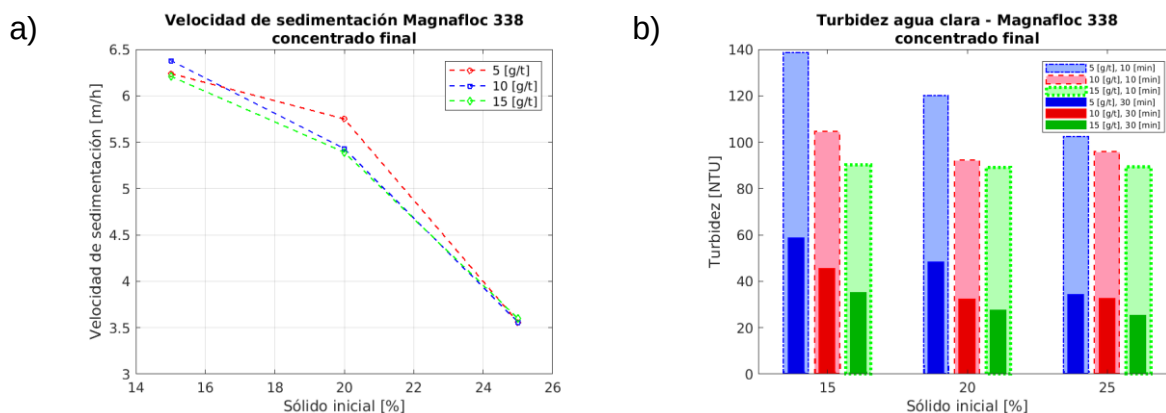


Figura 6.7. Resultados pruebas de sedimentación concentrado final; floculante: Magnafloc 338; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.

En la Figura 6.8 a), se muestran los resultados de velocidad de sedimentación de concentrado final para las pruebas con floculante Magnafloc 333, los que varían entre $3,4 \pm 0,06$ [m/h] y $6,4 \pm 0,06$ [m/h]. La velocidad de sedimentación disminuye con el aumento del sólido inicial. La disminución ocurre en mayor medida con un sólido inicial sobre 20%. Para todos los sólidos estudiados, la dosificación de floculante genera una variación en el resultado, pero este rango de variación es menor a 0,4 puntos. En la Figura 6.8 b) donde se registran las mediciones de turbidez, para la muestra tomada a los 10 [min], los valores varían entre $70 \pm 3,73$ [NTU] y $110 \pm 3,73$ [NTU]. La turbidez disminuye con el aumento de la dosis de floculante y con el aumento del porcentaje de sólidos, sin embargo, en las mediciones de 20 y 25% no se observa diferencia en la turbidez medida. Para las mediciones tomadas al final de la prueba, los valores obtenidos varían entre $30 \pm 3,73$ [NTU] y $45 \pm 3,73$ [NTU], no observando gran diferencia para los 3 porcentajes de sólidos estudiados.

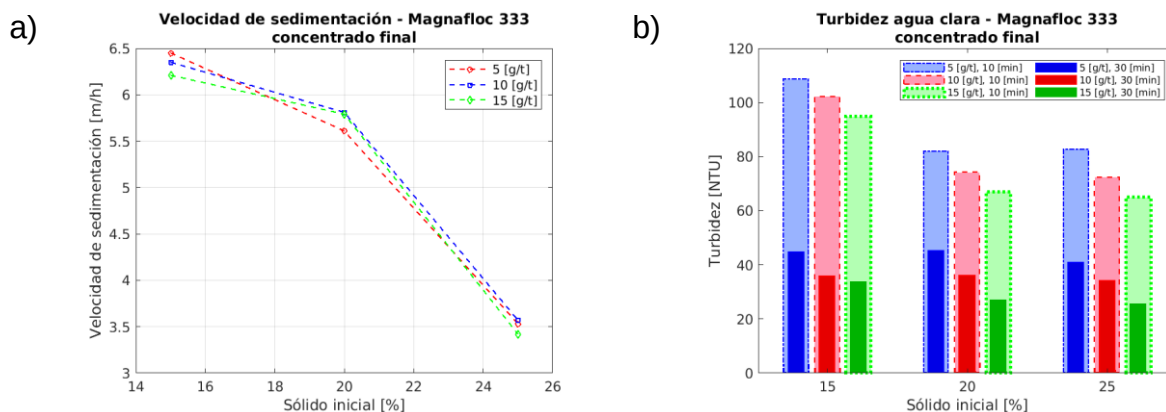


Figura 6.8. Resultados pruebas de sedimentación concentrado final; floculante: Magnafloc 333; a) Velocidad de sedimentación, b) Turbidez agua clara.

6.3 Etapa 3: Evaluación variación pH

La tercera etapa de experimentos es para evaluar la robustez de los floculantes estudiados ante variaciones de pH a escala de laboratorio para sedimentaciones de relaves y concentrados.

De forma análoga a la etapa anterior, los registros de altura de interfase, velocidad de sedimentación y turbidez, tanto en original como en duplicado, de cada prueba realizada, se encuentran en el Anexo E, desde la Tabla E. 9 hasta la Tabla E. 16.

6.3.1 Resultados experimentos relave total

En la Figura 6.9, se presentan las curvas de sedimentación para las pruebas con parámetros estándar de relave total, en función del pH para el floculante Floerger 913sh. Se observa que con el aumento del pH (hacia pH más básico), se incrementa la velocidad de sedimentación, pues las curvas presentan mayores pendientes en la zona inicial. Sin embargo, se observa que para pH sobre 8, la variación no es en gran medida, mientras que bajo pH 6 la velocidad de sedimentación disminuye abruptamente. La curva de sedimentación roja, que corresponde a la sedimentación sin modificación de pH y sin adición de floculante (prueba blanco), nos muestra que, si el efecto sobre la velocidad de

sedimentación del pH sigue la tendencia, aproximadamente a pH 6, el floculante pierde su efecto, perjudicando incluso la sedimentación natural de la pulpa de relave total.

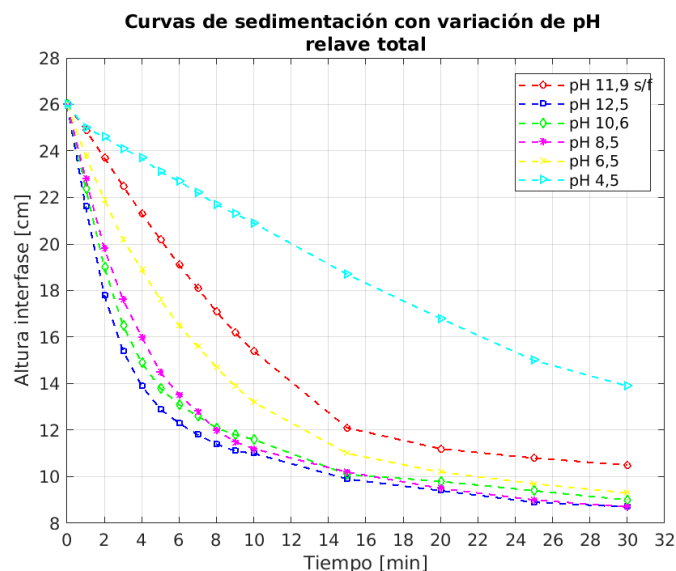


Figura 6.9. Curvas de sedimentación relave total con variación de pH; Sólido inicial: 17%, dosis floculante: 9 [g/t], floculante: Floerger 913sh, modificador pH: agua ARD, s/f = sin floculante.

En la Figura 6.10 a) y b) se observa que la disminución del pH tiene un efecto negativo en la turbidez obtenida, tanto en la primera como en la segunda toma de muestras. Para ambos tiempos de toma de muestras, se cumple que para pH sobre 10,5, el efecto sobre la turbidez obtenida es muy leve en comparación con el resto de la curva. El marcador rojo indica la turbidez obtenida para la prueba blanco y se observa que para valores pH menores a 8,5, la turbidez obtenida es mayor que sin la dosificación de floculante.

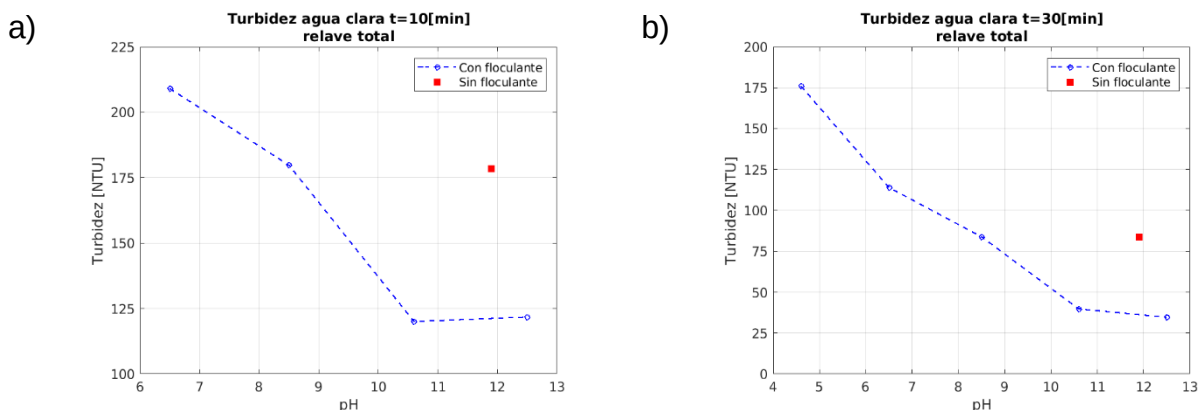


Figura 6.10. Turbidez agua clara en función del pH relave total; Sólido inicial 17%, dosis floculante: 14 [g/t], floculante: Floerger 913sh, modificador pH: agua ARD; a) t=10[min], b) t=30[min]

En la Figura 6.11 se recopilan los resultados obtenidos de la velocidad de sedimentación en función del pH para todos los floculantes estudiados y en la Figura 6.12 se presenta el efecto en la turbidez del agua recuperada para la muestra tomada a los 30 [min]. En concordancia a los resultados de la segunda etapa de experimentos, el floculante Rheomax 1050, presenta una velocidad de sedimentación superior a la de los demás floculantes estudiados. En cuanto a la sensibilidad ante variaciones del pH, se observa que el floculante Magnafloc 333 es el menos sensible, teniendo una curva de tendencia muy cercana a la linealidad, luego sigue el Rheomax 1050, seguido del Magnafloc 338 y en último lugar el Floerger 913sh. En la Figura 6.12, se observa que, a pH más ácido, la turbidez obtenida es mayor, siendo el floculante Magnafloc 338 el que tienen mediciones más altas, mientras aumenta el pH, el rango en que se obtienen las mediciones va disminuyendo.

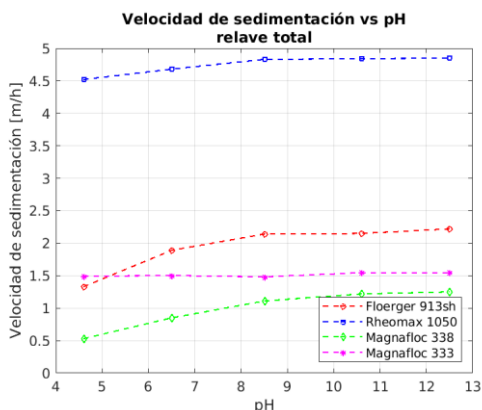


Figura 6.11. Velocidad de sedimentación en función del pH relave total; Sólido inicial 17%, dosis floculante 14 [g/t], floculante: Floerger 913sh, Rheomax 1050, Magnafloc 338, Magnafloc 333, modificador pH: agua ARD.

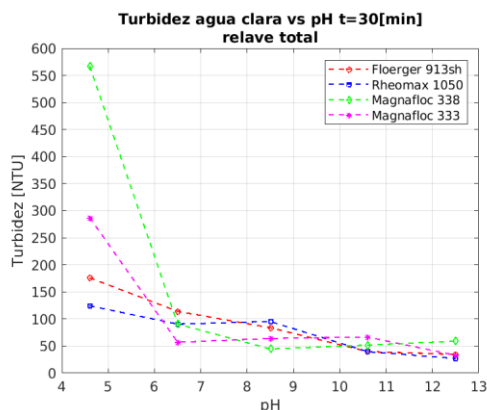


Figura 6.12. Turbidez agua clara es función del pH relave total t=30[min]; Sólido inicial 17%, dosis floculante 14 [g/t], floculante: Floerger 913sh, Rheomax 1050, Magnafloc 338, Magnafloc 333, modificador pH: agua ARD.

6.3.2. Resultados experimentos concentrado final.

En la Figura 6.13, se presentan las curvas de sedimentación para las pruebas con parámetros estándar de concentrado final, en función del pH para el floculante Floerger 913sh y en la Figura 6.14, se recopilan las mediciones de turbidez tomadas en las pruebas. Para los 3 valores de pH estudiados, no se observa diferencia en las curvas de sedimentación, siendo la única curva que destaca, la que se realiza sin dosificación de floculante.

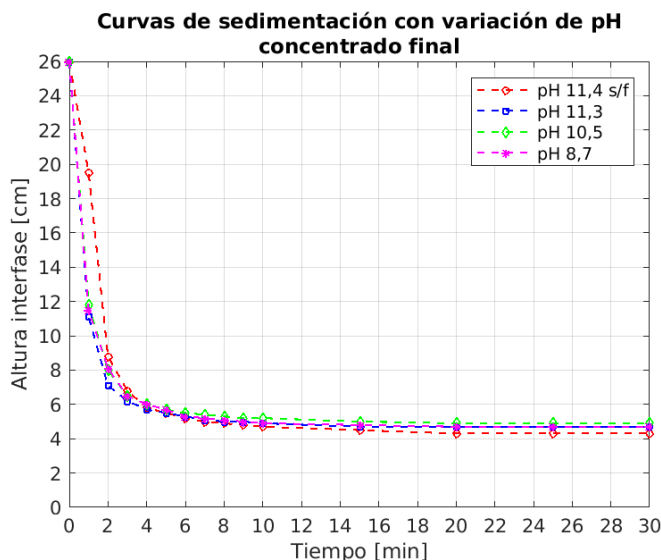


Figura 6.13. Curvas de sedimentación concentrado final con variación de pH; Sólido inicial: 20%, dosis floculante: 10 [g/t], floculante: Floerger 913sh, modificador pH: agua haulage, s/f = sin floculante.

En la Figura 6.14 a) y b) se muestra la turbidez obtenida para las pruebas anteriores a 10 [min] y 30 [min] respectivamente. Se observa una disminución de la turbidez con el aumento de pH, para el rango estudiado. El marcador rojo muestra la turbidez para la prueba blanco y se determina que, para el rango de pH estudiado, en todas las pruebas se obtienen mejores resultados.

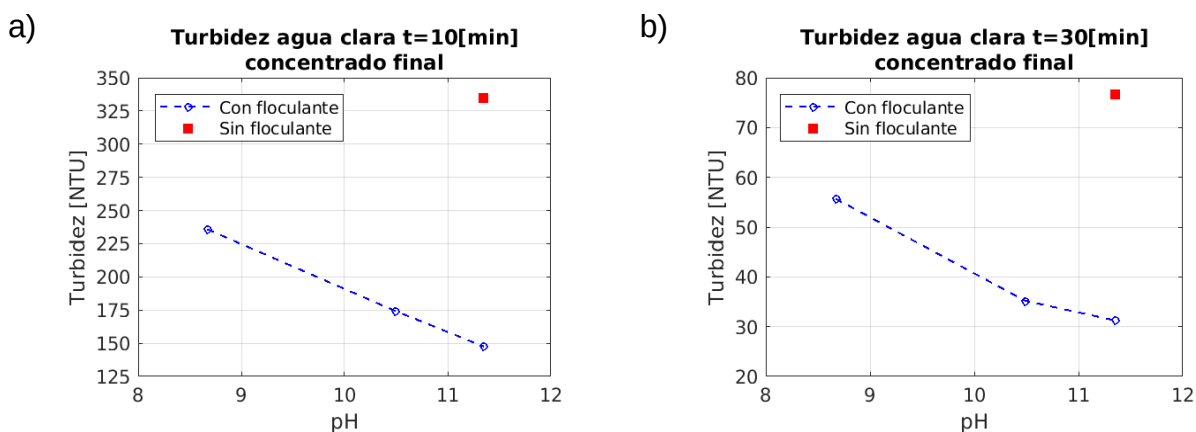


Figura 6.14. Turbidez agua clara en función del pH concentrado final; Sólido inicial 20%, dosis floculante: 10 [g/t], floculante: Floerger 913sh, modificador pH: agua haulage; a) t=10 [min], b) t=30 [min]

En la Figura 6.15 se contrastan los resultados de la velocidad de sedimentación en función del pH para todos los floculantes estudiados y se observa en concordancia con los resultados obtenidos en la segunda etapa, que para todos los floculantes se obtienen velocidades de sedimentación similares, pues sólo varían en un rango de 0,2 puntos. En el caso del floculante Magnafloc 333 se observa un. Aumento en la velocidad de sedimentación relativamente constante con el aumento de pH, mientras que para el resto de los floculantes se observa un peak a pH 11,5 y luego disminuye a valores cercanos a los obtenidos bajo ese pH. En la Figura 6.16 se presenta el efecto del pH en la turbidez del agua clara, observando. Una disminución de esta con el aumento de pH. El floculante Rheomax 1050 es el que obtiene resultados con menos variaciones ante el cambio de pH, mientras que el Magnafloc 333 es el que presente una mayor variación, al obtener una turbidez muy superior a la obtenida por los demás floculantes a pH 8,5.

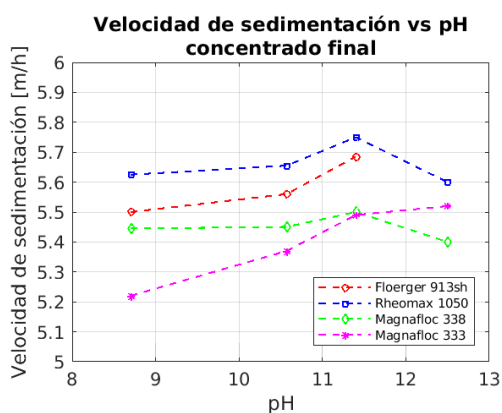


Figura 6.15. Velocidad de sedimentación en función del pH concentrado final; Sólido inicial 20%, dosis floculante 10 [g/t], floculante: Floerger 913sh, Rheomax 1050, Magnafloc 338, Magnafloc 333, modificador pH: agua haulage.

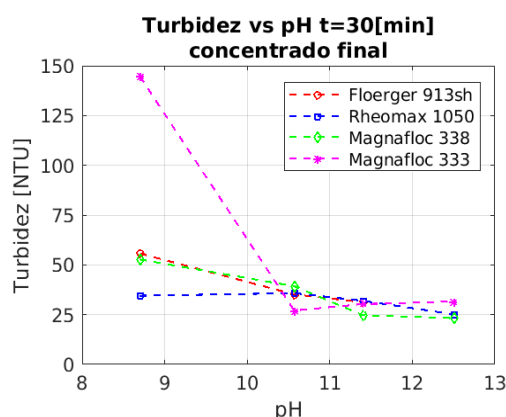


Figura 6.16. Velocidad de sedimentación en función del pH concentrado final; Sólido inicial 20%, dosis floculante 10 [g/t], floculante: Floerger 913sh, Rheomax 1050, Magnafloc 338, Magnafloc 333, modificador pH: agua haulage.

6.4 Recuperación de agua desde el proceso de sedimentación

Para facilitar la comparación de los datos obtenidos de la recuperación de aguas, en la Figura 6.17 se compilan los resultados obtenidos para todos los experimentos realizados, tanto de concentrado final como relave total. Se observa que la recuperación de agua para el concentrado final es sobre el 80%, alcanzando aproximadamente una máxima recuperación de 93% para el menor porcentaje de sólidos ensayado. Para el relave final se tiene un rango mayor de recuperación, que va desde 59% a 86% de recuperación de agua. La mayor diferencia se genera por la variación de pH y en menor medida por la dosificación de floculante y de todos los tipos de floculantes, el que destaca es el floculante Rheomax 1050.

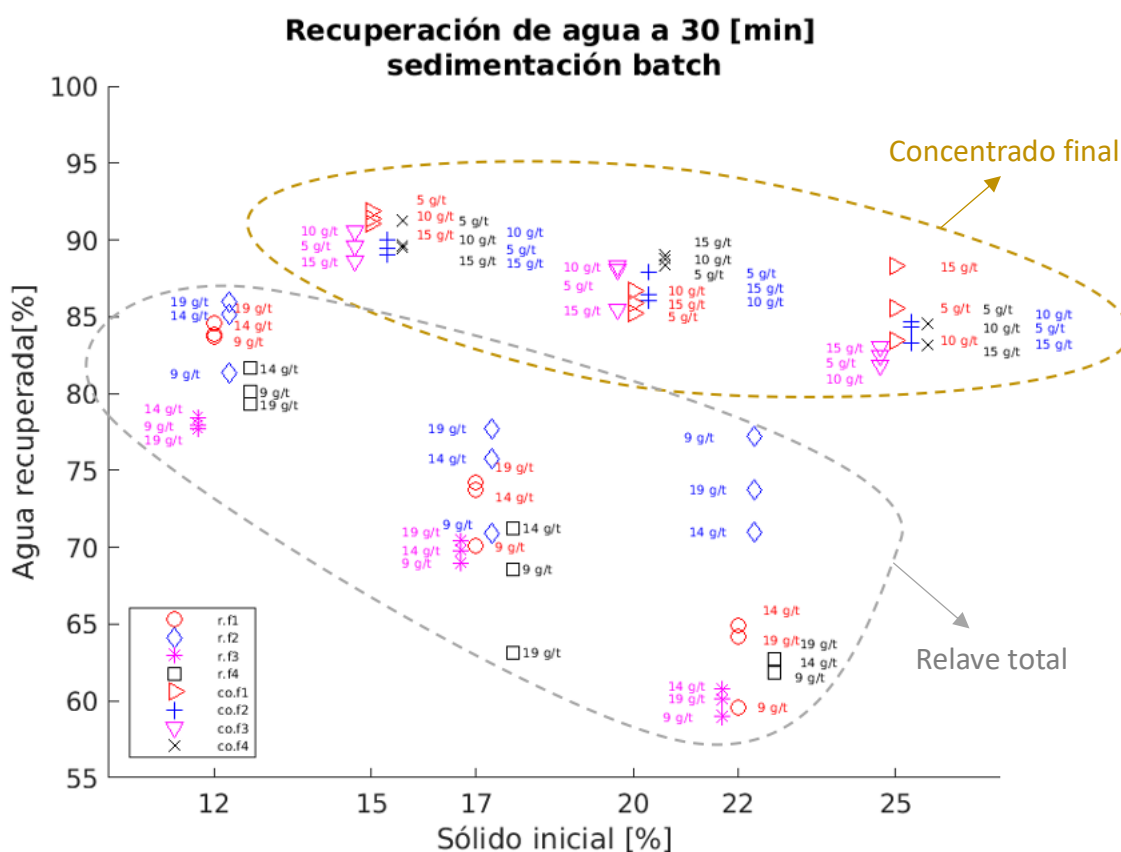


Figura 6.17. Recuperación de agua para todas las condiciones a sedimentaciones de concentrado final (co) y relave total (r); f1: Floberger 913sh, f2: Rheomax 1050, f3: Magnafloc 338, f4: Magnafloc 333.

CAPITULO 7 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN TÉCNICA DE RESULTADOS

7.1 Etapa 1: Desarrollo de Línea Base

7.1.1 Línea base: Sedimentación de relave total

Para analizar los resultados obtenidos en la primera etapa de experimentos, se realiza un test de ANOVA. En la Tabla 7.1, se presenta el ANOVA para la respuesta velocidad de sedimentación y se busca ver el efecto de los factores dosis de floculante, sólido inicial y la interacción de ellos, sobre la respuesta. Para determinar si los factores tienen influencia en la respuesta, se revisa el valor P obtenido, ya que, si este es menor a 0,05, implica que el factor si tiene efecto sobre la respuesta y en caso contrario de ser mayor a 0,05 no tienen influencia. Como se observa en la Tabla 7.1, que el valor P del factor dosis de floculante, sólido inicial y la interacción de las variables, son menores a 0,05, quiere decir que todos los factores son significativos para la respuesta. De los resultados del test ANOVA, se desprende la gráfica de contribución de los factores mostrada en la Figura 7.1, donde se observa claramente que el factor que mayor influencia tiene sobre la respuesta es el porcentaje de sólidos inicial, con un 97,6% aproximadamente.

Tabla 7.1 ANOVA respuesta velocidad de sedimentación; floculante Floerger 913sh relave total.

Fuente Variabilidad	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	valor P
A: Sólido inicial	14,055	2	7,027	2524,80	0,00000
B: Dosificación	0,211	2	0,105	37,85	0,0000416
AB: Interacción	0,174	4	0,044	15,63	0,004394
Error	0,025	9	0,003		
Total	14,500	17			

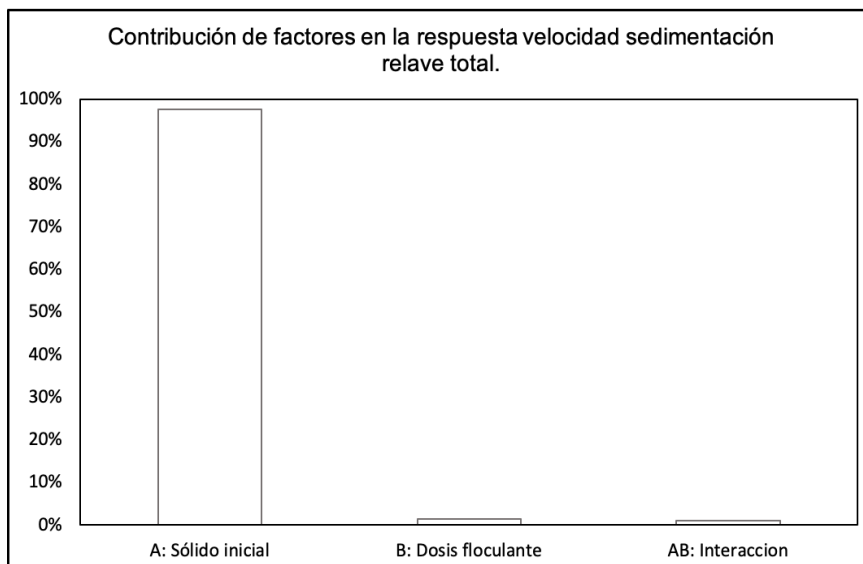


Figura 7.1. Contribución porcentual de los factores sólido inicial y dosis de floculante sobre respuesta velocidad de sedimentación [m/h]; floculante Floerger 913-sh, pulpa relave total.

En la Figura 7.2, se observa, en concordancia con lo anteriormente planteado, que la velocidad de sedimentación es bastante robusta ante cambios en la dosificación de floculante Floerger 913sh, para el rango de estudio, siendo más sensible a la variación de porcentaje de sólido inicial. Para la curva de tendencias con el mayor porcentaje de sólidos estudiado (22 %), se observa un aumento en la significancia de la dosificación de floculante. La gráfica de la Figura 7.2 es muy relevante pues si sólo nos fijamos en la velocidad de sedimentación, a el sólido inicial estándar, actualmente se estaría sobre dosificando, ya que si se disminuye la dosis de 14 [g/t] a 9 [g/t], la velocidad de sedimentación sólo disminuye en 2 puntos porcentuales.

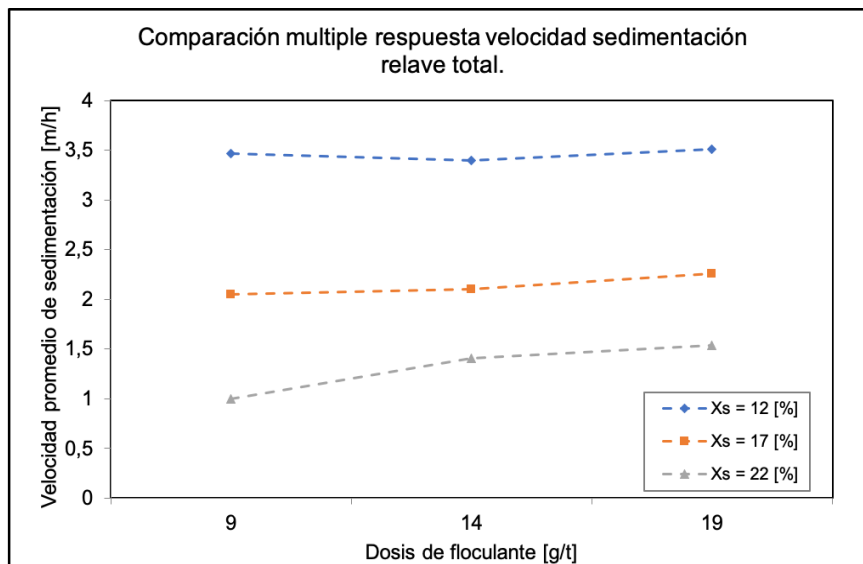


Figura 7.2. Comparación velocidad de sedimentación relave total; floculante Floerger 913sh; X_s = sólido inicial pulpa.

Los resultados obtenidos en cuanto al efecto de la concentración de sólidos inicial, es según lo esperado a partir de la revisión de literatura, pues la teoría (Ros, 2014) indica que el aumento de la concentración de sólidos inicial, dificulta la sedimentación o caída de las partículas, lo que se ha demostrado en estudios previos (Fawell et al., 2009), (Cruz & Martínez-rojas, 2016). Con estos resultados, se desprende que es ideal trabajar con la mayor dilución de la pulpa, tanto como el equipo de espesamiento lo permita.

En cuanto al efecto de la dosis de floculante, a partir de trabajos previos, (Gregory, 1988), se esperaba un aumento de la velocidad de sedimentación obtenida, sin embargo, de acuerdo a lo obtenido experimentalmente, esto se cumple sólo para los experimentos realizados con un mayor sólido inicial. Por lo tanto, de lo obtenido en el laboratorio, indica que, a mayor contenido de sólido inicial, aumenta la dosis óptima de floculación, lo que es coherente, pues con un mayor contenido de sólidos, se deben generar una mayor cantidad de flóculos y a su vez, como existe menor distancia entre las partículas, se dificulta la acción del floculante.

En la Tabla 7.2 se presenta el test de ANOVA realizado para la respuesta turbidez de agua clara, de donde, realizando el mismo tratamiento anterior, se concluye que los factores sólido inicial, dosis de floculante y la interacción entre ellas, son factores influyentes sobre la respuesta. En la Figura 7.3 se presenta el porcentaje de contribución de cada factor sobre la variabilidad de la respuesta y a diferencia del caso anterior, se tienen una contribución con mayor distribución entre los factores, siendo el más influyente, la dosificación de floculante.

Tabla 7.2. ANOVA respuesta turbidez agua clara; floculante Floerger 913sh relave total.

Fuente Variabilidad	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	valor P
A: Sólido inicial	3993,70	2	1996,85	39,40	0,00004
B: Dosificación	10795,19	2	5397,60	106,49	0,00000
AB: Interacción	3653,67	4	913,42	18,02	0,00025
Error	456,18	9	50,69		
Total	18898,74	17			

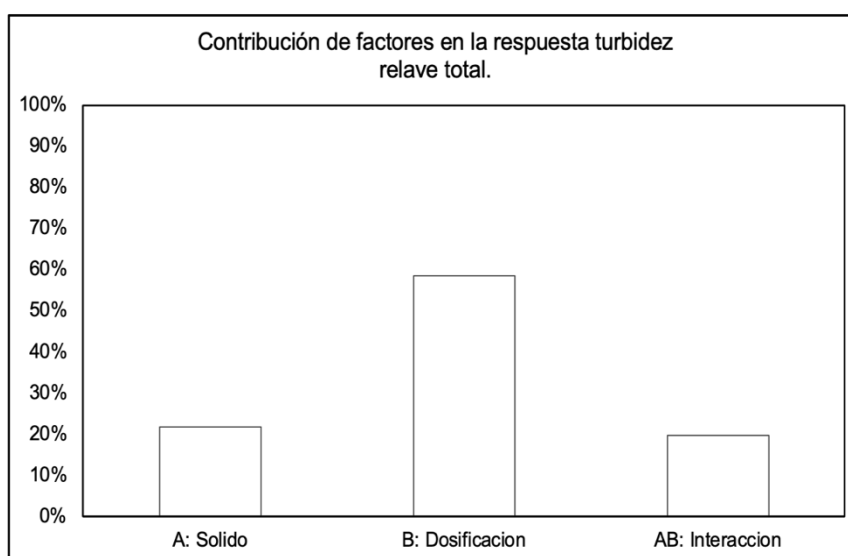


Figura 7.3. Contribución porcentual de los factores sólido inicial y dosis de floculante sobre respuesta turbidez agua clara $t=30[\text{min}]$; floculante Floerger 913sh, pulpa relave total.

Con la gráfica mostrada en la Figura 7.4, se determina que tanto para un sólido inicial de 12% y 22% la turbidez obtenida no tiene mayor variabilidad hasta una dosificación de 14 [g/t], mientras que la condición de 17% es la que tiene una mayor sensibilidad ante la variación de dosificación. Al juntar estos resultados con los obtenidos para la velocidad de sedimentación, en contradicción con lo antes mencionado, si bajamos la dosificación de floculante, se aumentará la turbidez del agua clara en un 55% aproximadamente, superando el límite de 100 [NTU] recomendando para recircular el agua al proceso (França et al., 2017).

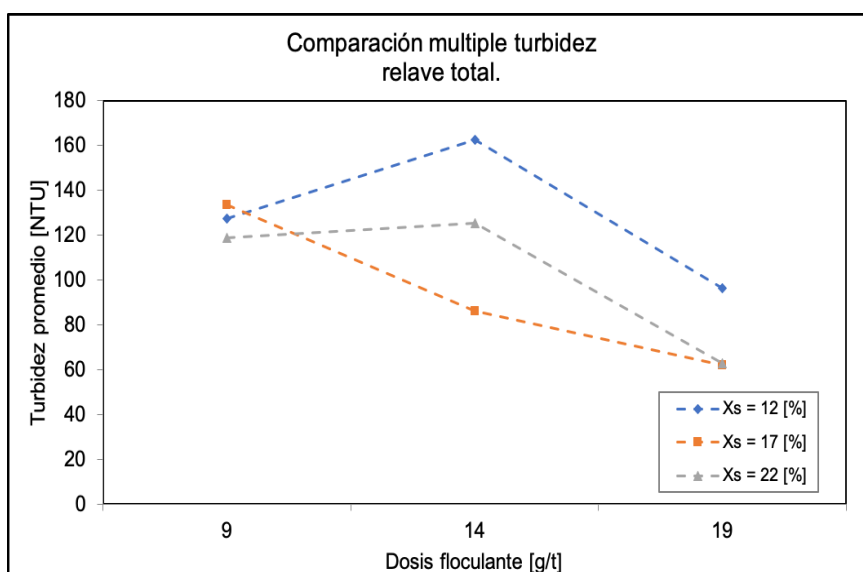


Figura 7.4. Comparación turbidez agua clara $t=30[\text{min}]$ relave total; floculante Floerger 913sh; X_s = sólido inicial pulpa.

Experiencias previas indican que con una mayor dosificación de floculante, se espera obtener una disminución en la turbidez obtenida en el agua recuperada (Vera, 2019), lo que se observa en los experimentos realizados. Lo anteriormente descrito ocurre ya que una mayor dosis de floculante aumenta la probabilidad de captación de las partículas de menor tamaño, siempre y cuando nos encontremos sin superar la dosis óptima.

7.1.1.1 MODELO PARA RELAVE TOTAL

A partir de los datos obtenidos experimentalmente del diseño factorial, con la herramienta estadística StatGraphics, se desarrolla un modelo para poder predecir la velocidad de sedimentación y el porcentaje de sólido final con diversas combinaciones de dosificación de floculante y porcentaje de sólido inicial de la pulpa a sedimentar.

El modelo obtenido para la predicción de la velocidad de sedimentación para la pulpa relave total utilizando el floculante Floerger 913sh se muestra en la ecuación (28).

$$\begin{aligned} V_s = & 9,48 - 0,62 \cdot X_s - 0,05705 \cdot D_f + 0,00996667 \cdot X_s^2 \\ & + 0,00495 \cdot X_s \cdot D_f - 0,000033 \cdot D_f^2 \end{aligned} \quad (28)$$
$$R^2 = 0,99$$

- V_s : Velocidad de sedimentación [m/h]
- X_s : Sólido inicial pulpa [%]
- D_f : Dosificación floculante [g/t]

En la Figura 7.5, se muestran los resultados obtenidos experimentalmente, y los valores que entrega el modelo generado. Se observa, como lo indica el coeficiente de correlación, que el modelo tiene un buen ajuste a los datos obtenidos experimentalmente, dentro del rango de estudio. Se podría utilizar este modelo para predecir la velocidad de sedimentación que se obtiene al manipular las variables de sólido inicial de la pulpa y dosificación de floculante.

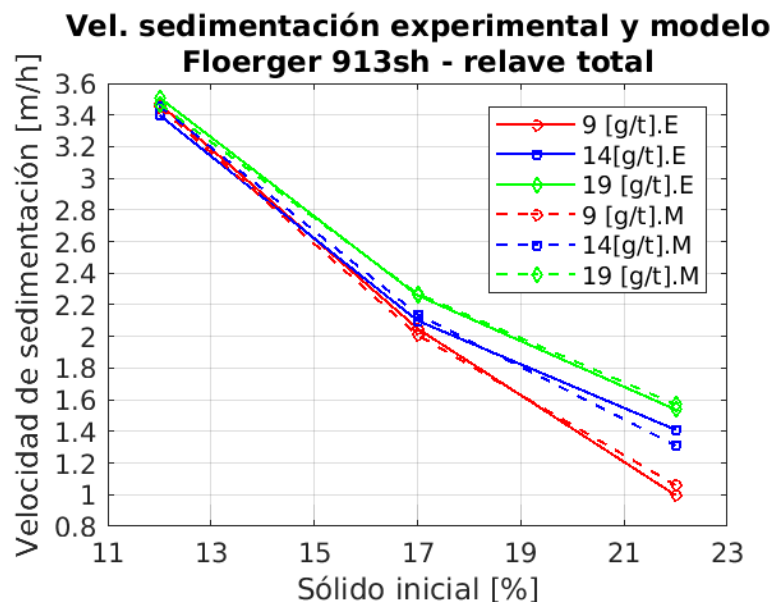


Figura 7.5. Velocidad de sedimentación relave total; Floculante: Floerger 913sh, E: datos experimentales, M: datos modelo.

De forma similar a lo anterior, se obtiene un modelo para la respuesta porcentaje de sólido final de la prueba de sedimentación, obteniendo el modelo presentado en la ecuación (29).

$$\begin{aligned}
 X_f = & 62,6419 - 2,86017 * X_S - 0,889983 * D_f + 0,0686667 * X_S^2 \\
 & + 0,01775 * X_S * D_f - 0,0331333 * D_f^2 \\
 R^2 = & 0,81
 \end{aligned}
 \tag{ 29}$$

- X_f : Sólido final de la prueba [%]

En la Figura 7.6, se presentan los datos experimentales y los valores del modelo, observando que si bien se observa que el modelo sigue la tendencia de los datos experimentales, estos tienen un menor ajuste que en el caso de la velocidad de sedimentación, lo que concuerda con un coeficiente de correlación menor de 0,81.

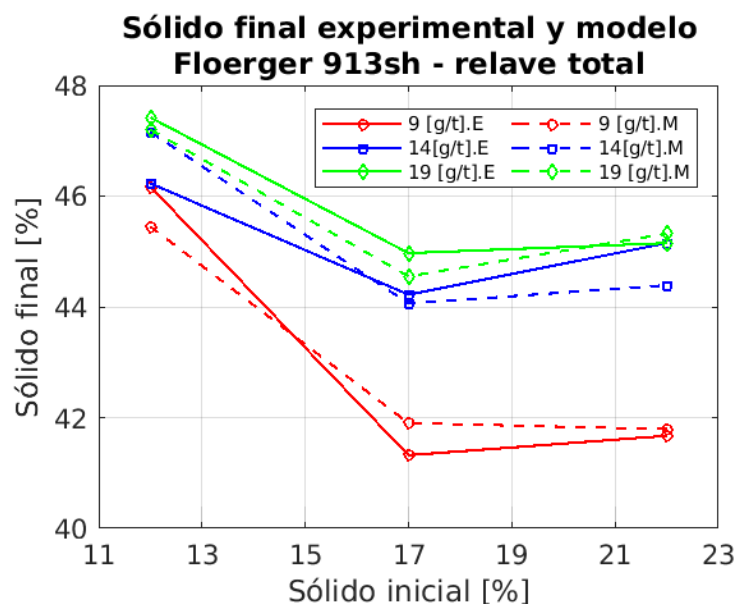


Figura 7.6. Sólido final pruebas sedimentación relave total; Flocculante: Floerger 913sh, E: datos experimentales, M: datos modelo.

7.1.2 Línea base: Sedimentación de concentrado final

El tratamiento de resultados y análisis anterior es análogo para los resultados de sedimentación de concentrado final. En la Tabla 7.3, se presenta el test ANOVA para el efecto de los factores sobre velocidad de sedimentación concentrado final. Revisando los valores P obtenidos, el valor P del factor sólido inicial, es el único que tienen un valor bajo 0,05, por lo tanto, es el más influyente sobre la variabilidad en la velocidad de sedimentación y como se representa en la Figura 7.7 la contribución de este factor es de un 98,1 %.

Tabla 7.3. ANOVA respuesta velocidad de sedimentación; flocculante Floerger 913sh concentrado final.

Fuente Variabilidad	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	valor P
A: Sólido inicial	23,7196	2	11,85980	1821,47	0,00000
B: Dosificación	0,0165	2	0,00827	1,27	0,32681
AB: Interacción	0,0763	4	0,01907	2,93	0,08328
Error	0,0586	9	0,00651		
Total	23,8710	17			

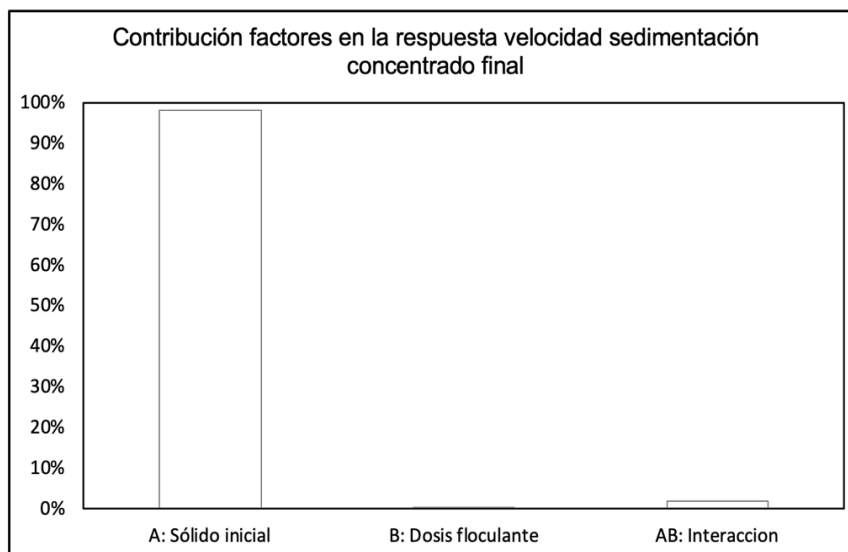


Figura 7.7. Contribución porcentual de los factores sólido inicial y dosis de floculante sobre respuesta velocidad de sedimentación [m/h]; floculante Floerger 913-sh, pulpa concentrado final.

En la Figura 7.8 se observa de forma gráfica la disminución de la velocidad de sedimentación con la variación del sólido inicial (mayor sensibilidad) y una mayor robustez ante la variación de dosificación de floculante, a excepción de los experimentos realizados con un 20% de sólidos inicial, ya que presenta una leve disminución de la velocidad con dosificaciones bajo 10 [g/t].

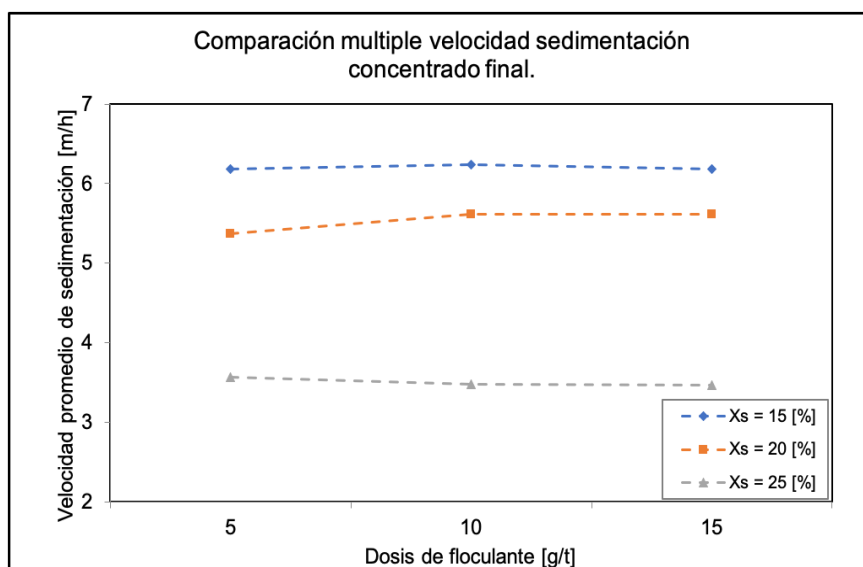


Figura 7.8. Comparación velocidad de sedimentación concentrado final; floculante Floerger 913sh; Xs = sólido inicial pulpa.

En la Tabla 7.4, se muestra el ANOVA para la respuesta turbidez de agua clara en la sedimentación de concentrados y a partir de los valores P, se determina que el sólido inicial, la dosis de floculante y la interacción de ellas, tienen efecto sobre la respuesta. De forma similar a los resultados obtenidos para el relave, la contribución es compartida por los factores, siendo el más relevante la dosis de floculante.

Tabla 7.4. ANOVA respuesta turbidez agua clara; floculante Floerger 913sh concentrado final.

Fuente Variabilidad	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	valor P
A: Sólido inicial	1208,46	2	604,23	15,69	0,00116
B: Dosificación	2629,24	2	1314,62	34,14	0,00006
AB: Interacción	1101,98	4	275,49	7,16	0,00709
Error	346,52	9	38,50		
Total	5286,19	17			

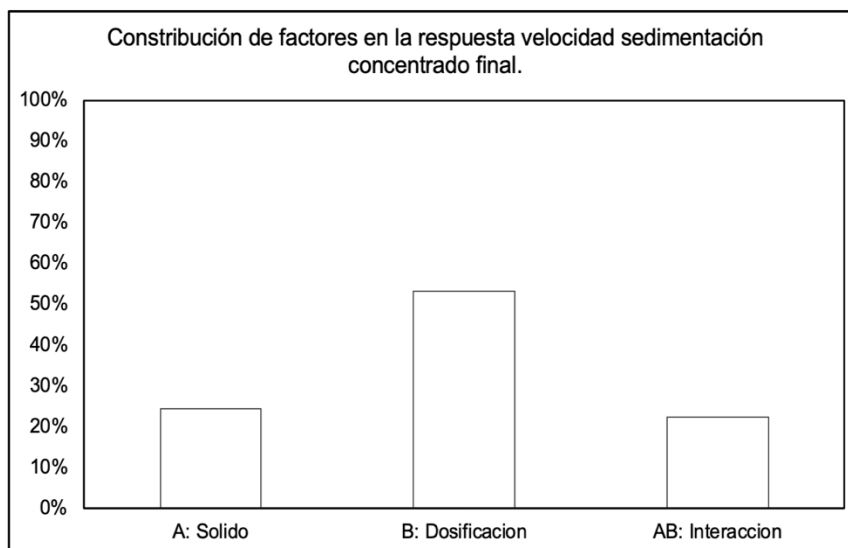


Figura 7.9. Contribución porcentual de los factores sólido inicial y dosis de floculante sobre respuesta turbidez agua clara $t=30[\text{min}]$; floculante Floerger 913-sh, pulpa concentrado final.

En la Figura 7.10. se muestra la comparación múltiple de los factores sobre la turbidez y se observa una linealidad de los resultados obtenidos, por lo que no se recomienda una disminución en la dosis del floculante, pues aumentaría la turbidez obtenida.

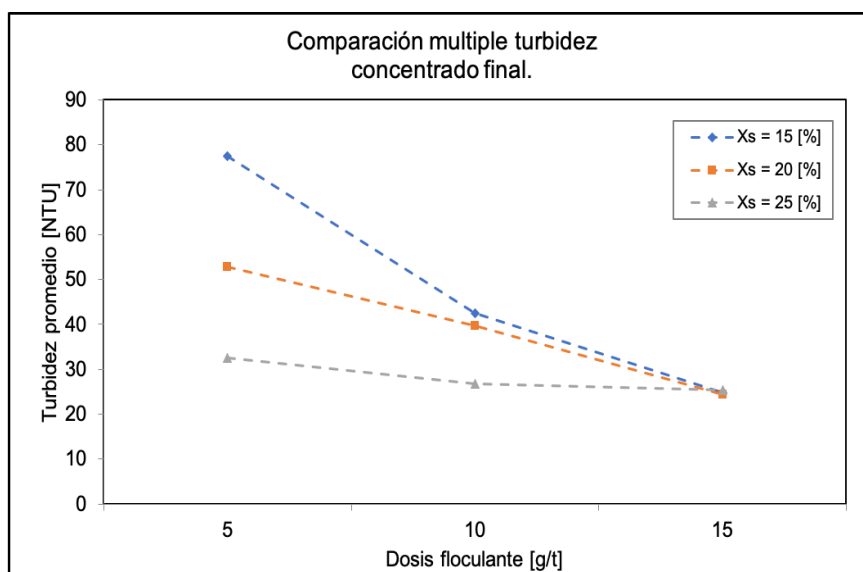


Figura 7.10. Comparación turbidez agua clara $t=30[\text{min}]$ concentrado final; floculante Floerger 913sh; X_s = sólido inicial pulpa.

7.1.2.1 MODELO CONCENTRADO FINAL

De forma análoga a la sección para el relave total, se obtienen los modelos para el concentrado final. El modelo de velocidad de sedimentación, se muestra en la ecuación (30).

$$V_s = -0,522 + 0,84256 * X_s + 0,06784 * D_f - 0,027536 * X_s^2 - 0,001056 * X_s * D_f - 0,002112 * D_f^2$$

$$R^2 = 0,99$$
(30)

En la Figura 7.11, se representan tanto los valores experimentales como del modelo. Se observa que el modelo tiene un muy buen ajuste a los datos experimentales, siendo una buena herramienta para poder predecir la velocidad de sedimentación para el concentrado final.

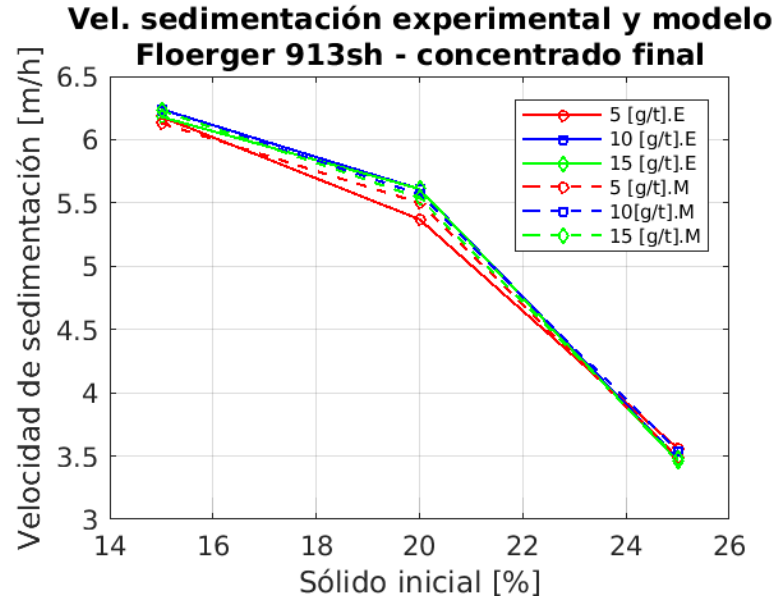


Figura 7.11. Velocidad de sedimentación concentrado final; Flocculante: Floerger 913sh, E: datos experimentales, M: datos modelo.

El modelo para el sólido final en una prueba de sedimentación de concentrado final, se muestra en la ecuación (31) y los resultados experimentales y del modelo, se muestran en la Figura 7.12, observando un menor ajuste del modelo a los datos experimental dentro del rango de estudio, concordando con el coeficiente de correlación obtenido que es sólo de 0,49. Es sabido que un coeficiente de correlación mientras más acercado a 1, quiere decir que el modelo se ajusta mejor a los datos experimentales, por lo tanto, con la data que se tiene no se podría asegurar que este modelo sea una buena herramienta predictiva para el sólido final de una prueba de sedimentación.

$$X_f = 119,058 - 5,50305 * X_S + 0,214513 * D_f + 0,143295 * X_S^2 + 0,026312 * X_S * D_f + 0,00934267 * D_f^2 \quad (31)$$

$$R^2 = 0,49$$

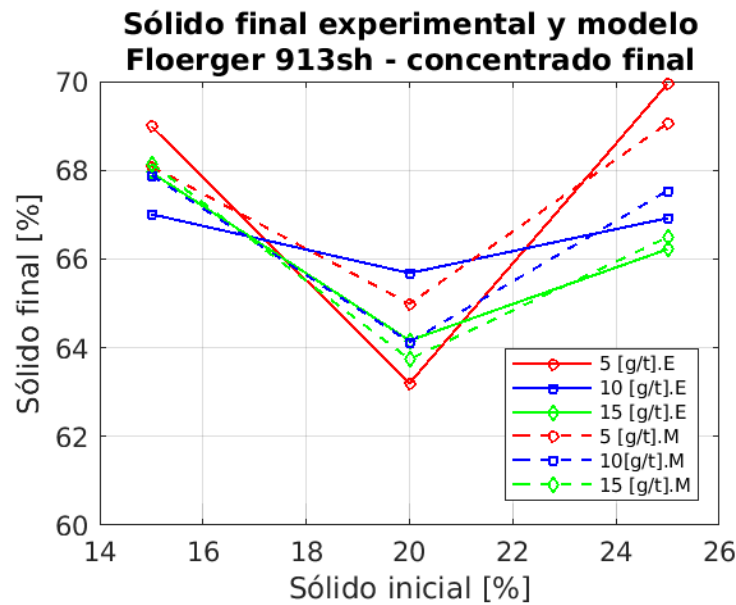


Figura 7.12. Sólido final pruebas sedimentación relave total; Flocculante: Floerger 913sh, E: datos experimentales, M: datos modelo.

7.2 Etapa 2: Impacto de cambio de floculante en la sedimentación

7.2.1 Sedimentación de relave total

A partir de los resultados obtenidos de la sedimentación de relave total con nuevos floculantes propuestos y mostrados en el capítulo anterior, se observa que para cada uno de ellos se cumple lo siguiente:

- El aumento de porcentaje de sólidos inicial de la pulpa es causante directo en la disminución de la velocidad de sedimentación y del aumento de la turbidez obtenida en el agua clara.
- El aumento de la dosificación de floculante genera una disminución en la turbidez medida en el agua clara, sin embargo, no se observa una linealidad en la disminución, puesto que entre 9 y 14 [g/t] el aumento es más significativo que con una dosificación superior.
- El floculante Rheomax 1050, es el único de los floculantes estudiados que presenta un efecto significativo del aumento de la dosis de floculante, sobre la velocidad de sedimentación.

Observando los resultados obtenidos de velocidad de sedimentación para el relave final, bajo condiciones estándares de dosis de floculante y sólido inicial, el único de los floculantes que presenta una mejora en la velocidad de sedimentación, es el floculante Rheomax 1050, aumentando en un 128% la velocidad de sedimentación y disminuyendo la turbidez en un 66% aproximadamente. Los resultados son coherentes con la teoría, puesto que, en un trabajo paralelo realizado en Andina, se ordenaron algunos de los floculantes de este estudio, respecto al peso molecular, sin conocer la magnitud con exactitud, mostrado en la Figura 7.13. conociendo este orden pesos moleculares de los floculantes, resulta concordante con los resultados obtenidos, ya que un floculante de mayor peso molecular se asocia con cadenas poliméricas más largas, que permiten generar una mayor configuración de colas y loops que serán absorbidos en una mayor cantidad de partículas, a su vez, se promueve la formación de flóculos de mayor tamaño

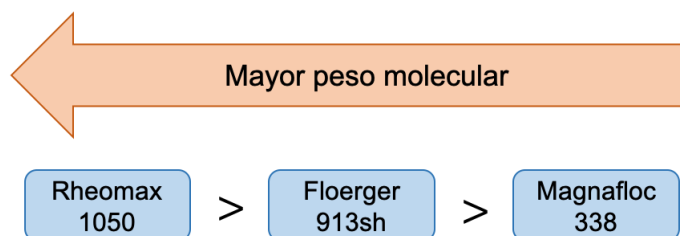


Figura 7.13. Orden de floculante según peso molecular (Avilés, 2020).

7.2.2 Sedimentación de concentrado final.

A partir del análisis de los datos obtenidos y mostrados en el capítulo anterior, para la sedimentación de relave final, se cumplen las mismas sentencias que para la sedimentación de relave en cuanto al efecto del porcentaje de sólidos y dosificación de floculante sobre la velocidad de sedimentación y turbidez del agua clara.

Observando los resultados obtenidos, para las condiciones operacional de dosis y sólido inicial, ninguno de los floculantes estudiados genera una gran diferencia respecto al floculante actual. El que tiene una mayor diferencia, es el floculante Magnafloc 333, sin embargo, la mejor es muy leve, aumentando sólo un 3,5 % la velocidad de sedimentación y disminuyendo un 10 % la turbidez obtenida.

En la sección anterior, para el relave total, si bien el floculante Rheomax 1050 genera grandes mejoras bajo condiciones operacionales, en una primera instancia se podría pensar que para el concentrado ocurriría lo mismo, pero los resultados indican lo contrario. Este fenómeno no es incoherente, ya que al tener el floculante Rheomax 1050 un mayor peso molecular, existe evidencia de trabajos que han demostrado que los polímeros con alto peso molecular, son más ineficientes con dispersiones estables de partículas finas (Hogg, 1999). Mientras el P80 del relave es del orden de los 200 [µm], el floculante es mucho más fino, con un P80 de aproximadamente 55 [µm]

7.3 Etapa 3: Impacto de variación en pH

7.3.1 Sedimentación de relave total.

Todos los floculantes tienen un rango de pH óptimo de operación, el que es importante conocer. De los experimentos realizados, se observa que el floculante Floerger 913sh, bajo pH 8,5 disminuye su efectividad para formar flóculos, lo que se traduce en una disminución notoria en la velocidad de sedimentación. El floculante Rheomax 1050, también comienza a disminuir su efectividad bajo pH 8,5, sin embargo, su efecto es en menor medida que el floculante planta, al igual que para el floculante Magnafloc 338. El floculante Magnafloc 333 destaca, ya que en el rango de pH estudiado no presenta grandes variaciones en la velocidad de sedimentación, por lo tanto, su límite inferior de operación se encuentra fuera del rango de pH estudiado.

De los resultados obtenidos en las mediciones de turbidez, se observa que en las mediciones realizadas a pH bajo 8,5 comienza a aumentar la turbidez obtenida en el agua clara. Esto ocurre debido a que cuando nos comenzamos a alejar del pH donde se tiene la carga superficial neta cero, comienza a disminuir la capacidad de formar flóculos. En las condiciones, predominan las fuerzas repulsivas entre las partículas, teniendo un mayor contenido de partículas sólidas de bajo diámetro que sedimentan más lento, siendo probable que se queden en el agua sobrenadante y por ende aumente la turbidez obtenida (Hogg, 1999).

7.3.2 Sedimentación de concentrado final.

Para las pruebas de sedimentación de concentrado final, se observa algo similar a lo ocurrido en la sedimentación de relaves, pero la variación de la medida de velocidad de sedimentación es en un menor rango. Sin embargo, se observa de forma más clara el punto de carga superficial neta cero, que es aproximadamente a pH 11,5. A pesar de la mínima variación, es probable que, si se amplía el rango de pH estudiado, la velocidad de sedimentación siga disminuyendo bajo y sobre pH 11,5.

El floculante Magnafloc presenta una menor sensibilidad ante la variación de pH, dentro del rango de estudio, sin embargo, la velocidad de sedimentación obtenida es levemente menor a la que entrega el floculante actual de la planta. Si se busca un floculante más estable a diversos pH, el Magnafloc 338, es la opción, sin embargo, si se desea trabajar a un pH menor que el del rango de estudio, se recomienda una evaluación previa a nivel de laboratorio. Es importante recalcar que este estudio sólo se realizó en un rango pH acotado, ya que el concentrado final viene directamente desde el proceso de flotación, donde no se debería tener un pH menor a 10,5 aproximadamente y actualmente según la información disponible, no existe un flujo de agua ácida al espesamiento que genere una disminución significativa en el pH del sistema.

El efecto que se genera en la turbidez es de forma análoga a lo planteado para el relave y cumple con el mismo análisis.

Es importante destacar que la medición de turbidez realizada en los experimentos de concentrado puede tener una desviación muchas más grande que el relave, respecto a lo obtenido en la planta. Esta mayor desviación, ocurrirá, debido al sector de toma de la muestra de agua clara, la cual se encuentra bajo la interfase agua-aire. En la sedimentación batch de concentrado se genera una zona de espuma, debido a los reactivos dosificados en el proceso previo. esta zona de espuma, mostrada en la Figura 7.14, atrapa una gran cantidad de finos y en la operación del espesador, es parte de esta zona que está rebosando como agua recuperada, por lo tanto, tendrá una mayor turbidez que la medida en el laboratorio. Para el caso de la sedimentación batch de relave final, como se observa en la Figura 7.15, no se forma esta zona, por lo tanto, el factor de escalamiento a la operación debiera ser menor.

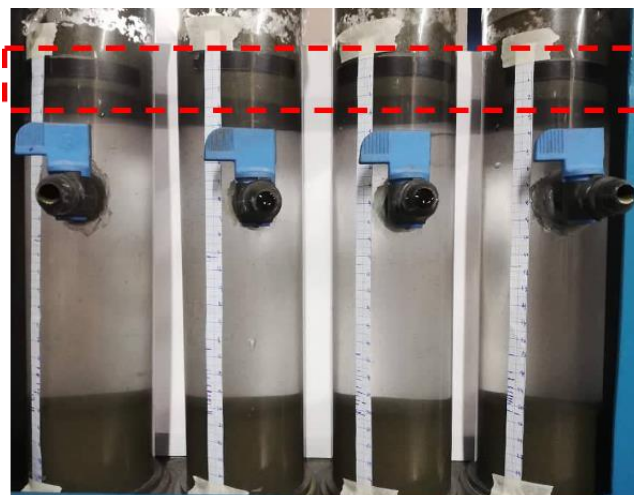


Figura 7.14. Probetas sedimentación batch concentrado final.

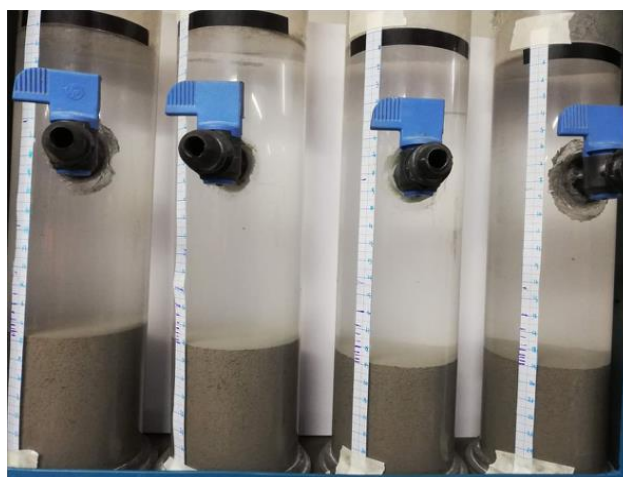


Figura 7.15. Probetas sedimentación batch relave total.

7.4 Recuperación de agua

De los resultados obtenidos para todos los experimentos, de porcentaje de recuperación de agua, respecto al volumen inicial, se observa que para el concentrado se obtienen aproximadamente un 10% sobre el relave en sus mejores condiciones de recuperación de aguas. En una primera instancia, analizando la distribución de tamaño del relave y concentrado, se podría pensar que el relave debería sedimentar más rápido y por ende recuperar más agua que el concentrado. Sin embargo, es relevante incluir en el análisis

la densidad de los sólidos en las pulpas. Para el relave, se tiene una densidad de 2,7 [t/m³], mientras que en el concentrado es de 4,2 [t/m³]. Al ser el concentrado un 56% más denso, las partículas generarán mayor fuerza y caerán más rápido que las partículas de relave, lo que concuerda con los órdenes de magnitud obtenidos de velocidad de sedimentación. Estas características de las pulpas generan una mayor recuperación de aguas para el concentrado. A pesar de tener un mayor porcentaje de recuperación de agua para el relave, no se debe olvidar que, en volúmenes de agua, es mucho mayor lo recuperado por el espesamiento de relaves.

Directamente relacionado con la capacidad de recuperación de agua, se debe analizar el área unitaria que requiere cada condición para el desarrollo del proceso. El área unitaria corresponde a los metros cuadrados necesario para un flujo determinado y para este estudio, se calcula mediante el método de Talmage & Fitch. En la Figura 7.16, se muestran los resultados obtenidos para todas las condiciones estudiadas del relave total, de donde se observa que el floculante Rheomax 1050, es el que necesita una menor área unitaria, lo que concuerda con los resultados obtenidos, puesto que es el floculante que presenta una mayor velocidad de sedimentación, siendo la condición que requiere una menor área, la que tiene un sólido inicial de 17% con una dosificación de 14 [g/t]. El requerir una menor área unitaria en comparación con la condición actual, resulta ser una mejora, puesto que, considerando el área de un espesador, al trabajar con una configuración que requiere menor área unitaria, genera un aumento en la capacidad de tratamiento del espesador.

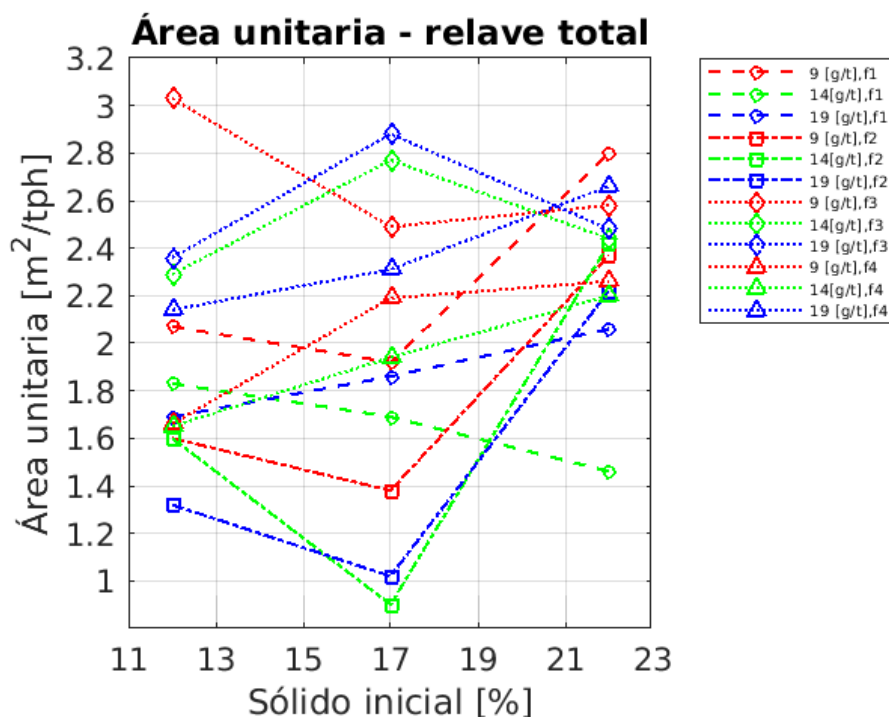


Figura 7.16. Área unitaria experimentos relave total; f1: Floerger 913sh, f2: Rheomax 1050, f3: Magnafloc 338, f4: Magnafloc 333.

En la Figura 7.17, se presentan los resultados de área unitaria, para el espesamiento de concentrado final, de los cuales se desprende que la variación generada por las configuraciones estudiadas, en comparación de la condición actual, son bastante bajas, lo que es consecuente con los resultados previos obtenidos.

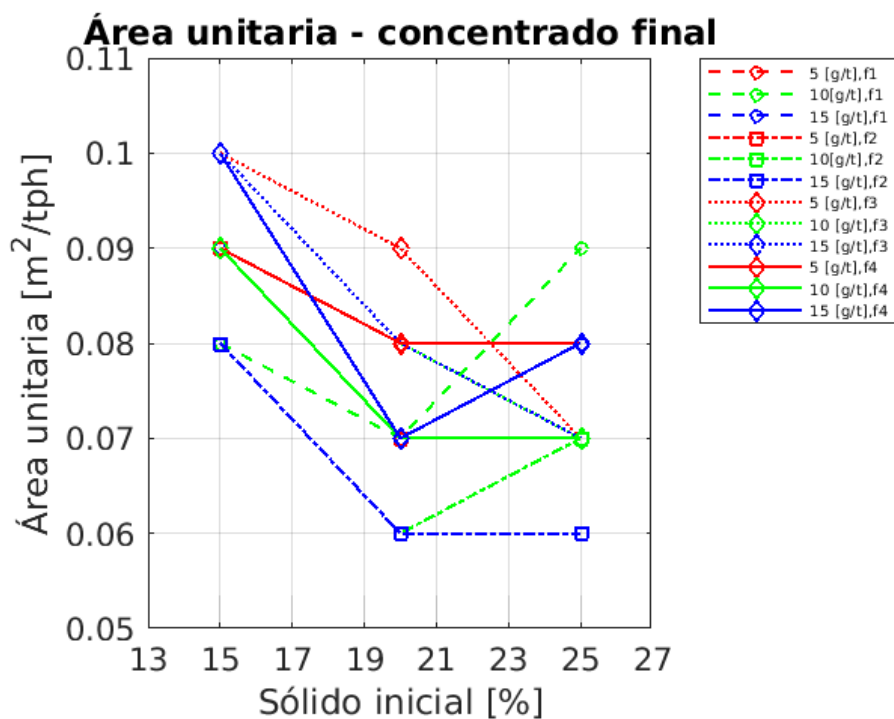


Figura 7.17. Área unitaria experimentos concentrado final; f1: Floerger 913sh, f2: Rheomax 1050, f3: Magnafloc 338, f4: Magnafloc 333.

CAPITULO 8 EVALUACIÓN COSTO/BENEFICIO SIMPLIFICADO

8.1 Metodología

En base al objetivo de este trabajo, que consiste en proponer una mejorar operacional en la calidad y cantidad de agua recuperada, es importante conocer si esta propuesta genera cambios en los costos de producción y si implica un beneficio o no. La evaluación económica presentada en este capítulo se realizará sólo a las oportunidades de mejoras operacionales detectadas en base a los resultados experimentales. Para la cuantificación del beneficio económico, se calculará en base al porcentaje de sólidos de descarga en los espesadores, la variación de la cantidad del agua recuperada y como afecta en el tonelaje procesado en la planta y el costo del agua utilizada. Lo anterior se reflejará en un impacto en los ingresos por venta de cobre fino. En este estudio sólo se consideran como costos de producción de cobre fino, los asociados al proceso de espesamiento.

Este análisis de costo/beneficio, corresponde a una aproximación, pues, se realiza en base a resultados obtenidos en el laboratorio, lo cual, al ser extrapolado a la operación, puede presentar algunas desviaciones. Adicionalmente, se realizan cálculos en base a proyecciones de valor del cobre fino, tratamiento planta, leyes y recuperaciones. Es importante destacar que en este estudio no se incluye el beneficio económico de la disminución de la turbidez en el agua recuperada, sin embargo, se estima porcentualmente la disminución de mantenciones ocasionadas por la baja calidad del agua.

Teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas, la metodología para el desarrollo de este análisis consiste en determinar la oportunidad de mejora operacional en base a los resultados de laboratorio y alguna data operacional. Basados en el sólido de descarga del espesador, se estima la cantidad de agua recuperada y por ende como varía la cantidad de agua fresca requerida para el procesamiento del mineral (Make-Up). Los cálculos se realizan considerando la planificación de producción año 2020 (Tratamiento, leyes de cabeza y concentrados, recuperación global). Tomando lo anterior

y considerando el costo para Andina de utilizar agua fresca y recuperada, se determina el costo del agua anual para cumplir con la producción y el costo del consumo de floculante, considerando la dosis actual. Lo planteado podría generar un beneficio asociado principalmente a disminución de costos operacionales en el proceso de espesamiento. En este trabajo adicionalmente a la cuantificación de la situación actual y la mejora propuesta, se analizan 2 escenarios adicionales, basados en la posibilidad de un aumento de producción y considerando la escasez hídrica en la región. Es relevante estudiar estos casos, que se detallaran más adelante, pues son dos temas directamente relacionados con la cantidad de agua necesaria y disponible.

A continuación, en la Tabla 8.1, se muestra la base de cálculos utilizada para el desarrollo de este análisis de costo/beneficio y más adelante se detallan los casos analizados.

Tabla 8.1. Base de cálculo análisis costo/beneficio.

			Fuente
Precio cobre fino	6.393,40	[USD/t]	(Cochilco, 2020)
Costo agua			
Agua fresca	0,40	[USD/m³]	(CODELCO Andina, 2018a)
Agua recuperada	0,16	[USD/m³]	
Tratamiento mineral	31,16	[Mt/año]	
Ley Cu cabeza mineral	0,72	%	
Ley Cu concentrado	28,50	%	
Recuperación global	87,80	%	
Costo floculante			
Floerger 913sh	3.060	[USD/t]	(CODELCO Andina, 2018a)
Rheomax 1050	4.090	[USD/t]	
Magnafloc338	3.270	[USD/t]	(BASF Chile, 2019)
Magnafloc 333	5.410	[USD/t]	

8.2 Escenario base, situación actual CODELCO Andina

Para el planteamiento del caso base, se considera, los datos de la Tabla 8.1 y la dosificación de floculante estándar actual de la planta 14 [g/t]. Al no tener experimentos

de tasa de compactación, se utilizó data operacional para conocer el sólido de descarga que se obtiene con las condiciones operacionales actuales, el cual corresponde a un 60% de sólidos. Con los datos, mediante un balance de aguas, se conoce la cantidad de agua recuperada y la razón de esta respecto al tratamiento de la planta (toneladas de mineral seco). Conociendo que la relación en Andina de consumo de agua por cada tonelada de mineral seco es 2/1, se obtiene el Make-Up actual de la planta y el costo anual del agua para la división. Con el tratamiento se obtiene el consumo de floculante y por ende el costo anual del floculante actual (Floerger 913sh). A su vez con los datos proporcionados podemos obtener el ingreso anual por venta de cobre fino y en base a este ingreso se le descuenta el costo de agua y floculante para obtener el beneficio. Es importante destacar que este beneficio no considera los demás costos de producción del cobre, sólo aquellos estudiados en este trabajo.

Tabla 8.2. Resultados caso base.

Agua recuperada	1,16	[m ³ /tms]
Agua fresca	0,84	[m ³ /tms]
Costo agua fresca	10.418.995	[USD/año]
Costo agua recuperada	5.804.882	[USD/año]
Costo total agua	62.328.000	[USD/año]
Consumo floculante	436	[t/año]
Costo floculante	1.335.066	[USD/año]
Cobre fino producido	196.185	[t/año]
Ingreso venta cobre fino	1.254.291.872	[USD/año]
Ingreso - costo considerado	1.235.732.929	[USD/año]
Beneficio	0	[USD/año]

Para el caso base se reporta como 0 [USD/año], pues es la condición actual de la planta y no estamos generando un beneficio respecto a este.

8.3 Escenario mejora operacional: Rheomax 1050.

Como se observa en la Figura 8.1, en las pruebas realizadas bajo condiciones de dosificación de floculante y sólido inicial operacionales, el único floculante con el que se obtuvo una mejora en la velocidad de sedimentación es el floculante Rheomax 1050, aumentando en un 128%. En la Figura 8.2, se presentan los resultado de las mediciones de turbidez, donde se observa que para la muestra tomada a los 10 [min], todos los floculantes presentan mayor turbidez comparado con el floculante Floerger 913sh, sin embargo esta situación se revierte para la muestra tomada a los 30 [min], obteniendo el floculante Rheomax 1050 una disminución de un 66% en la turbidez.

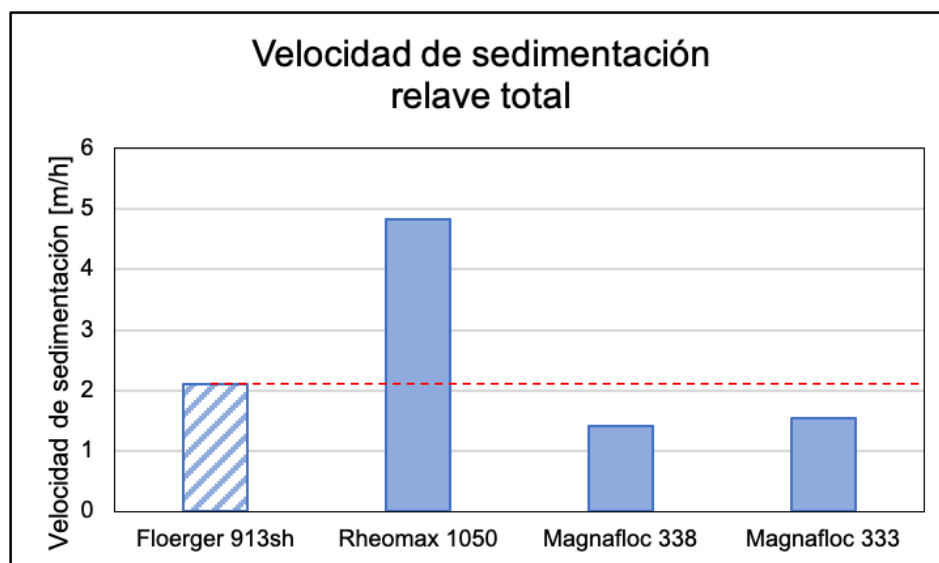


Figura 8.1. Velocidad de sedimentación relave total. Dosis floculante 14 [g/t], sólido inicial 17%.

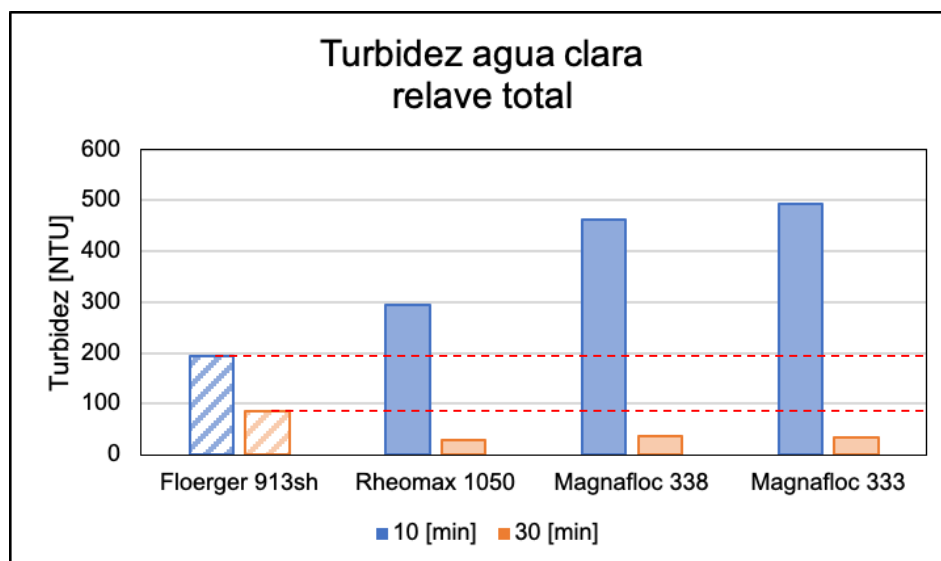


Figura 8.2. Turbidez agua clara sedimentación relave total. Dosis floculante 14 [g/t], sólido inicial 17%.

En base a los resultados obtenidos se determina que la mejor opción de los floculantes estudiados corresponde al floculante Rheomax 1050.

De igual forma que en el caso baso, no se tienen experimentos de tasa de compactación, por lo que conociendo la diferencia de porcentaje de sólido final obtenido en los experimentos de Floerger 913sh y Rheomax 1050, y conociendo el sólido de descarga obtenido operacionalmente del floculante planta, se extrapola el resultado de laboratorio de Rheomax 1050. Es importante tener presente que este valor corresponde a una estimación que podría presentar variaciones en planta.

En la Figura 8.3, se observa que experimentalmente el sólido final alcanzado por el floculante Floerger 913sh es de 47% y el obtenido para el floculante Rheomax 1050 es de 49%, teniendo una diferencia aproximada de 2 puntos porcentuales.

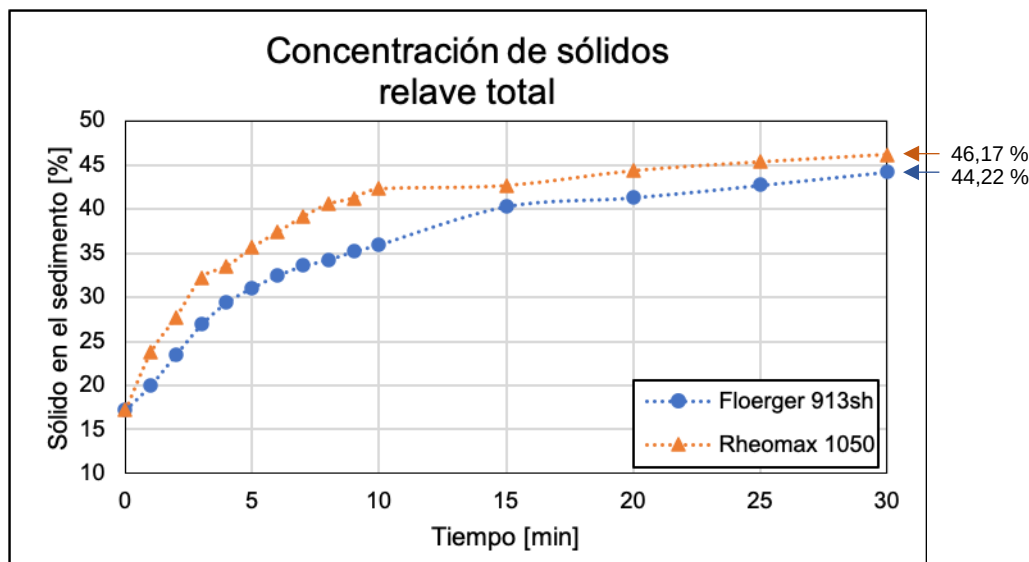


Figura 8.3. Concentración de sólidos en el sedimento. Sólido inicial 17%, dosis floculante 14 [g/t].

Conociendo la diferencia de sólido final entre los floculantes, se proyecta a nivel industrial a un 62% de sólidos en la descarga del espesador al utilizar el floculante Rheomax 1050. De forma análoga al caso base, y utilizando los mismos supuesto, se obtienen los resultados de consumo de agua y costo de floculante mostrados en la Tabla 8.3. Se observa que, al aumentar el sólido en la descarga del espesador, se aumentará la cantidad de agua recuperada y por ende el consumo de agua recuperada disponible para el proceso que, al tener un menor costo, disminuye el consumo de agua total. Los costos de consumo de floculante utilizado aumentan, debido al valor del floculante, por lo tanto, este escenario, no proporciona un beneficio económico puesto que aumenta el costo en 56.151 [USD/año]. Si bien no hay un beneficio económico, si hay un beneficio medio ambiental, puesto que se disminuye el consumo de agua fresca, aumentando el agua en las lagunas, lo que es muy beneficioso sobre todo en las actuales condiciones de sequía en la región.

Tabla 8.3. Resultados escenario cambio floculante a Rheomax 1050.

Agua recuperada	1,22	[m ³ /tms]
Agua fresca	0,78	[m ³ /tms]
Costo total agua	15.839.643	[USD/año]
Costo floculante	1.784.451	[USD/año]
Ingreso venta cobre fino	1.254.291.872	[USD/año]
Beneficio	-56.151	[USD/año]

8.1 Escenario aumento de tonelaje: agua fresca disponible constante.

Este escenario planteado atiende la necesidad del aumento de tonelaje debido a la disminución en las leyes de mineral valioso, sin embargo, como no se tienen buenos pronósticos del agua fresca disponible, se supone una igual cantidad de agua fresca a la actual. Con los supuestos anteriormente mencionados y conociendo el Make-Up de cada floculante, se calcula la cantidad de tonelaje que se podría procesar. En el caso del floculante Floerger 913sh corresponde al escenario base, mientras que con el floculante Rheomax 1050 se puede aumentar el tonelaje en un 7% respecto a la condición actual, obteniendo un beneficio simplificado de 82 [MUSD/año], como se muestra en la Tabla 8.4

Tabla 8.4. Escenario aumento tonelaje 7%, floculante Rheomax 1050.

Tratamiento mineral	33,26	[Mt/año]
Agua recuperada	1,22	[m ³ /tms]
Agua fresca	0,78	[m ³ /tms]
Costo total agua	15.839.643	[USD/año]
Costo floculante	1.784.451	[USD/año]
Ingreso venta cobre fino	1.338.487.226	[USD/año]
Beneficio	82.956.776	[USD/año]

Debido a que un aumento de 7% en el tonelaje de la planta, que equivale a aproximadamente 3.000 [t/día] por sobre lo actual, puede ser considerado excesivo, siendo conservadores se puede estimar un 3,5% de aumento en el tratamiento, aún así se obtiene un beneficio de 41.478.388 [USD/año].

8.1 Escenario escasez hídrica.

Como se menciona en capítulos anteriores en el país y la región se viven tiempos de sequía y no se ven mejoras próximas respecto a esta situación, pronosticando una disminución de aproximadamente un 2% del agua fresca disponible para el proceso. Consideran esto y conociendo el rendimiento tanto del floculante Floerger 913sh como el del Rheomax 1050, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 8.5. De los resultados obtenido, se concluye que, ante la inminente escasez hídrica, si no se realizan el cambio de floculante se tendrá que disminuir un 2% el tratamiento de mineral, por lo que respecto al caso base, se tendrán pérdidas de aproximadamente 28 [MUSD/año]. Mientras que, si se cambia el floculante, se puede aumentar en un 4,26% lo que genera ganancias de aproximadamente 52 [MUSD/año]

Tabla 8.5. Resultados escenario escasez hídrica.

		Floerger 913sh	Rheomax1050
Tratamiento mineral	[Mt/año]	33,45	32,49
Agua recuperada	[m ³ /tms]	1,20	1,22
Agua fresca	[m ³ /tms]	0,80	0,78
Costo total agua	[USD/año]	15.850.728	16.504.742
Costo floculante	[USD/año]	1.304.359	1.860.436
Ingreso venta cobre fino	[USD/año]	1.225.443.159	1.307.702.020
Beneficio	[USD/año]	-28.444.857	52.603.912

Es importante volver a mencionar que los valores de beneficio reportados en este estudio, son mayores a los que se podrían obtener realmente, ya que los costos considerados en la producción del cobre de este estudio, son simplificados, considerando sólo los del proceso de espesamiento estudiado en este trabajo.

CAPITULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones

1. Del desarrollo del caso base para Andina, se obtiene una velocidad de sedimentación de $2,1 \pm 0,03$ [m/h] y una turbidez de $86 \pm 20,92$ [NTU] para el relave total. Para el concentrado final se obtiene una velocidad de sedimentación de $5,6 \pm 0,06$ [m/h] y una turbidez de $40 \pm 4,21$ [NTU].
2. Se demuestra a través de un análisis estadístico ANOVA, que el sólido inicial es el factor que mayor incidencia tiene en la velocidad de sedimentación. En cuanto a la turbidez del agua recuperada, se observa que tanto el sólido inicial y la dosificación de floculante son relevantes.
3. La variación de pH tiene un efecto en la efectividad de cada floculante presentando algunos mayor sensibilidad que otros, siendo de los floculantes estudiados el floculante Floerger 913sh el más sensible ante variaciones.
4. El floculante Rheomax 1050 de BASF, logró aumentar en un 130%, desde $2,1 \pm 0,03$ [m/h] a $4,83 \pm 0,08$ [m/h] la velocidad de sedimentación con respecto a la condición actual y disminuyó en 57 puntos la turbidez del agua recuperada desde $86 \pm 20,92$ [NTU] a $29 \pm 5,29$ [NTU]. Los resultados obtenidos junto con la mayor robustez frente a variaciones de pH convierten el floculante Rheomax 1050 en una buena opción para reemplazo del floculante actual.
5. Para el espesamiento de concentrado final, el floculante Magnafloc 333 es el que genera un aumento en la velocidad de sedimentación, sin embargo, este no es mayor al 2%, disminuyendo sólo en 1% la turbidez obtenida, lo que en conjunto con su elevado costo no lo convierte en una alternativa viable.



6. Un análisis económico pre eliminar demuestra que el Rheomax 1050 con respecto al Floerger 913sh ofrece un beneficio económico al reducir el consumo de agua fresca de 0,84 [m³/t] a 0,78 [m³/t]. Adicionalmente, frente a la escasez hídrica el Rheomax 1050 permite mantener el tratamiento actual de la planta. En términos económicos esto se traduce en un beneficio simplificado de casi 83 [MUSD] al año al utilizar el Rheomax 1050.
7. En base a los resultados obtenidos, se corrobora la hipótesis planteada en este trabajo.

9.2 Recomendaciones

A continuación, se presentan una serie de recomendaciones, orientadas en la operación y respecto a futuros trabajos a desarrollar en el área de estudio.

Respecto a lo observado en la operación:

1. Tener control del estado en el sistema de auto-dilución de los espesadores, para asegurarse de alcanzar la dilución de diseño que, para el caso del relave total, corresponde a un 17%, ya que una diferencia en la dilución puede generar un gran impacto en la velocidad de sedimentación obtenida.
2. Instalar sensores de medición en línea de pH en los espesadores, para tomar acciones necesarias a tiempo y que no impacten fuertemente en el proceso.
3. Mientras se utilice el floculante Floerger 913-sh, evitar desviar grandes flujos de agua ácida a los espesadores, debido a que el floculante pierde su efectividad bajo pH 8,5.
4. Para el espesamiento de concentrados se recomienda disminuir la dilución inicial de la pulpa, ya que por diseño el espesador permite una dilución de 12% de sólido, lo que generaría un aumento en la velocidad de sedimentación.

Respecto a futuros trabajos:

5. Se recomienda para el espesamiento de relaves realizar más estudios al floculante Rheomax 1050, como por ejemplo el efecto reológico en las pulpas y pruebas de tasa de compactación.
6. Realizar pruebas industriales en el espesador de concentrados para el floculante Rheomax 1050 a una dosificación de 14 [g/t]. En función de los resultados de tasa



de compactación, se podría reducir la dosificación de floculante, pues aún así se tienen mejoras de velocidad de sedimentación y turbidez respecto a la condición actual, lo que generaría un mayor atractivo económico.

7. Considerando que Andina ya decidió realizar algunos cambios operacionales recientemente en el área de espesamiento, es necesario basar el enfoque específico de los trabajos a futuro en la operación actual de Andina.

CAPITULO 10 BIBLIOGRAFÍA

- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. *Sedapal*, 1–44.
http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Avilés, P. (2020). *Evaluación técnica de diversos floculantes en el rendimiento de la operación del espesamiento de relaves a escala de laboratorio*. Universidad de Santiago de Chile.
- BASF Chile. (2019). *Cotización productos*.
- Briceño, C., & Rubio, X. (2012). Caracterización y Distribución de Arcillas en el yacimiento Radomiro Tomic y sus Implicancias en Procesos Metalúrgicos. *XIII Congreso Geológico Chileno*, 96–98.
- Cochilco. (2018). *Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre* (Número 2018). [https://www.cochilco.cl/Mercado de Metales/Analisis Mercado de los Insumos Críticos 2017 \(empresas\).pdf](https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Analisis%20Mercado%20de%20los%20Insumos%20Críticos%202017%20(empresas).pdf)
- Cochilco. (2020, agosto 6). *Noticias | Cochilco*. Cochilco proyecta precio del cobre de US\$ 2,62 la libra para 2020. <https://www.cochilco.cl/Paginas/Sala-de-Prensa/Noticias.aspx?ID=429>
- COCHILCO. (2012). Consumo de agua en la minería del cobre 2010. En *Factores clave para un análisis estratégico de la minería*.
- CODELCO Andina. (2018a). *Información interna*.
- CODELCO Andina. (2018b). *PLAN DE NEGOCIOS Y DESARROLLO - PND 2019*.
- Concha, F. (2001). *Manual de Filtración y Separación MANUAL DE FILTRACIÓN & SEPARACIÓN* (Número January 2001).
- Concha, F. (2013). *Solid-Liquid Separation in the Mining Industry*. 1952, 143–172.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-02484-4>
- CR2. (2015). *Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. 26. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.5b00380>
- Cruz, B. L., & Martínez-rojas, R. (2016). *Influencia de la concentración de sólido en la velocidad de sedimentación de lodo de la industria de áridos Influence of solids concentration on the sedimentation rate of the mud in the aggregate industry*. 17–

32.

David, D. (2016). *Tipo De Espesadores*.

<https://www.911metallurgist.com/metallurgia/tipo-de-espesadores/>

De Witt, J. A., & Van De Ven, T. G. M. (1992). The effect of neutral polymers and electrolyte on the stability of aqueous polystyrene latex. *Advances in Colloid and Interface Science*, 42(C), 41–64. [https://doi.org/10.1016/0001-8686\(92\)80019-T](https://doi.org/10.1016/0001-8686(92)80019-T)

Espigares, M., & Fernandez-Crehuet, M. (1999). *Calidad del agua para consumo público: caracteres físico-químicos. En Estudio sanitario del agua*.

Fawell, P., Farrow, J., Heath, A., Nguyen, T., Owen, A., Paterson, D., Rudman, M., Scales, P., Simic, K., Stephens, D., Swift, J., & Usher, S. (2009). 20 Years of AMIRA P266 “Improving Thickener Technology” — How has it Changed the Understanding of Thickener Performance? *Proceedings of the Twelfth International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, 59–68.

https://doi.org/10.36487/acg_repo/963_7

França, S. C. A., Andrade, L. S., Loayza, P. E. V., & Trampus, B. C. (2017). Water in Mining – Challenges for Reuse. In: *Wolkersdorfer, C.; Sartz, L.; Sillanpää, M. & Häkkinen, A.: Mine Water & Circular Economy (Vol I)*, 445–452.

http://imwa.info/docs/imwa_2017/IMWA2017_Franca_445.pdf

Gambaro, G. (2019). *Proyecto TADA – Planta HDS*. smiicechile.cl/wp-content/uploads/2019/05/SANAP-19.05.15-03-G_Gamabaro_TADA-Codelco_Andina.pdf

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439.

<https://doi.org/10.1002/joc.6219>

Gerencia de Recursos Hídricos, concentrados y relaves. (2019). *Escenario de sequía año 2019-2020*.

Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, C. D. A. (2019). *DIVISIÓN ANDINA INDICE INFORME PLAN DE PRODUCCIÓN “ P0 2019 ”*.

Ghosh, P. (2012). *DLVO Theory and Non-DLVO Forces*.

<https://nptel.ac.in/courses/103/103/103103033/>

- Gregory, J. (1988). Polymer adsorption and flocculation in sheared suspensions. *Colloids and Surfaces*, 31(C), 231–253. [https://doi.org/10.1016/0166-6622\(88\)80196-3](https://doi.org/10.1016/0166-6622(88)80196-3)
- Gutierrez, H., & De La Vara, R. (2008). *Analisis y Diseño de Experimentos*. https://www.academia.edu/39839677/Analisis_y_Diseño_de_Experimentos_Gutierrez_y_De_La_Vara
- Hitner, H. I. (2004). *Flocculating Agents*. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (Vol. 11).
- Hogg, R. (1999). The role of polymer adsorption kinetics in flocculation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 146(1–3), 253–263. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00723-7](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00723-7)
- Minera Escondida. (2015). 4. *Fundamentos teoricos de sedimentación*. <https://www.slideshare.net/Gallas190987/4-fundamentos-teoricos-de-sedimentacin>
- Montgomery, D. (2004). Diseño y análisis de experimentos. En *Limusa Wiley*.
- Ortiz, C. B. (2012). *Aplicación de microburbujas en la flotación de lodos de tratamiento de aguas ácidas de mina Parte I: neutralización y floculación*. 31–38.
- Peng, F. F., & Lu, Z. (1998). Polymer flocculation and coagulation for sedimentation of copper flotation tailings. *Minerals and Metallurgical Processing*, 15(1), 14–20. <https://doi.org/10.1007/bf03402781>
- Pizarro, N., & (Codelco). (2019). *Entrega De Resultados 2018*.
- Puii, T. (2013). *Direct measurement of Van der Waals force made for the first time*. <https://www.zmescience.com/science/physics/direct-measurement-of-van-der-waals-force-made-for-the-first-time/>
- Ramírez, N. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. En *Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera* (pp. 1–42).
- Ravanal, J. (2017). *Estudio del efecto de la arcilla caolinita en la velocidad de sedimentación y yield stress empleando floculante anionico y cationico en pulpas de cuarzo* [Universidad de Concepción]. <https://doi.org/10.12962/j23373520.v6i1.22451>
- Rocco, M. (2013). *Drenaje ácido: estudio y predicción - Minería Chilena*.

<https://www.mch.cl/reportajes/drenaje-acido-estudio-y-prediccion/#>

Ros, A. (2014). *Separación Sólido – Líquido en Hidrometalurgia* by Antonio Ros Moreno

- *issuu*. https://issuu.com/antonioros/docs/separaci_n_s_lido_l_quido_en

Sánchez Ramos, D. (2013). Calidad de agua y su control. *Calidad de agua*, 49.

http://blog.uclm.es/davidsanchezramos/files/2016/05/11_Calidad-agua-y-control_v2015_resumen.pdf

Vera, F. (2019). *Aumento de porcentaje de sólido de descarga de los espesadores de relave a través de la metodologías full potencial en minera los pelambres*.

Universidad de Concepción.

Vicencio, J. (2019). *Reporte de mitad de año: Histórico déficit de nieve en la cordillera central* – *Meteochile Blog*.

<http://blog.meteochile.gob.cl/2019/08/13/reporte-de-mitad-de-ano-historico-deficit-de-nieve-en-la-cordillera-central/>

Wills, B. A. (2006). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical ...* - Barry A. Wills - *Google Books* (séptima).

<https://books.google.cl/books?id=tQj4zuW2VL0C&printsec=frontcover&dq=wills+mineral+processing+technology&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiR69X49e3qAhVeGbkGHRidB1QQ6AEwAXoECAMQAg#v=onepage&q=wills mineral processing technology&f=false>

Yianatos, J., & Vinett, L. (s. f.). *Flotación de minerales: fundamentos, tecnología y aplicación*.

ANEXOS

Anexo A. Especificación espesadores CODELCO Andina.

Tabla A. 1. Especificaciones espesadores de relaves CODELCO Andina (Rios, Misle , & Silva , 2016).

Característica	Espesador 1 relave	Espesador 2 relave	Espesador 3 relave
Tipo	High rate	High rate	High density
Altura	6,9 [m]	6,9 [m]	11,2 [m]
Altura alimentación	5,5 [m]	5,6 [m]	8,9 [m]
Altura rastra	3,0 [m]	3,0 [m]	4,3 [m]
Dilución feedwell	17% sólido	17% sólido	15% sólido
Diámetro	99 [m]	99 [m]	43 [m]
Torque máximo	4.800.000 [lb-pies]	4.000.000 [lb-pies]	3.600.000 [lb-pies]
Capacidad de tratamiento	77.000 [tpd]	69.000 [tpd]	25.000 [tpd]
Entradas	4	4	3
Descargas	2 de 20"	2 de 18"	2 de 16"
Sólido de descarga	60% p/p	58% p/p	67% p/p

Tabla A. 2. Especificaciones espesador de concentrado CODELCO Andina (CODELCO Andina , 2013).

Característica	Espesador 2 concentrado
Tipo	High rate
Capacidad de tratamiento	2740 [tpd]
Sólido de alimentación	12%
Sólido de descarga	55%
Caudal de alimentación	431 [m ³ /h]
Caudal de descarga	47 [m ³ /h]
Flujo de agua recuperada	396 [m ³ /h]

Anexo B. Caracterización muestras utilizadas.

% Sulfuros base mineral - Cabeza Mina Rajo

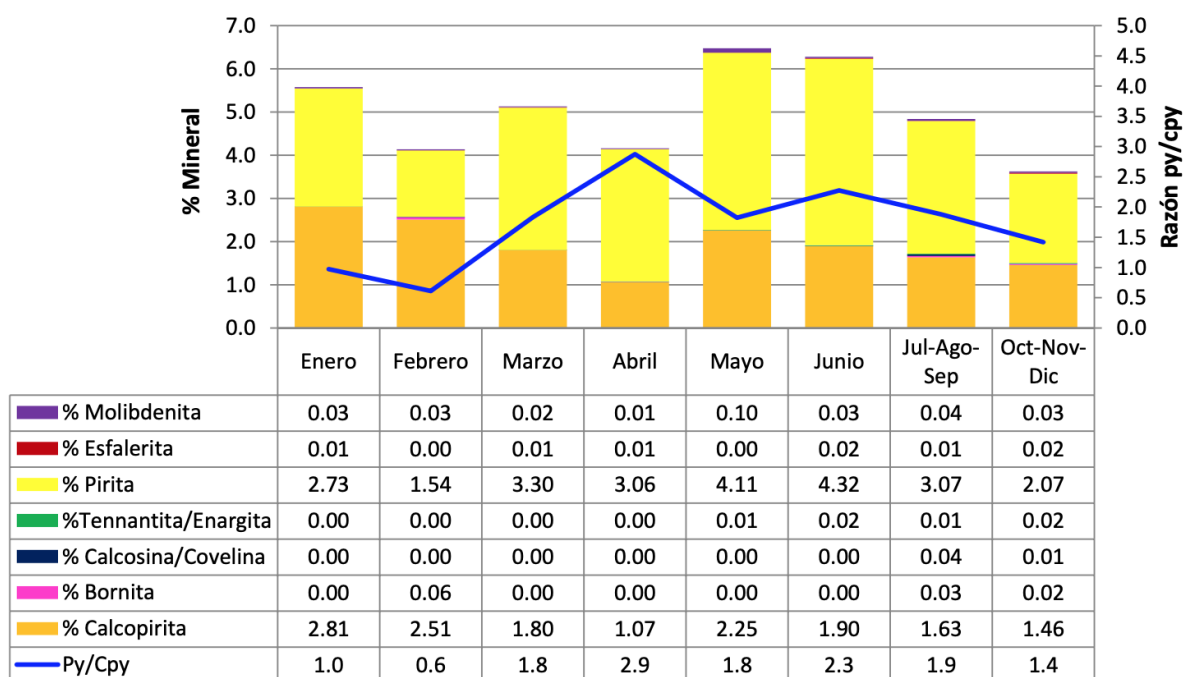


Figura B. 1. % Sulfuros en base mineral - Cabeza mina rajo (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, CODELCO División Andina, 2018)

% Ganga base mineral - Cabezas Mina Rajo

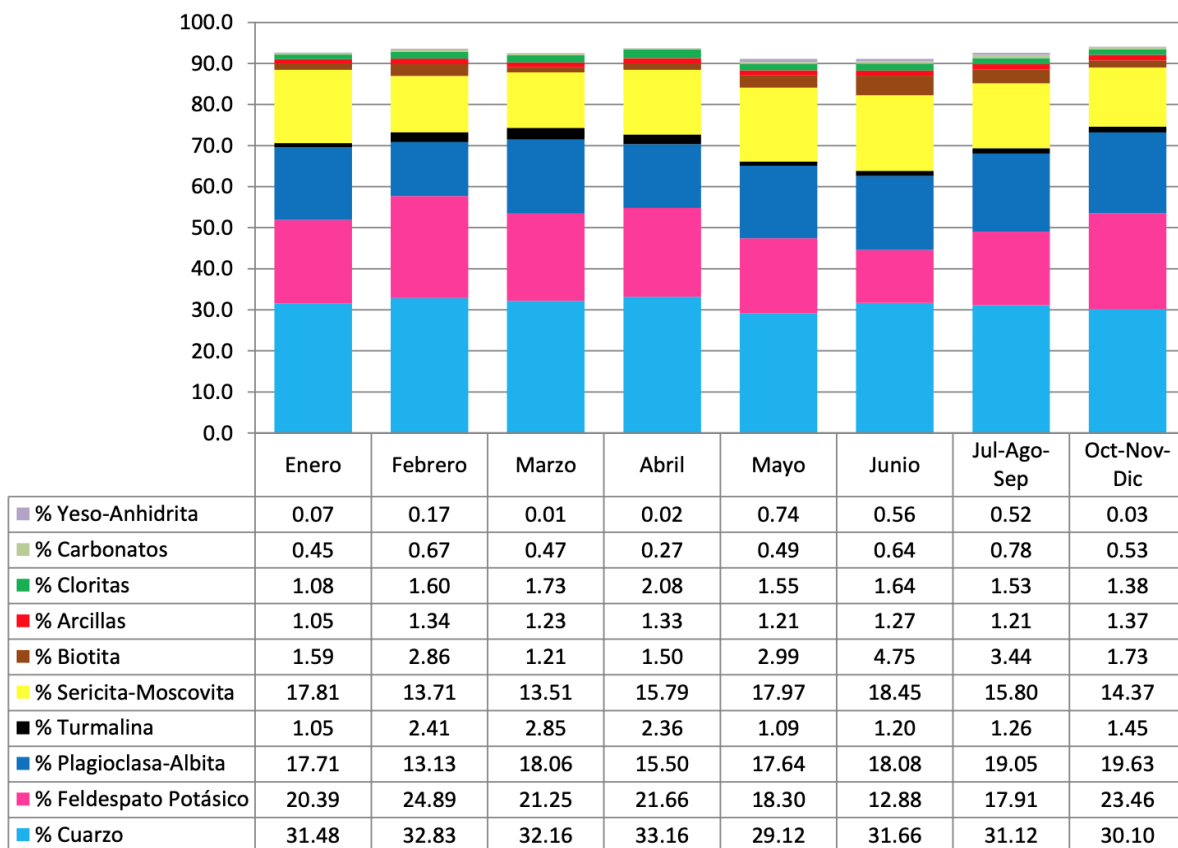


Figura B. 2. % Ganga base mineral - Cabeza mina rajo (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, CODELCO División Andina, 2018).

Anexo C. Diseño experimental.

Tabla C. 1. Diseño de experimentos primera etapa relave total.

Orden estadístico	Orden correlativo	Sólido inicial [%]	Dosis floculante [g/t]
10	1	12	9
18	2	22	19
9	3	22	19
2	4	12	14
1	5	12	9
8	6	22	14
6	7	17	19
13	8	17	9
4	9	17	5
15	10	17	19
17	11	22	14
11	12	12	14
16	13	22	9
12	14	12	19
3	15	12	19
7	16	22	9
5	17	17	14
14	18	17	14

Tabla C. 2. Diseño de experimentos primera etapa concentrado final.

Orden estadístico	Orden correlativo	Sólido inicial [%]	Dosis floculante [g/t]
10	1	15	5
18	2	25	15
9	3	25	15
2	4	15	10
1	5	15	5
8	6	25	10
6	7	20	15
13	8	20	5
4	9	20	5
15	10	20	15
17	11	25	10
11	12	15	10
16	13	25	5
12	14	15	15
3	15	15	15
7	16	25	5
5	17	20	10
14	18	20	10

Tabla C. 3. Diseño de experimentos segunda etapa relave total.

Orden estadístico	Orden correlativo	Sólido inicial [%]	Dosis floculante [g/t]	Floculante
16	1	17	19	Rheomax 1050
20	2	22	9	Magnafloc 338
8	3	12	19	Magnafloc 338
44	4	17	19	Magnafloc 338
11	5	17	9	Magnafloc 338
5	6	12	14	Magnafloc 338
43	7	17	19	Rheomax 1050
28	8	12	9	Rheomax 1050
1	9	12	9	Rheomax 1050
7	10	12	19	Rheomax 1050
38	11	17	9	Magnafloc 338
45	12	17	19	Magnafloc 333
53	13	22	19	Magnafloc 338
14	14	17	14	Magnafloc 338
27	15	22	19	Magnafloc 333
2	16	12	9	Magnafloc 338
24	17	22	14	Magnafloc 333
41	18	17	14	Magnafloc 338
52	19	22	19	Rheomax 1050
48	20	22	9	Magnafloc 333
17	21	17	19	Magnafloc 338
13	22	17	14	Rheomax 1050
18	23	17	19	Magnafloc 333
26	24	22	19	Magnafloc 338
36	25	12	19	Magnafloc 333

49	26	22	14	Rheomax 1050
4	27	12	14	Rheomax 1050
23	28	22	14	Magnafloc 338
29	29	12	9	Magnafloc 338
37	30	17	9	Rheomax 1050
9	31	12	19	Magnafloc 333
35	32	12	19	Magnafloc 338
6	33	12	14	Magnafloc 333
3	34	12	9	Magnafloc 333
19	35	22	9	Rheomax 1050
47	36	22	9	Magnafloc 338
40	37	17	14	Rheomax 1050
10	38	17	9	Rheomax 1050
42	39	17	14	Magnafloc 333
30	40	12	9	Magnafloc 333
51	41	22	14	Magnafloc 333
21	42	22	9	Magnafloc 333
25	43	22	19	Rheomax 1050
15	44	17	14	Magnafloc 333
12	45	17	9	Magnafloc 333
32	46	12	14	Magnafloc 338
31	47	12	14	Rheomax 1050
22	48	22	14	Rheomax 1050
54	49	22	19	Magnafloc 333
34	50	12	19	Rheomax 1050
50	51	22	14	Magnafloc 338
39	52	17	9	Magnafloc 333
46	53	22	9	Rheomax 1050
33	54	12	14	Magnafloc 333

Tabla C. 4. Diseño de experimentos segunda etapa concentrado final.

Orden estadístico	Orden correlativo	Sólido inicial [%]	Dosis floculante [g/t]	Floculante
16	1	20	15	Rheomax 1050
20	2	25	5	Magnafloc 338
8	3	15	15	Magnafloc 338
44	4	20	15	Magnafloc 338
11	5	20	5	Magnafloc 338
5	6	15	10	Magnafloc 338
43	7	20	15	Rheomax 1050
28	8	15	5	Rheomax 1050
1	9	15	5	Rheomax 1050
7	10	15	15	Rheomax 1050
38	11	20	5	Magnafloc 338
45	12	20	15	Magnafloc 333
53	13	25	15	Magnafloc 338
14	14	20	10	Magnafloc 338
27	15	25	15	Magnafloc 333
2	16	15	5	Magnafloc 338
24	17	25	10	Magnafloc 333
41	18	20	10	Magnafloc 338

52	19	25	15	Rheomax 1050
48	20	25	5	Magnafloc 333
17	21	20	15	Magnafloc 338
13	22	20	10	Rheomax 1050
18	23	20	15	Magnafloc 333
26	24	25	15	Magnafloc 338
36	25	15	15	Magnafloc 333
49	26	25	10	Rheomax 1050
4	27	15	10	Rheomax 1050
23	28	25	10	Magnafloc 338
29	29	15	5	Magnafloc 338
37	30	20	5	Rheomax 1050
9	31	15	15	Magnafloc 333
35	32	15	15	Magnafloc 338
6	33	15	10	Magnafloc 333
3	34	15	5	Magnafloc 333
19	35	25	5	Rheomax 1050
47	36	25	5	Magnafloc 338
40	37	20	10	Rheomax 1050
10	38	20	5	Rheomax 1050
42	39	20	10	Magnafloc 333
30	40	15	5	Magnafloc 333
51	41	25	10	Magnafloc 333
21	42	25	5	Magnafloc 333
25	43	25	15	Rheomax 1050
15	44	20	10	Magnafloc 333
12	45	20	5	Magnafloc 333
32	46	15	10	Magnafloc 338
31	47	15	10	Rheomax 1050
22	48	25	10	Rheomax 1050
54	49	25	15	Magnafloc 333
34	50	15	15	Rheomax 1050
50	51	25	10	Magnafloc 338
39	52	20	5	Magnafloc 333
46	53	25	5	Rheomax 1050
33	54	15	10	Magnafloc 333

Tabla C. 5. Diseño de experimentos tercera etapa relave total.

Orden estadístico	Orden correlativo	pH	Floculante
1	1	4,6	Floerger 913sh
20	2	12,5	Magnafloc 333
34	3	10,6	Rheomax 1050
28	4	6,5	Magnafloc 333
5	5	6,5	Floerger 913sh
35	6	10,6	Magnafloc 338
37	7	12,5	Floerger 913sh
14	8	10,6	Rheomax 1050
39	9	12,5	Magnafloc 338
33	10	10,6	Floerger 913sh
8	11	6,5	Magnafloc 333

10	12	8,5	Rheomax 1050
7	13	6,5	Magnafloc 338
19	14	12,5	Magnafloc 338
9	15	8,5	Floerger 913sh
27	16	6,5	Magnafloc 338
2	17	4,6	Rheomax 1050
11	18	8,5	Magnafloc 338
3	19	4,6	Magnafloc 338
21	20	4,6	Floerger 913sh
15	21	10,6	Magnafloc 338
13	22	10,6	Floerger 913sh
17	23	12,5	Floerger 913sh
23	24	4,6	Magnafloc 338
12	25	8,5	Magnafloc 333
26	26	6,5	Rheomax 1050
25	27	6,5	Floerger 913sh
40	28	12,5	Magnafloc 333
36	29	10,6	Magnafloc 333
4	30	4,6	Magnafloc 333
24	31	4,6	Magnafloc 333
6	32	6,5	Rheomax 1050
29	33	8,5	Floerger 913sh
31	34	8,5	Magnafloc 338
32	35	8,5	Magnafloc 333
38	36	12,5	Rheomax 1050
18	37	12,5	Rheomax 1050
16	38	10,6	Magnafloc 333
30	39	8,5	Rheomax 1050
22	40	4,6	Rheomax 1050

Tabla C. 6. Diseño de experimentos tercera etapa concentrado final.

Orden estadístico	Orden correlativo	pH	Floculante
12	1	11,35	Magnafloc 333
9	2	11,35	Floerger 913sh
8	3	10,49	Magnafloc 333
15	4	8,67	Magnafloc 338
2	5	8,67	Rheomax 1050
20	6	10,49	Magnafloc 333
13	7	8,67	Floerger 913sh
6	8	10,49	Rheomax 1050
4	9	8,67	Magnafloc 333
14	10	8,67	Rheomax 1050
1	11	8,67	Floerger 913sh
23	12	11,35	Magnafloc 338
3	13	8,67	Magnafloc 338
24	14	11,35	Magnafloc 333
5	15	10,49	Floerger 913sh
7	16	10,49	Magnafloc 338
10	17	11,35	Rheomax 1050
21	18	11,35	Floerger 913sh
11	19	11,35	Magnafloc 338
22	20	11,35	Rheomax 1050
16	21	8,67	Magnafloc 333
19	22	10,49	Magnafloc 338
17	23	10,49	Floerger 913sh
18	24	10,49	Rheomax 1050

CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



Anexo D. Procedimientos.

SGO-F-GE-074.04

INSTRUCTIVO

SEDIMENTACIÓN DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN

CODIGO: SGO-IP-056 REVISION: 03 PAGINA: 1 de 3

DOCUMENTO DE REFERENCIA: Procedimiento SGI-P-IP-004 Control Integral de las Operaciones Ingeniería de Procesos

INSTRUCCIONES A SEGUIR

1. RESUMEN DE LOS PASOS CLAVES DEL DOCUMENTO

Pasos 1 Antes	Responsabilidad de quien lo realiza(Supervisor o Trabajador)
Tomar conocimiento del instructivo SGI-I-IP-056 y aplicarlo	Supervisor de Primera Línea /Técnico Calificado
Realizar ART de la tarea	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Utilizar EPP adecuados para realizar la tarea, específicamente guantes de latex para la manipulación de los reactivos	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Limpiar y Ordenar el área antes comenzar la tarea	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Revisar que el funcionamiento de los equipos y herramientas se encuentren operativos antes de iniciar la tarea	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Verificar que el floculante a utilizar no tenga una duración mayor a 48 horas. En caso contrario preparar Floculante a una concentración de 2 [g/L]	Técnico Especialista/Técnico Calificado
La pulpa a utilizar debe ser fresca, idealmente del mismo día.	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Disponer de mineral suficiente para preparar distintos %sólidos en probetas de 1000 ml	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Para pruebas con pulpas de proceso se recomienda tomar una muestra en un balde de 20 L para realizar pruebas a distintas dosis de floculante y/o distintos floculantes	Técnico Especialista/Técnico Calificado
La zona de trabajo debe estar limpia, ordenada y con el mínimo movimiento de las probetas antes de comenzar la tarea, y que exista el espacio suficiente para poder instalar una linterna con luz intensa.	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Lavar las probetas asegurándose que no queden residuos de pruebas anteriores	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Definir el porcentaje de sólidos para la prueba, en el caso de concentrado final, 20% de sólidos y para relaves 25% de sólidos. O se mantiene el sólido de la muestra tomada.	Técnico Especialista/Técnico Calificado

ELABORADO POR Patricio Gaete R. Técnico Especialista	REVISADO POR Nicolás Miranda M. Jefe de Unidad Laboratorio Metalúrgico CO	APROBADO POR Richard Araya G. Superintendente de Ingeniería y Procesos Planta
Fecha: 15-12-2014	Fecha: 21-03-2017	Fecha: 22-03-2017

Copia controlada emitida por (nombre y firma): Fecha:

SGO-F-GE-074.03

INSTRUCTIVO

SEDIMENTACIÓN DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN

CODIGO: SGO-IP-056 REVISION: 03 PAGINA: 2 de 3

DOCUMENTO DE REFERENCIA: Procedimiento SGI-P-IP-004 Control Integral de las Operaciones Ingeniería de Procesos

La dosis estándar para las pruebas de sedimentación es 10 [g/t]	Técnico Especialista/Técnico Calificado
A cada probeta de 1000 ml se la adosa una cinta de papel milimetrado a lo largo donde 1000 ml corresponden a 0 cm	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Paso 2 Durante	
Cargar la probeta con el mineral y agua (pulpa) cuidando de no derramar	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Agregar agua fresca y agitar hasta asegurarse que todo el mineral este completamente homogenizado, en el caso de pulpa solo colocar en la probeta	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Enrasar con agua (o pulpa dependiendo del caso) hasta completar el volumen de 1000 ml teniendo cuidado de evacuar el aire atrapado en el sólido	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Tapar y sellar equipo de sedimentación	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Verificar que el cronómetro esté funcionando y listo para correr	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Al utilizar floculante se deben calcular los g/t, para esto se debe usar la fórmula del anexo 3.1	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Dosificar en cada probeta los cc de floculante obtenidos para cada prueba. Al adicionar el floculante se debe extraer cc de agua de la misma probeta para diluir los cc/floculante. Siempre considerando los 1000 ml de la probeta enrasada.	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Re-pulpear en forma suave girando en 360° la probeta 20 veces	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Registrar cada 1 minuto los primeros 10 minutos para luego continuar cada 5 minutos hasta los 30 minutos la altura entre el agua clara y la pulpa versus el tiempo transcurrido en la tabla del anexo 3.2	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Con los resultados obtenidos determinar gráficamente el punto de compresión (altura entre fases constante), considerando como tiempo mínimo de la prueba 30 minutos y un máximo de 60 minutos	Técnico Especialista/Técnico Calificado
La velocidad de sedimentación corresponderá a la división entre la altura de agua clara al llegar al punto de compresión dividido por el tiempo transcurrido, el cual deberá ser indicado en la planilla Excel.	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Paso 3 Después	
Comunicar el término de la actividad al Supervisor de Primera Línea y/o Jefe de Laboratorio	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Informar estado y/o anomalías existentes en equipos y/o herramientas dejando registro fotográfico según corresponda	Técnico Especialista/Técnico Calificado

Figura D. 1. Instructivo sedimentación de sólidos en suspensión CODELCO Andina, primera parte.

CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA



SGO-F-GE-074.03

INSTRUCTIVO		
SEDIMENTACIÓN DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN		
CODIGO: SGO-I-IP-056	REVISION: 03	PAGINA: 3 de 3
DOCUMENTO DE REFERENCIA: Procedimiento SGI-P-IP-004 Control Integral de las Operaciones Ingeniería de Procesos		

Los residuos sólidos y líquidos deben ser dispuestos en sus lugares de almacenamiento temporal para su posterior devolución al proceso que corresponda.	Técnico Especialista/Técnico Calificado
Ingresar resultados a planilla Excel de sedimentación e informar resultados al Supervisor directo.	Técnico Especialista/Técnico Calificado

2. DESARROLLO

Este procedimiento busca establecer en estándar de trabajo para la ejecución de "**Sedimentación de sólidos en suspensión**", cuyo objetivo es poder determinar en forma segura y correcta la velocidad de sedimentación de una pulpa, evitando variaciones en los resultados debido a diferencia de criterios.

En este trabajo se debe desarrollar bajo condiciones de eficiencia, calidad y seguridad, evitando incidentes que pueden dañar a las personas, material y equipos de la División y Medio Ambiente manteniendo controlados los riesgos asociados a la actividad.

Este instructivo debe ser aplicado a todo personal del Laboratorio Metalúrgico de la Superintendencia de Ingeniería de Procesos y debe ser utilizado sólo en la tarea de: "**SGI-I-IP-056 Sedimentación de sólidos en suspensión**".

3. ANEXOS

3.1 Determinación del volumen de floculante

$$\text{Volumen [cm}^3\text{]} = \frac{\text{Mineral seco [g]} \cdot \text{Dosis de floculante } \left[\frac{\text{g}}{\text{TMS}} \right] \cdot \frac{1 \text{ [TMS]}}{10^6 \text{ [g]}}}{\text{Concentración solución madre de floculante } \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right] \cdot \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ cm}^3}}$$

Simplificando,

$$\text{Volumen [cm}^3\text{]} = \frac{\text{Mineral seco [g]} \cdot \text{Dosis de floculante } \left[\frac{\text{g}}{\text{TMS}} \right]}{\text{Concentración solución madre de floculante } \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right] \cdot 1000}$$

SGO-F-GE-074.03

INSTRUCTIVO		
SEDIMENTACIÓN DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN		
CODIGO: SGO-I-IP-056	REVISION: 03	PAGINA: 4 de 3
DOCUMENTO DE REFERENCIA: Procedimiento SGI-P-IP-004 Control Integral de las Operaciones Ingeniería de Procesos		

3.2 Tabla de registro de sedimentación

Tiempo [min]	Agua Clara [cm]	Altura de Pulpa [cm]	Tiempo [min]	Agua Clara [cm]	Altura de Pulpa [cm]
0			8		
1			9		
2			10		
3			15		
4			20		
5			25		
6			30		
7					

Figura D. 2. Instructivo sedimentación de sólidos en suspensión CODELCO Andina, segunda parte.

CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA



SIGO-F-GE-074.03

INSTRUCTIVO

MEDICIÓN DE TURBIDEZ

CODIGO: SIGO-I-IP-

REVISION: 01

PAGINA: 4 de 4

DOCUMENTO DE REFERENCIA: Procedimiento SIGO-I-IP-023 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

4. ANEXO

4.1 Recomendaciones de Trabajo:

- Si se la muestra presenta baja turbidez, se debe medir en modo "non ratio" (0-40[NTU]), de lo contrario, medir en modo "Ratio" (0-4000[NTU])
- Las cubetas deben ser manipuladas siempre utilizando guantes de latex, y limpiadas y engrasadas de ser necesario (para ocultar pequeñas imperfecciones de la cubeta), antes de las lecturas, para evitar cualquier contaminación de ellas que puedan interferir en la lectura del equipo y así minimizar los errores.
- Una vez realizadas las mediciones, se deben vaciar inmediatamente las cubetas y lavarlas para evitar que ellas queden manchadas de forma permanente.

4.2 Materiales y Equipos Requeridos:

Materiales e insumos

- Cubetas.
- Paño de limpieza.
- Aceite.



Figura 1. Cubetas.



Figura 2. Paño de Limpieza.



Figura 3. Aceite.

Equipos:

- Turbidímetro.



Figura 4. Turbidímetro.

SIGO-F-GE-074.03

INSTRUCTIVO

MEDICIÓN DE TURBIDEZ

CODIGO: SIGO-I-IP-

REVISION: 01

PAGINA: 5 de 4

DOCUMENTO DE REFERENCIA: Procedimiento SIGO-I-IP-023 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

Procedimiento:

- Seleccionar en el equipo método de medición adecuado. (Para sedimentaciones se recomienda usar método media)

Tabla 1. Métodos de medición turbidímetro.

Método de medición	Condiciones recomendadas
Normal	Muestra estable
Media	Muestra sedimentación rápida
Continua	Muestra con lectura inestable

- Depositar muestra en la cubeta de medición.
- Verificar que la cubeta no esté sucia o que el vidrio esté rallado. En caso de estar rallado, se debe recubrir con una capa del aceite de la Figura 3.
- Agitar la cubeta para homogenizar la muestra e introducir rápidamente la cubeta al equipo y pulsar el botón de medición
- Registrar el valor medido por el equipo.
- Repetir el procedimiento 2 a 3 veces, y reportar como valor de turbidez la media de los datos.

❖ Nota: Los valores obtenidos sólo sirven para comparar entre dos condiciones distintas.

5. REFERENCIAS

-Hanna Instruments. (31 de Enero de 2019). HI 83414 Medidor de Turbidez y Cloro Libre/Total.
-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (15 de Junio de 2007). Turbiedad por Nefelometría (Método B). Colombia.

Figura D. 3. Extracto instructivo turbidímetro HI83414 CODELCO Andina.

**“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL
ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”**



a) Cobre 114767
Test

Intervalo	0,10 – 6,00 mg/l de Cu	cubeta de 10 mm
de medida:	0,05 – 3,00 mg/l de Cu	cubeta de 20 mm
	0,02 – 1,20 mg/l de Cu	cubeta de 50 mm

Es posible expresar los resultados también en mmol/l.

b) Calcio 100858
Test en cubetas

Intervalo	10 – 250 mg/l de Ca
de medida:	14 – 350 mg/l de CaO
	25 – 624 mg/l de CaCO ₃

Es posible expresar los resultados también en mmol/l.

c) Aluminio 114825
Test

Intervalo	0,10 – 1,20 mg/l de Al	cubeta de 10 mm
de medida:	0,05 – 0,60 mg/l de Al	cubeta de 20 mm
	0,020 – 0,200 mg/l de Al	cubeta de 50 mm

Es posible expresar los resultados también en mmol/l.

d) Manganeso 100816
Test en cubetas

Intervalo	0,10 – 5,00 mg/l de Mn
------------------	------------------------

de medida: Es posible expresar los resultados también en mmol/l.

Figura D. 4. Procedimientos para mediciones en Spectroquant Nova 60A. a) iones Cu+2, b) iones Ca+2, c) iones Al+3, d) iones Mg+2 (Supelco Analytical Products, 2019).

CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



a) Sulfatos 114548
Test en cubetas

Intervalo 5–250 mg/l de SO_4
de medida: Es posible expresar los resultados también en mmol/l.

Filtrar las soluciones de la muestra turbias.

Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo necesario: pH 2–10. En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sódico o de ácido clorhídrico.

Pipetear 5,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción, cerrar con la tapa roscada y mezclar.

Añadir 1 microcuchara verde de $\text{SO}_4\text{-1K}$, cerrar con la tapa roscada.

Agitar intensamente la cubeta para disolver la sustancia sólida.

Tiempo de reacción: 2 minutos, medir inmediatamente.

Colocar la cubeta en el compartimiento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.

Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo necesario: pH 4–8. En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sódico o de ácido sulfúrico.

Pipetear 5,0 ml de la muestra en una cubeta redonda.

Añadir 1 microcuchara azul rasa de $\text{Cl}_2\text{-1}$, cerrar la cubeta con la tapa roscada.

Agitar intensamente la cubeta para disolver la sustancia sólida.

Tiempo de reacción: 1 minuto.

Colocar la cubeta en el compartimiento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.

b) Cloro 100595
Determinación de cloro libre
Test en cubetas

Intervalo 0,03–6,00 mg/l de Cl_2
de medida: Es posible expresar los resultados también en mmol/l.

c) Hierro 114896
Determinación de hierro(II) y hierro(III)
Test en cubetas

Intervalo 1,0–50,0 mg/l de Fe
de medida: Es posible expresar los resultados también en mmol/l, así como en Fe(II) y en Fe(III).

Determinación de hierro(II)

Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo necesario: pH 3–8. En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sódico o de ácido clorhídrico.

Pipetear 1,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción, cerrar con la tapa roscada y mezclar.

Tiempo de reacción: 5 minutos.

Colocar la cubeta en el compartimiento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.

Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo necesario: pH 3–8. En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sódico o de ácido clorhídrico.

Pipetear 1,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción y mezclar.

Añadir 1 dosis de Fe-1K con el dosificador azul, cerrar con la tapa roscada.

Agitar intensamente la cubeta para disolver la sustancia sólida.

Tiempo de reacción: 5 minutos.

Colocar la cubeta en el compartimiento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.

Determinación de hierro(II + III)

Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo necesario: pH 3–8. En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sódico o de ácido clorhídrico.

Pipetear 1,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción y mezclar.

Añadir 1 dosis de Fe-1K con el dosificador azul, cerrar con la tapa roscada.

Agitar intensamente la cubeta para disolver la sustancia sólida.

Tiempo de reacción: 5 minutos.

Colocar la cubeta en el compartimiento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.

En caso que se desee una diferenciación entre hierro(II) y hierro(III), ajustar el fotómetro a medición diferencial antes de la medición (seleccionar "forma citac"). Primeramente medir el hierro(II + III), luego pulsar la tecla Enter y medir el hierro(II). Tras pulsar de nuevo la tecla Enter se indican los valores individuales Fe II y Fe III.

Importante:
Para la determinación de hierro total es necesario efectuar una preparación de la muestra con Crack Set 10C, art. 114688 o Crack Set 10, art. 114687 y un termoreactor. El resultado puede expresarse como la suma de hierro (Σ de Fe).

Aseguramiento de la calidad:
Para comprobar el sistema de medición (reactivos del test, dispositivo de medición y manipulación) después la correspondiente dilución puede utilizarse la solución patrón de hierro lista para el uso Certipur®, art. 119781, concentración 1000 mg/l de Fe(III).

Fecha de emisión 09/2019 - Spectroquant® NOVA 60A

Figura D. 5. Procedimientos para mediciones en Spectroquant Nova 60A. a) iones SO_4^{2-} , b) iones Cl^- , c) iones Fe^{3+} (Supelco Analytical Products, 2019)

147

ALEJANDRA VERA APABLAZA

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE
CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



SGI-F-GE-074		
INSTRUCTIVO		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
CODIGO: SGI-I-GP-023	REVISION: 04	PAGINA: 2 de 4
INSTRUCCIONES A SEGUIR		
Se debe anotar en el libro de registro de actividades diarias del Laboratorio metalúrgico la fecha y el nombre de quién realiza la experiencia. Además los detalles del trabajo deben ser registrados en el libro correspondiente que se encuentra en el laboratorio.		
1. Previamente al realizar análisis granulométrico, se debe: • Recibir las instrucciones de acuerdo a programa de la Supervisión. De acuerdo a programa del laboratorio, se debe coordinar entre la supervisión y el Laboratorista respecto de las muestras a analizar. • Verificar que el área y sus equipos de trabajo se encuentre operativa. • Instruir al personal sobre la actividad a efectuar. • Verificar que se tome conocimiento de los riesgos asociados al realizar dicha actividad. • Antes de iniciar cualquier actividad, limpiar, ordenar y despejar el área de trabajo. • Verificar que los materiales y equipos a utilizar estén limpios, de no ser así limpiarlos. • Verificar que las herramientas y accesorios se encuentren en buenas condiciones • Retirar todo obstáculo que dificulte sus movimientos en su área de trabajo. • Verificar que en el laboratorio, el piso, plataformas, etc. Se encuentran en buenas condiciones, sin sustancias resbalosas como pulpa, agua, etc. 2. Preparar materiales y equipos a utilizar. • La muestra se deberá homogeneizar en el a paño roleador 60 veces por punta. • Se dividirá en dos paquetes de pesos iguales cada una, utilizando sólo un y la otra quedará como testigo. • Verificar que los pesos de las muestras cortadas se lo más uniforme posible, caso contrario, repetir el corte. • Verificar que los tamices pertenezcan la misma serie y que sea la serie adecuada, ver detalles en Tabla de Recomendaciones de Trabajo. • Verificar que los tamices no se encuentren rotos o tapados. • Verificar que el Ro-Tap se encuentre operativo. • Realizar los cuarteos solamente en la sala habilitada para ello. • Accionar el extractor de polvos para evitar la contaminación. • Uso obligatorio de respirador con los filtros en buen estado. • Verificar que en el laboratorio, el piso, plataformas, etc., se encuentren en buenas		

SGI-F-GE-074		
INSTRUCTIVO		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
CODIGO: SGI-I-GP-023	REVISION: 04	PAGINA: 3 de 4
condiciones, sin sustancias resbalosas como agua, pulpa, etc.		
3. Control de peso y granulométrico de la muestra. • Tarar la balanza a "cero" con el porta muestra incluida. • Pesar exactamente la muestra y registrar el valor en la planilla de trabajo. • Deslamar la muestra, recuperar el mineral sobre la malla . • Cargar la muestra a la serie de tamices y tamizar por 15 minutos en Ro- Tap, utilizando el set de tamices establecido, ver Tabla de Recomendaciones de trabajo. • Vaciar cada una de las fracciones retenida en el porta muestra de la balanza (una por vez). • Limpiar con la brocha por ambos lados de la malla, con el fin de retirar todos los granos atrapados en las aberturas de las mallas. • Pesar los retenidos de cada malla y anotarlos en la planilla de registro. • Verificar que las mallas no estén rotas ni tapadas. 4. Cálculo de porcentaje de retenidos y porcentaje de pasante • Calcular el porcentaje de muestra retenida para cada malla tomando como base 100% al total del peso de la muestra. • Anotar en la planilla de registro el valor obtenido. • Calcular el porcentaje de pasante para cada malla utilizando para esto: 100 - % del retenido de dicha malla • Transitar sólo por lugares habilitados y atentos a las condiciones del entorno al área. • Transitar con moderación, no correr. 5. Comunicar término de actividad. • Comunicar el término de la actividad al Supervisor del laboratorio. • Informar estado y/o anomalías existentes en equipos y/o herramientas. • Una vez secos los productos se deben pesar, registrar y preparar para análisis químico. 6. Realizar actividades de Orden y Limpieza. • Recoger todos los residuos industriales que se encuentren en el área de trabajo. • Trasladar los residuos industriales a los lugares de almacenamiento provistos para éstos. • Mantener el área limpia y ordenada. 7. Recomendaciones de Trabajo. • Utilizar los siguientes Sets de tamices para los casos indicados (Serie Tyler O		

Figura D. 6. Extracto instructivo análisis granulométrico CODELCO Andina, primera parte.

SGI-F-GE-074

INSTRUCTIVO		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
CODIGO: SGI-I-GP-023	REVISION: 04	PAGINA: 4 de 4
ASTM): Mallaje en seco para análisis completo, para alimentación, Concentrado y colas: #200, #270, #325, #400. Los residuos de minerales Sólidos y Líquidos deben tener sus lugares de almacenamiento temporal para su posterior devolución al proceso correspondiente.		
REGISTROS		REFERENCIAS
▪ No aplica.-		▪ No aplica.-

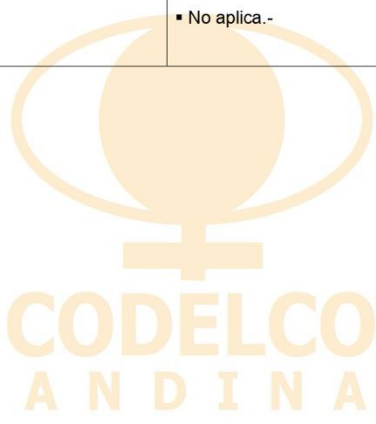


Figura D. 7. Extracto instructivo análisis granulométrico CODELCO Andina, segunda parte.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE
CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



Anexo E. Resultados experimentales.

Floculante	Floerger 913sh																	
Sólido inicial (Xs)	12%						17%						22%					
Dosis floculante [g/t]	9		14		19		9		14		19		9		14		19	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]					
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	10,90	11,40	10,50	11,50	12,20	11,20	4,30	4,00	4,10	4,10	4,90	5,10	1,60	1,70	3,00	3,00	4,50	4,50
2	16,20	16,30	15,20	16,20	16,30	16,30	8,00	8,10	7,80	7,80	8,70	9,00	3,20	3,70	5,60	5,20	6,40	6,40
3	17,40	17,30	16,50	17,50	17,50	17,60	10,30	10,20	10,50	10,50	11,30	11,30	5,00	5,50	8,00	7,30	8,20	8,20
4	18,00	17,90	17,30	18,10	18,20	18,20	12,00	11,90	12,10	12,10	12,70	12,50	6,70	7,40	9,60	9,20	10,30	10,20
5	18,50	18,30	17,80	18,50	18,60	18,70	12,90	12,60	13,00	13,00	13,50	13,40	8,00	8,60	10,50	10,30	10,40	10,70
6	18,70	18,50	18,10	18,90	19,00	19,00	13,50	13,10	13,70	13,70	14,00	14,00	9,10	9,40	11,20	11,20	11,00	11,00
7	19,00	18,70	18,40	19,20	19,30	19,30	13,90	13,60	14,20	14,20	14,50	14,40	9,60	10,00	11,60	11,70	11,50	11,50
8	19,30	19,00	18,70	19,40	19,50	19,50	14,20	14,00	14,50	14,50	14,90	14,90	10,30	10,50	12,00	12,20	11,90	11,90
9	19,50	19,20	18,90	19,60	19,80	19,70	14,50	14,20	14,90	14,90	15,20	15,20	10,60	10,80	12,40	12,60	12,20	12,20
10	19,60	19,30	19,10	19,80	20,00	19,90	14,70	14,50	15,20	15,20	15,50	15,40	11,00	11,20	12,70	12,90	12,50	12,50
15	20,20	19,90	19,80	20,30	20,40	20,30	15,80	15,30	16,70	16,70	16,60	16,40	12,20	12,20	13,70	14,00	13,70	13,70
20	20,50	20,20	20,10	20,70	20,70	20,60	16,30	16,00	17,00	17,00	17,20	17,10	12,90	13,00	14,40	14,60	14,20	14,20
25	20,70	20,30	20,30	20,90	20,90	20,70	16,80	16,40	17,40	17,40	17,60	17,50	13,60	13,40	14,70	15,00	14,70	14,70
30	20,90	20,50	20,50	21,00	21,00	20,80	17,10	16,70	17,80	17,80	17,90	17,90	14,10	13,90	15,10	15,40	15,10	15,10
Velocidad sedimentación [m/h]	3,48	3,46	3,30	3,50	3,50	3,52	2,06	2,04	2,10	2,10	2,26	2,26	0,96	1,03	1,44	1,38	1,53	1,53
Desv. Estándar	0,01		0,14		0,01		0,01		0,00		0,00		0,05		0,04		0,00	
Turbidez 10[min] [NTU]	200,00	213,50	201,50	204,00	191,50	195,00	202,00	203,00	194,50	196,00	182,00	187,00	192,50	200,00	305,50	74,20	175,00	176,50
Desv. Estándar	9,55		1,77		2,47		0,71		1,06		3,54		5,30		163,55		1,06	
Turbidez 30[min] [NTU]	122,00	133,00	52,60	165,00	92,00	101,00	137,50	129,85	86,20	85,90	61,00	63,40	112,00	126,00	135,50	30,20	64,80	60,60
Desv. Estándar	7,78		79,48		6,36		5,41		0,21		1,70		9,90		74,46		2,97	

Tabla E. 1. Resultados pruebas sedimentación para relave total con floculante Floerger 913sh; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE
CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



Floculante	Rheomax 1050																	
Sólido inicial (Xs)	12%						17%						22%					
Dosis floculante [g/t]	9		14		19		9		14		19		9		14		19	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]					
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	7,20	7,10	10,30	10,40	11,70	11,60	6,20	6,10	8,10	8,00	9,20	9,20	6,00	6,10	7,90	7,70	8,40	8,50
2	11,80	12,70	14,40	14,40	13,50	14,30	8,50	8,50	11,20	11,00	11,70	11,60	7,80	8,00	11,50	11,70	12,00	12,10
3	14,30	14,90	16,00	16,00	15,50	15,80	10,90	11,00	13,50	13,70	13,40	13,50	9,70	9,80	12,80	12,70	13,30	13,40
4	15,50	15,90	16,80	16,90	15,90	16,60	12,10	12,20	14,10	14,30	14,50	14,30	11,40	11,60	13,50	13,60	14,00	14,10
5	16,00	16,50	17,30	17,30	16,40	17,10	12,90	12,90	15,00	15,20	15,30	15,20	12,80	12,90	13,90	14,10	14,40	14,50
6	16,50	16,90	17,70	17,80	16,80	17,50	13,50	13,50	15,70	15,80	16,00	15,90	13,60	13,80	14,20	14,30	14,70	14,80
7	16,80	17,20	18,00	18,10	17,20	17,90	13,90	13,90	16,30	16,40	16,70	16,50	14,10	14,20	14,50	14,60	15,00	15,10
8	17,20	17,50	18,40	18,40	17,50	18,20	14,30	14,30	16,70	16,90	17,00	16,90	14,50	14,80	14,80	15,00	15,30	15,40
9	17,40	17,70	18,50	18,50	17,70	18,30	14,50	14,50	16,90	17,10	17,20	17,10	14,90	15,10	14,90	15,10	15,40	15,50
10	17,50	17,90	18,70	18,70	17,90	18,60	14,70	14,80	17,20	17,40	17,40	17,30	15,30	15,50	15,00	15,30	15,50	15,60
15	17,70	18,00	18,90	18,90	18,70	19,20	15,70	15,80	17,20	17,60	17,50	17,40	16,40	16,70	15,80	15,80	16,30	16,40
20	18,30	18,10	19,50	19,40	19,00	19,60	16,30	16,40	17,80	17,90	17,90	18,00	17,10	17,40	16,00	16,00	16,50	16,60
25	18,70	19,00	19,80	19,90	19,20	19,80	16,70	16,80	18,20	18,00	18,30	18,40	17,60	17,80	16,60	16,40	17,10	17,20
30	19,00	19,20	20,00	20,10	19,40	20,10	17,10	17,10	18,40	18,20	18,70	18,80	18,00	18,20	16,80	16,60	17,30	17,40
Velocidad sedimentación [m/h]	4,32	4,26	6,18	6,24	7,02	6,96	3,72	3,66	4,86	4,80	5,52	5,52	1,71	1,74	2,56	2,54	3,60	3,63
Desv. Estándar	0,04		0,04		0,04		0,04		0,04		0,00		0,02		0,01		0,02	
Turbidez 10[min] [NTU]	337,50	216,50	298,00	287,00	241,00	285,00	293,50	256,00	293,00	296,50	247,50	275,50	258,00	258,00	299,00	288,50	245,00	236,50
Desv. Estándar	85,56		7,78		31,11		26,52		2,47		19,80		0,00		7,42		6,01	
Turbidez 30[min] [NTU]	45,00	40,15	32,40	34,05	31,50	31,50	36,80	34,35	29,10	29,15	34,75	19,10	36,05	37,80	24,00	24,00	25,10	26,20
Desv. Estándar	3,43		1,17		0,00		1,73		0,04		11,07		1,24		0,00		0,78	

Tabla E. 2. Resultados pruebas sedimentación para relave total con floculante Rheomax 1050; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE
CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



Floculante	Magnafloc 338																	
Sólido inicial (Xs)	12%						17%						22%					
Dosis floculante [g/t]	9		14		19		9		14		19		9		14		19	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]					
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	5,70	5,60	5,70	6,10	5,50	6,50	3,00	3,00	3,00	3,30	3,20	3,50	1,10	1,30	1,40	1,50	1,40	1,80
2	9,70	10,70	10,50	11,00	10,00	11,10	5,70	5,70	6,20	6,60	6,50	6,90	2,90	3,10	3,30	3,30	3,00	3,50
3	12,50	13,50	13,20	13,60	12,80	13,80	8,40	8,20	8,80	9,20	9,10	9,50	4,70	4,90	5,40	5,10	4,60	5,00
4	14,40	15,10	14,80	15,10	14,20	15,10	10,40	10,20	10,60	11,00	10,80	11,20	6,40	6,10	7,20	6,90	6,10	6,70
5	15,30	15,80	15,50	15,80	15,00	15,90	11,60	11,50	11,50	12,00	11,80	12,00	7,90	8,10	8,60	8,40	7,60	8,10
6	15,80	16,30	16,10	16,40	15,60	16,50	12,50	12,50	12,20	12,90	12,50	12,80	8,90	9,10	9,50	9,30	8,90	9,30
7	16,30	16,70	16,50	16,70	16,00	16,90	13,00	13,00	12,80	13,30	13,10	13,40	9,50	9,90	10,20	10,00	9,80	10,20
8	16,80	17,10	16,90	17,10	16,40	17,20	13,50	13,50	13,10	13,70	13,50	13,70	10,00	10,50	10,60	10,50	10,30	10,90
9	17,00	17,40	17,10	17,40	16,70	17,50	13,80	13,80	13,50	14,00	13,80	14,10	10,40	10,80	11,00	10,80	10,70	11,30
10	17,20	17,50	17,30	17,60	17,00	17,80	14,20	14,20	13,80	14,30	14,10	14,40	10,70	11,20	11,40	11,20	11,10	11,70
15	18,00	18,30	18,20	18,40	17,80	18,60	15,10	15,20	14,90	15,50	15,40	15,50	11,90	12,40	12,50	12,50	12,30	12,90
20	18,50	18,70	18,70	18,90	18,30	19,00	15,80	15,90	15,60	16,30	16,10	16,20	12,50	13,00	13,30	13,20	13,00	13,60
25	18,90	19,20	19,10	19,30	18,70	19,30	16,20	16,30	16,20	16,80	16,60	16,80	13,20	13,60	13,80	13,80	13,50	14,20
30	19,10	19,40	19,30	19,50	18,90	19,50	16,60	16,70	16,50	17,20	17,00	17,00	13,70	14,00	14,30	14,30	13,80	14,50
Velocidad sedimentación [m/h]	2,50	2,70	2,64	2,72	2,56	2,76	1,39	1,38	1,38	1,44	1,42	1,44	0,89	0,91	0,95	0,93	0,89	0,93
Desv. Estándar	0,14		0,06		0,14		0,01		0,04		0,01		0,01		0,01		0,03	
Turbidez 10[min] [NTU]	535,00	545,00	494,00	478,00	645,50	275,50	528,00	532,50	455,50	467,00	438,00	468,00	526,50	533,50	444,00	409,00	407,00	397,50
Desv. Estándar	7,07		11,31		261,63		3,18		8,13		21,21		4,95		24,75		6,72	
Turbidez 30[min] [NTU]	39,80	50,15	32,75	42,85	38,00	34,95	42,50	40,25	37,75	34,65	35,45	33,60	41,35	35,55	33,05	33,45	33,50	32,50
Desv. Estándar	7,32		7,14		2,16		1,59		2,19		1,31		4,10		0,28		0,71	

Tabla E. 3. Resultados pruebas sedimentación para relave total con floculante Magnafloc 338; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE
CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



Floculante	Magnafloc 333																	
Sólido inicial (Xs)	12%						17%						22%					
Dosis floculante [g/t]	9		14		19		9		14		19		9		14		19	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]					
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	6,90	7,40	8,50	9,30	7,40	8,80	3,10	3,30	3,50	4,00	4,20	4,30	1,35	1,70	1,70	1,70	1,90	1,90
2	12,50	13,20	13,60	14,00	12,80	13,80	7,50	7,70	7,40	8,50	8,40	8,50	3,50	3,70	3,70	3,70	3,60	3,90
3	14,90	15,40	15,50	16,00	14,60	15,40	10,10	10,30	10,10	10,80	11,00	11,10	5,50	5,70	6,00	5,70	5,40	5,80
4	15,80	16,60	16,60	16,90	15,60	16,30	11,60	11,80	11,60	12,30	12,40	12,50	7,60	7,80	8,20	7,90	7,20	7,60
5	16,40	17,00	17,00	17,40	16,10	16,80	13,00	12,50	12,50	13,20	13,20	13,40	8,90	9,20	9,40	9,20	8,60	9,00
6	16,80	17,40	17,40	17,70	16,50	17,20	12,90	13,00	13,00	13,60	13,70	13,90	9,70	10,10	10,20	10,10	9,50	9,90
7	17,10	17,80	17,80	18,10	16,90	17,60	13,30	13,50	13,50	14,20	14,20	14,30	10,20	10,70	10,80	10,70	10,10	10,60
8	17,40	18,00	18,00	18,30	17,10	17,80	13,70	13,80	13,90	14,50	14,60	14,70	10,70	11,20	11,20	11,20	10,60	11,10
9	17,60	18,30	18,40	18,60	17,40	18,10	14,00	14,10	14,20	14,90	14,90	15,00	11,00	11,50	11,60	11,60	11,00	11,50
10	17,90	18,50	18,50	18,80	17,50	18,30	14,30	14,40	14,40	15,10	15,20	15,30	11,30	11,80	11,91	11,80	11,30	11,80
15	18,50	19,10	19,20	19,40	18,40	19,00	15,10	15,20	15,40	16,10	16,20	16,30	12,60	13,20	13,20	13,20	12,60	13,00
20	18,90	19,60	19,70	19,80	18,80	19,40	15,70	15,80	16,10	16,70	16,80	17,00	13,20	13,80	13,80	13,80	13,40	13,90
25	19,30	20,00	19,90	20,20	19,00	19,60	16,10	16,20	16,60	17,30	17,40	17,50	13,70	14,30	14,30	14,20	14,00	14,50
30	19,50	20,10	20,00	20,40	19,30	19,90	16,50	16,60	16,90	17,50	17,60	17,80	14,20	14,80	14,80	14,70	14,50	15,00
Velocidad sedimentación [m/h]	2,98	3,08	3,10	3,20	2,92	3,08	1,56	1,50	1,50	1,58	1,58	1,61	0,97	1,01	1,02	1,01	0,95	0,99
Desv. Estándar	0,07		0,07		0,11		0,04		0,06		0,02		0,03		0,01		0,03	
Turbidez 10[min] [NTU]	500,50	582,50	489,00	566,00	518,00	503,50	554,50	549,00	396,00	591,50	450,50	472,50	529,00	537,00	493,00	451,50	446,00	443,00
Desv. Estándar	57,98		54,45		10,25		3,89		138,24		15,56		5,66		29,34		2,12	
Turbidez 30[min] [NTU]	40,85	42,60	38,50	32,95	31,10	35,05	41,75	39,00	33,50	36,00	32,65	34,00	42,35	42,30	36,85	37,55	35,70	28,45
Desv. Estándar	1,24		3,92		2,79		1,94		1,77		0,95		0,04		0,49		5,13	

Tabla E. 4. Resultados pruebas sedimentación para relave total con floculante Magnafloc 333; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE
CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



Floculante	Floerger 913sh																	
Sólido inicial (Xs)	15%						20%						25%					
Dosis floculante [g/t]	5		10		15		5		10		15		5		10		15	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]					
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	18,70	18,50	19,60	19,70	19,30	18,20	14,60	15,50	19,30	18,20	15,30	16,70	10,10	10,20	10,10	9,30	10,90	10,70
2	20,50	20,70	21,00	20,60	21,00	20,20	17,90	17,90	21,00	20,20	18,50	18,90	15,50	15,20	15,40	14,40	15,60	15,30
3	21,40	21,40	21,70	21,20	21,70	21,10	19,00	18,80	21,70	21,10	19,30	19,70	17,90	17,70	17,80	17,00	17,30	17,30
4	21,80	21,80	22,00	21,40	22,20	21,60	19,50	19,20	22,20	21,60	19,70	20,20	18,40	18,40	18,30	17,80	18,00	18,00
5	22,00	22,10	22,30	21,70	22,30	21,90	19,80	19,50	22,30	21,90	20,00	20,40	18,90	18,90	18,70	18,40	18,40	18,50
6	22,20	22,30	22,50	21,80	22,50	22,00	20,10	19,70	22,50	22,00	20,20	20,60	19,20	19,20	18,90	18,70	18,70	18,70
7	22,30	22,50	22,60	22,00	22,60	22,20	20,20	19,90	22,60	22,20	20,40	20,70	19,40	19,40	19,10	19,00	18,90	19,00
8	22,40	22,60	22,70	22,10	22,70	22,40	20,40	20,00	22,70	22,40	20,50	20,90	19,70	19,70	19,20	19,20	19,00	19,20
9	22,50	22,70	22,80	22,10	22,80	22,50	20,50	20,10	22,80	22,50	20,50	20,90	20,10	19,80	19,30	19,40	19,20	19,40
10	22,50	22,70	22,80	22,30	22,80	22,50	20,60	20,10	22,80	22,50	20,60	21,00	20,20	20,00	19,80	19,50	19,40	19,50
15	22,60	22,90	22,90	22,30	22,90	22,60	20,90	20,40	22,90	22,60	20,70	21,10	20,50	20,20	19,90	19,90	19,70	19,80
20	22,70	22,90	23,00	22,40	22,90	22,70	21,10	20,50	22,90	22,70	20,70	21,20	20,60	20,40	20,00	20,00	19,80	19,90
25	22,80	23,00	23,00	22,40	22,90	22,70	21,10	20,60	22,90	22,70	20,80	21,30	20,70	20,50	20,00	20,10	19,90	19,90
30	22,80	23,00	23,00	22,40	22,90	22,70	21,20	20,60	22,90	22,70	20,80	21,30	20,70	20,50	20,10	20,10	19,90	20,00
Velocidad sedimentación [m/h]	6,15	6,21	6,30	6,18	6,30	6,06	5,37	5,37	5,61	5,61	5,55	5,67	3,58	3,54	3,56	3,40	3,46	3,46
Desv. Estándar	0,04		0,08		0,17		0,00		0,00		0,08		0,03		0,11		0,00	
Turbidez 10[min] [NTU]	134,00	131,00	121,50	75,90	61,65	49,25	151,00	110,50	78,85	78,90	51,20	55,75	86,20	83,05	65,70	62,80	44,25	43,00
Desv. Estándar	2,12		32,24		8,77		28,64		0,04		3,22		2,23		2,05		0,88	
Turbidez 30[min] [NTU]	76,95	77,95	41,70	43,25	26,70	23,00	55,65	50,10	33,10	46,30	27,60	21,35	32,85	32,05	37,20	16,45	24,95	25,75
Desv. Estándar	0,71		1,10		2,62		3,92		9,33		4,42		0,57		14,67		0,57	

Tabla E. 5. Resultados pruebas sedimentación para concentrado final con floculante Floerger 913sh; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE
CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



Floculante	Rheomax 1050																	
Sólido inicial (Xs)	15%						20%						25%					
Dosis floculante [g/t]	5		10		15		5		10		15		5		10		15	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]					
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	18,90	19,80	19,70	20,10	19,50	19,70	16,10	16,60	16,10	17,00	17,20	17,30	10,60	12,10	11,60	12,10	10,90	13,20
2	20,80	21,40	21,00	21,40	21,10	21,20	19,20	19,50	18,60	19,10	19,00	19,10	15,10	16,00	15,60	16,10	16,20	17,40
3	21,30	21,80	21,60	21,90	21,50	21,60	19,90	20,10	19,40	19,90	19,80	20,00	17,40	18,00	17,60	18,00	17,40	18,40
4	21,60	22,00	21,80	22,20	21,70	21,90	20,40	20,60	19,90	20,40	20,30	20,50	18,10	18,70	18,40	18,70	18,20	19,00
5	21,80	22,20	22,00	22,30	21,90	22,00	20,60	20,90	20,20	20,60	20,60	20,80	18,60	19,20	18,90	19,10	18,50	19,50
6	21,90	22,30	22,10	22,50	22,00	22,20	20,90	21,10	20,30	20,80	20,80	21,00	18,90	19,50	19,20	19,50	18,50	19,70
7	22,00	22,40	22,20	22,50	22,00	22,20	21,00	21,20	20,50	21,00	20,90	21,10	19,10	19,60	19,40	19,60	19,00	19,90
8	22,00	22,40	22,20	22,50	22,00	22,20	21,10	21,30	20,70	21,10	21,00	21,20	19,20	19,70	19,50	19,70	19,10	20,00
9	22,00	22,40	22,20	22,50	22,00	22,20	21,20	21,40	20,70	21,10	21,00	21,20	19,30	19,90	19,70	19,90	19,20	20,10
10	22,00	22,40	22,20	22,50	22,00	22,30	21,30	21,40	20,70	21,10	21,00	21,20	19,50	20,10	19,80	20,10	19,30	20,40
15	22,10	22,50	22,30	22,60	22,10	22,30	21,40	21,60	20,80	21,20	21,10	21,30	19,60	20,10	19,90	20,10	19,50	20,40
20	22,10	22,50	22,30	22,60	22,10	22,30	21,40	21,60	20,90	21,20	21,10	21,30	20,00	20,50	20,10	20,40	19,60	20,40
25	22,10	22,50	22,30	22,60	22,10	22,30	21,50	21,60	20,90	21,30	21,10	21,30	20,10	20,50	20,20	20,60	19,60	20,50
30	22,10	22,50	22,30	22,60	22,10	22,30	21,50	21,60	20,90	21,30	21,12	21,30	20,10	20,50	20,20	20,60	19,60	20,50
Velocidad sedimentación [m/h]	6,24	6,42	6,30	6,42	6,33	6,36	5,76	5,85	5,58	5,73	5,70	5,73	3,48	3,60	3,52	3,60	3,48	3,68
Desv. Estándar	0,13		0,08		0,02		0,06		0,11		0,02		0,08		0,06		0,14	
Turbidez 10[min] [NTU]	118,70	125,05	81,30	78,45	50,75	61,75	145,00	138,50	102,00	111,00	90,00	63,50	139,50	140,50	105,00	104,00	63,80	68,25
Desv. Estándar	4,49		2,02		7,78		4,60		6,36		18,74		0,71		0,71		3,15	
Turbidez 30[min] [NTU]	49,80	40,25	42,40	40,80	26,55	28,70	44,00	44,95	27,35	50,35	21,75	24,45	21,15	29,30	24,05	18,50	25,25	11,55
Desv. Estándar	6,75		1,13		1,52		0,67		16,26		1,91		5,76		3,92		9,69	

Tabla E. 6. Resultados pruebas sedimentación para concentrado final con floculante Rheomax 1050; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE
CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



Floculante	Magnafloc 338																	
Sólido inicial (Xs)	15%						20%						25%					
Dosis floculante [g/t]	5		10		15		5		10		15		5		10		15	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]					
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	17,50	19,80	19,90	20,00	18,80	19,40	13,20	13,20	12,80	16,30	14,90	13,90	12,10	11,50	11,70	11,70	11,70	12,00
2	20,20	21,40	21,20	21,30	20,30	21,10	18,60	19,70	17,00	19,20	18,10	17,80	16,10	16,10	16,10	16,10	16,70	16,80
3	21,00	22,00	21,80	22,00	21,00	21,60	19,70	20,50	18,60	20,10	19,20	19,00	17,70	17,90	17,80	17,80	17,90	18,10
4	21,20	22,20	22,00	22,20	21,30	21,90	20,00	20,90	19,20	20,60	19,80	19,70	18,20	18,50	18,40	18,40	18,60	18,70
5	21,40	22,40	22,20	22,40	21,50	22,00	20,40	21,10	19,40	20,90	20,00	19,90	18,50	18,80	18,70	18,70	19,00	19,00
6	21,60	22,50	22,30	22,40	21,60	22,10	20,60	21,30	19,80	21,10	20,30	20,20	18,70	19,10	18,90	18,90	19,20	19,30
7	21,70	22,60	22,30	22,50	21,70	22,20	20,80	21,40	20,00	21,20	20,40	20,40	19,00	19,30	19,20	19,20	19,40	19,50
8	21,80	22,60	22,30	22,60	21,70	22,20	20,90	21,50	20,10	22,40	20,50	20,50	19,10	19,50	19,30	19,30	19,50	19,60
9	21,80	22,60	22,40	22,60	21,70	22,20	21,00	21,50	20,20	22,40	20,60	20,60	19,30	19,70	19,40	19,40	19,60	19,80
10	21,80	22,70	22,40	22,60	21,80	22,20	21,00	21,70	20,30	22,50	20,70	20,70	19,30	19,90	19,40	19,40	19,60	19,90
15	21,90	22,70	22,50	22,70	21,90	22,30	21,30	21,90	20,60	22,60	20,80	20,90	19,60	20,00	19,70	19,70	19,80	20,10
20	22,00	22,70	22,50	22,70	21,90	22,30	21,30	21,90	20,70	22,60	20,90	21,00	19,70	20,00	19,70	19,70	19,80	20,10
25	22,00	22,70	22,50	22,70	21,90	22,30	21,30	21,90	20,70	22,60	20,90	21,00	19,70	20,00	19,70	19,70	19,90	20,10
30	22,00	22,70	22,50	22,70	21,90	22,30	21,30	21,90	20,70	22,60	20,90	21,00	19,70	20,00	19,70	19,70	19,90	20,10
Velocidad sedimentación [m/h]	6,06	6,42	6,36	6,39	6,09	6,33	5,58	5,91	5,10	5,76	5,43	5,34	3,54	3,58	3,56	3,56	3,58	3,62
Desv. Estándar	0,25		0,02		0,17		0,23		0,47		0,06		0,03		0,00		0,03	
Turbidez 10[min] [NTU]	116,50	160,50	99,90	109,00	103,00	77,20	109,50	130,50	108,50	75,70	82,90	95,50	99,50	105,00	95,70	95,70	57,90	121,00
Desv. Estándar	31,11		6,43		18,24		14,85		23,19		8,91		3,89		0,00		44,62	
Turbidez 30[min] [NTU]	35,45	81,30	45,30	45,30	31,00	39,05	46,15	50,00	33,40	30,60	28,55	26,30	31,50	36,70	32,30	32,30	25,50	24,45
Desv. Estándar	32,42		0,00		5,69		2,72		1,98		1,59		3,68		0,00		0,74	

Tabla E. 7. Resultados pruebas sedimentación para concentrado final con floculante Magnafloc 338; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL ESPESAMIENTO DE
CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”



Floculante	Magnafloc 333																	
Sólido inicial (Xs)	15%						20%						25%					
Dosis floculante [g/t]	5		10		15		5		10		15		5		10		15	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]						Altura agua clara [cm]					
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	19,50	19,40	19,60	19,70	19,00	19,00	14,40	15,00	15,20	16,10	15,80	16,60	10,20	11,20	11,50	11,70	9,80	10,90
2	21,70	21,30	21,10	21,20	20,70	20,70	18,50	18,90	19,00	19,70	19,20	19,40	15,80	16,60	16,70	17,00	14,40	15,40
3	22,30	21,80	21,60	21,70	21,30	21,40	19,70	20,00	20,00	20,60	20,10	20,40	17,50	17,80	17,70	18,00	16,80	17,40
4	22,50	22,00	21,80	22,00	21,60	21,70	20,20	20,40	20,40	21,00	20,60	20,90	17,90	18,20	18,20	18,40	17,50	18,10
5	22,70	22,10	21,90	22,10	21,80	21,90	20,40	20,70	20,80	21,30	20,90	21,20	18,50	18,70	18,70	18,90	18,00	18,60
6	22,80	22,20	22,00	22,20	22,00	22,10	20,80	20,90	20,90	21,40	21,10	21,40	18,80	19,10	18,90	19,20	18,30	18,90
7	22,90	22,30	22,10	22,20	22,10	22,20	20,90	21,10	21,10	21,60	21,20	21,60	19,00	19,30	19,20	19,40	18,70	19,20
8	23,00	22,30	22,10	22,30	22,10	22,20	21,00	21,20	21,20	21,70	21,40	21,70	19,20	19,50	19,40	19,60	18,80	19,40
9	23,00	22,30	22,10	22,30	22,20	22,30	21,20	21,40	21,30	21,80	21,40	21,70	19,40	19,60	19,50	19,80	19,00	19,50
10	23,10	22,30	22,10	22,40	22,20	22,30	21,20	21,40	21,40	21,80	21,50	21,80	19,60	19,80	19,70	19,90	19,10	19,70
15	23,10	22,40	22,20	22,40	22,30	22,40	21,50	21,40	21,50	21,90	21,60	21,90	20,00	20,20	20,10	20,40	19,60	20,10
20	23,10	22,40	22,20	22,40	22,30	22,40	21,60	21,70	21,50	22,00	21,60	22,00	20,20	20,30	20,20	20,40	19,80	20,20
25	23,10	22,40	22,20	22,40	22,30	22,40	21,60	21,70	21,50	22,00	21,60	22,00	20,30	20,40	20,20	20,50	19,80	20,20
30	23,10	22,40	22,20	22,40	22,30	22,40	21,60	21,70	21,50	22,00	21,60	22,00	20,30	20,40	20,20	20,50	19,80	20,20
Velocidad sedimentación [m/h]	6,51	6,36	6,33	6,36	6,21	6,21	5,55	5,67	5,70	5,91	5,76	5,82	3,50	3,56	3,54	3,60	3,36	3,48
Desv. Estándar	0,11		0,02		0,00		0,08		0,15		0,04		0,04		0,04		0,08	
Turbidez 10[min] [NTU]	92,45	124,50	94,25	110,00	96,50	93,00	81,50	82,50	76,10	72,15	66,05	67,90	83,20	82,00	76,00	68,50	64,00	66,00
Desv. Estándar	22,66		11,14		2,47		0,71		2,79		1,31		0,85		5,30		1,41	
Turbidez 30[min] [NTU]	44,15	45,15	33,60	37,60	33,70	33,50	45,85	44,40	33,85	38,05	23,30	30,25	43,60	37,70	33,60	34,60	24,65	26,05
Desv. Estándar	0,71		2,83		0,14		1,03		2,97		4,91		4,17		0,71		0,99	

Tabla E. 8. Resultados pruebas sedimentación para concentrado final con floculante Magnafloc 333; O: prueba original, D: prueba duplicado.

**“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL
ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”**

Pulpa	Relave total									
Floculante	Floerger 913sh									
pH	4,6		6,5		8,5		10,6		12,6	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]									
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	2,60	2,80	4,40	4,00	3,80	4,00	4,10	4,00	4,90	5,10
2	3,90	4,10	7,50	7,10	7,50	7,90	7,80	7,80	8,70	9,00
3	5,40	5,60	9,70	9,20	10,40	10,60	10,50	10,70	11,10	11,00
4	5,90	6,10	10,50	11,90	11,90	12,10	12,10	11,70	12,70	12,50
5	6,40	6,70	11,30	12,60	12,70	13,20	13,00	12,60	13,50	13,40
6	7,20	8,20	12,00	13,10	13,30	12,80	13,70	13,30	14,00	14,00
7	7,90	8,70	12,80	13,60	13,90	14,50	14,20	13,70	14,50	14,40
8	8,80	9,20	15,00	14,00	14,30	14,80	14,50	14,20	14,90	14,90
9	9,60	9,20	15,90	14,20	14,60	15,10	14,90	14,40	15,20	15,20
10	10,20	10,10	16,30	14,50	15,60	15,30	15,20	14,70	15,50	15,40
15	13,20	13,30	15,00	15,30	16,30	16,50	16,70	15,70	16,60	16,40
20	14,70	14,10	16,20	16,00	16,90	17,00	17,00	16,40	17,20	17,10
25	15,30	15,20	16,90	16,40	17,20	17,30	17,40	16,80	17,60	17,50
30	15,70	15,90	17,10	16,70	17,50	17,60	17,80	17,20	17,90	17,90
Velocidad sedimentación [m/h]	1,08	1,12	1,94	1,84	2,08	2,12	2,10	2,14	2,22	2,20
Desv. Estándar	0,03		0,07		0,03		0,03		0,01	
Turbidez 10[min] [NTU]			207,50	210,50	176,50	183,00	140,50	99,50	69,95	173,50
Desv. Estándar			2,12		4,60		28,99		73,22	
Turbidez 30[min] [NTU]	115,00	237,00	124,50	103,50	77,60	90,00	39,25	40,10	37,40	31,85
Desv. Estándar	86,27		14,85		8,77		0,60		3,92	

Tabla E. 9. Resultados pruebas sedimentación para relave total con variación de pH; floculante Floerger 913sh; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL
ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”

Pulpa	Relave total									
Floculante	Rheomax 1050									
pH	4,6		6,5		8,5		10,6		12,6	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]									
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	7,40	7,60	7,80	8,10	8,00	8,20	7,90	8,10	8,00	8,10
2	9,50	9,70	9,90	10,20	10,10	10,30	10,90	11,10	11,00	11,20
3	12,30	12,50	12,70	13,00	12,90	12,80	13,20	13,40	13,30	13,50
4	13,00	13,20	13,40	13,70	13,60	13,40	13,80	14,00	13,90	14,10
5	14,50	14,70	14,90	15,20	15,10	15,10	14,70	14,90	14,80	15,00
6	15,20	15,40	15,60	15,90	15,80	16,00	15,40	15,60	15,50	15,70
7	15,60	15,80	16,00	16,30	16,20	16,80	16,00	16,20	16,10	16,30
8	16,20	16,40	16,60	16,90	16,80	17,10	16,40	16,60	16,50	16,70
9	16,50	16,70	16,90	17,20	17,10	17,30	16,60	16,80	16,70	16,90
10	16,90	17,10	17,30	17,60	17,50	17,50	16,90	17,10	17,00	17,20
15	17,20	17,40	17,60	17,90	17,80	17,80	16,90	17,10	17,00	17,20
20	17,30	17,50	17,70	18,00	17,90	18,00	17,50	17,70	17,60	17,80
25	17,40	17,60	17,80	18,10	18,00	18,10	17,90	18,10	18,00	18,20
30	17,70	17,90	18,10	18,40	18,30	18,20	18,10	18,30	18,20	18,40
Velocidad sedimentación [m/h]	4,44	4,56	4,68	4,86	4,80	4,92	4,74	4,86	4,80	4,86
Desv. Estándar	0,08		0,13		0,08		0,08		0,04	
Turbidez 10[min] [NTU]	618,00	609,00	356,50	347,50	324,00	349,50	320,00	313,00	226,50	261,00
Desv. Estándar	6,36		6,36		18,03		4,95		24,40	
Turbidez 30[min] [NTU]	149,00	102,00	71,45	109,50	65,05	125,50	24,80	54,60	25,00	28,75
Desv. Estándar	33,23		26,91		42,74		21,07		2,65	

Tabla E. 10. Resultados pruebas sedimentación para relave total con variación de pH; floculante Rheomax 1050; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL
ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”

Pulpa	Relave total									
Floculante	Magnaflor 338									
pH	4,6		6,5		8,5		10,6		12,6	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]									
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,30	1,20	1,10	1,20	1,40	1,60	2,20	2,20	2,50	2,50
2	2,30	2,30	2,90	3,50	3,30	3,50	4,50	4,50	5,00	5,00
3	3,30	3,50	4,70	4,50	5,40	5,60	6,70	6,60	7,30	7,50
4	4,30	4,50	6,40	5,30	7,20	7,40	8,70	8,70	9,20	9,50
5	5,10	5,30	7,90	6,40	8,80	9,00	9,90	10,00	10,60	10,90
6	6,20	6,40	8,90	7,40	9,50	9,70	10,80	10,90	11,60	11,80
7	7,10	7,40	9,50	8,20	10,20	10,40	11,40	11,60	12,10	12,40
8	7,80	8,20	10,00	9,00	10,60	10,80	12,00	12,00	12,60	12,90
9	8,60	9,00	10,40	9,80	11,00	11,20	12,30	12,50	13,00	13,30
10	9,40	9,80	10,70	13,30	11,40	11,60	12,70	12,90	13,30	13,60
15	12,90	13,30	11,90	14,20	12,50	12,70	14,10	14,30	14,40	14,70
20	13,90	14,20	12,50	14,90	13,30	13,50	14,90	15,00	15,20	15,40
25	14,50	14,90	13,20	15,40	13,80	14,00	15,50	15,60	15,60	15,90
30	15,00	15,40	13,70	0,00	14,30	14,50	15,90	16,00	16,00	16,30
Velocidad sedimentación [m/h]	0,61	0,64	0,95	0,77	1,06	1,08	1,19	1,20	1,27	1,31
Desv. Estándar	0,02		0,13		0,01		0,01		0,03	
Turbidez 10[min] [NTU]			724,00	733,00	782,50	678,50	719,00	674,00	626,50	663,00
Desv. Estándar	#¡DIV/0!		6,36		73,54		31,82		25,81	
Turbidez 30[min] [NTU]	572,50	562,00	171,00	181,00	40,65	48,50	47,95	55,35	55,00	63,00
Desv. Estándar	7,42		7,07		5,55		5,23		5,66	

Tabla E. 11. Resultados pruebas sedimentación para relave total con variación de pH; floculante Magnaflor 338; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL
ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”

Pulpa	Relave total									
Floculante	Magnaflor 333									
pH	4,6		6,5		8,5		10,6		12,6	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]									
	O	D	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	4,30	5,00	4,20	4,10	3,20	3,50	3,40	3,30	3,10	3,50
2	7,30	8,20	7,20	7,20	7,10	7,40	7,80	7,70	7,50	7,40
3	9,50	10,30	9,50	9,60	9,80	10,10	10,40	10,30	10,10	10,10
4	10,80	11,50	11,00	11,00	11,30	11,60	11,90	11,80	11,60	11,60
5	11,80	12,40	12,00	12,00	12,20	12,50	12,60	12,50	13,00	12,50
6	12,40	13,00	12,70	12,60	12,70	13,00	13,10	13,00	12,90	13,00
7	13,00	13,60	13,30	13,10	13,20	13,50	13,60	13,50	13,30	13,50
8	13,40	13,90	13,70	13,60	13,60	13,90	13,90	13,80	13,70	13,90
9	13,80	14,30	14,00	14,00	13,90	14,20	14,20	14,10	14,00	14,20
10	14,10	14,60	14,40	14,30	14,10	14,40	14,50	14,40	14,30	14,40
15	15,60	16,00	15,90	15,70	15,10	15,40	15,30	15,20	15,10	15,40
20	16,10	16,40	16,30	16,20	15,80	16,10	15,90	15,80	15,70	16,10
25	16,60	16,90	16,70	16,60	16,30	16,60	16,30	16,20	16,10	16,60
30	17,00	17,30	17,10	17,00	16,60	16,90	16,70	16,60	16,50	16,90
Velocidad sedimentación [m/h]	1,42	1,49	1,44	1,44	1,46	1,50	1,51	1,50	1,56	1,50
Desv. Estándar	0,05		0,00		0,03		0,01		0,04	
Turbidez 10[min] [NTU]	667,00	568,50	573,00	559,50	623,50	439,00	430,00	470,50	266,50	610,00
Desv. Estándar	69,65		9,55		130,46		28,64		242,89	
Turbidez 30[min] [NTU]	248,00	326,50	56,50	57,35	75,35	52,60	84,45	48,65	28,50	37,25
Desv. Estándar	55,51		0,60		16,09		25,31		6,19	

Tabla E. 12. Resultados pruebas sedimentación para relave total con variación de pH; floculante Magnaflor 333; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL
ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”

Pulpa	Concentrado final							
Floculante	Floerger 913sh							
pH	8,5		10,5		11,5		12,5	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]							
	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	S I N S	D A T O S
1	15,30	15,20	15,70	15,80	16,70	16,80		
2	18,50	18,40	18,70	18,70	18,90	19,00		
3	19,30	19,20	19,60	19,60	19,70	19,80		
4	19,70	19,60	20,00	20,00	20,20	20,30		
5	20,00	19,90	20,30	20,20	20,40	20,50		
6	20,20	20,10	20,50	20,40	20,60	20,70		
7	20,40	20,30	20,70	20,60	20,70	20,80		
8	20,50	20,40	20,80	20,80	20,90	21,00		
9	20,50	20,40	20,80	20,80	20,90	21,00		
10	20,60	20,50	21,00	20,90	21,00	21,10		
15	20,70	20,60	21,20	21,00	21,10	21,20		
20	20,70	20,60	21,20	21,10	21,20	21,30		
25	20,80	20,70	21,30	21,20	21,30	21,40		
30	20,80	20,70	21,30	21,20	21,30	21,40		
Velocidad sedimentación [m/h]	5,55	5,52	5,61	5,61	5,67	5,70		
Desv. Estándar	0,02		0,00		0,02			
Turbidez 10[min] [NTU]	210,00	198,40	155,40	158,90	146,00	149,00		
Desv. Estándar	8,20		2,47		2,12			
Turbidez 30[min] [NTU]	56,70	54,00	36,00	32,10	32,85	29,65		
Desv. Estándar	1.91		2.76		2.26			

Tabla E. 13. Resultados pruebas sedimentación para concentrado final con variación de pH; floculante Floerger 913sh;
O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL
ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”

Pulpa	Concentrado final							
Floculante	Rheomax 1050							
pH	8,5		10,5		11,5		12,5	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]							
	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	15,80	16,20	15,30	15,90	14,90	14,40	14,70	14,70
2	18,60	18,90	18,60	19,10	19,20	18,70	18,50	18,50
3	19,40	19,70	19,40	19,80	20,10	19,60	19,50	19,50
4	19,90	20,20	19,80	20,30	30,40	29,90	19,80	19,80
5	20,20	20,50	20,10	20,50	20,70	20,20	20,40	20,40
6	20,60	20,90	20,50	20,90	20,90	20,40	20,50	20,50
7	20,70	21,00	20,60	21,00	21,00	20,50	20,60	20,60
8	20,80	21,10	20,70	21,10	21,10	20,60	20,80	20,80
9	20,90	21,20	20,80	21,10	21,20	20,70	20,90	20,90
10	21,00	21,30	20,90	21,20	21,30	20,80	21,00	21,00
15	21,20	21,50	21,00	21,30	21,60	21,10	21,20	21,20
20	21,20	21,50	21,00	21,30	21,70	21,20	21,40	21,40
25	21,20	21,50	21,00	21,30	21,70	21,20	21,40	21,40
30	21,20	21,50	21,00	21,30	21,70	21,20	21,40	21,40
Velocidad sedimentación [m/h]	5,58	5,67	5,58	5,73	5,76	5,61	5,55	5,55
Desv. Estándar	0,06		0,11		0,11		0,00	
Turbidez 10[min] [NTU]	148,50	178,50	123,35	123,15	134,00	134,00	75,00	86,50
Desv. Estándar	21,21		0,14		0,00		8,13	
Turbidez 30[min] [NTU]	31,90	37,10	35,50	36,30	31,95	31,95	23,15	28,30
Desv. Estándar	3,68		0,57		0,00		3,64	

Tabla E. 14. Resultados pruebas sedimentación para concentrado final con variación de pH; floculante Rheomax 1050; O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL
ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”

Pulpa	Concentrado final							
Floculante	Magnafloc 338							
pH	8,5		10,5		11,5		12,5	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]							
	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	14,90	14,50	14,50	14,60	14,10	14,10	14,20	14,20
2	18,30	18,00	18,50	18,20	18,00	18,00	17,80	17,80
3	19,40	19,10	19,50	19,10	19,00	19,00	19,20	19,20
4	19,90	19,40	20,00	19,60	19,60	19,60	19,70	19,70
5	20,30	20,00	20,30	19,80	19,80	19,80	20,00	20,00
6	20,60	20,30	20,50	20,10	20,10	20,10	20,30	20,30
7	20,70	20,80	20,70	20,20	20,30	20,30	20,50	20,50
8	20,80	20,90	20,80	20,30	20,40	20,40	20,60	20,60
9	20,90	21,00	20,90	20,40	20,60	20,60	20,80	20,80
10	21,00	21,00	21,00	20,50	20,60	20,60	20,80	20,80
15	21,20	21,20	21,10	20,60	20,90	20,90	21,10	21,10
20	21,20	21,40	21,20	20,60	20,90	20,90	21,20	21,20
25	21,40	21,40	21,20	20,60	21,00	21,00	21,20	21,20
30	21,40	21,40	21,20	20,60	21,00	21,00	21,30	21,30
Velocidad sedimentación [m/h]	5,49	5,40	5,55	5,46	5,40	5,40	5,34	5,34
Desv. Estándar	0,06		0,06		0,00		0,00	
Turbidez 10[min] [NTU]	111,00	132,50	90,45	84,35	91,00	86,00	89,00	91,50
Desv. Estándar	15,20		4,31		3,54		1,77	
Turbidez 30[min] [NTU]	51,55	53,80	42,10	36,45	24,75	26,00	22,20	23,50
Desv. Estándar	1.59		4.00		0.88		0.92	

Tabla E. 15. Resultados pruebas sedimentación para concentrado final con variación de pH; floculante Magnafloc 338;
O: prueba original, D: prueba duplicado.

“CUANTIFICACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE EL
ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE DE CODELCO DIVISIÓN ANDINA”

Pulpa	Concentrado final							
Floculante	Magnaflor 333							
pH	8,5		10,5		11,5		12,5	
Tiempo [min]	Altura agua clara [cm]							
	O	D	O	D	O	D	O	D
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	14,30	14,10	14,00	14,70	14,30	14,30	14,30	14,30
2	17,40	17,40	17,70	18,10	18,30	18,30	18,40	18,40
3	18,50	18,70	18,80	19,20	19,30	19,30	19,50	19,50
4	19,10	19,20	19,30	19,70	19,70	19,70	19,90	19,90
5	19,50	19,60	19,70	20,00	20,10	20,10	20,40	20,40
6	19,80	20,00	20,00	20,30	20,30	20,30	20,50	20,50
7	20,00	20,20	20,20	20,50	20,40	20,40	20,70	20,70
8	20,20	20,40	20,40	20,70	20,60	20,60	20,80	20,80
9	20,40	20,50	20,50	20,80	20,70	20,70	20,90	20,90
10	20,50	20,60	20,60	20,90	20,80	20,80	21,00	21,00
15	20,80	20,90	20,80	21,10	21,00	21,00	21,00	21,00
20	20,90	21,00	20,90	21,20	21,20	21,20	21,20	21,20
25	21,00	21,00	21,00	21,30	21,20	21,20	21,40	21,40
30	21,00	21,00	21,00	21,30	21,20	21,20	21,40	21,40
Velocidad sedimentación [m/h]	5,22	5,22	5,31	5,43	5,49	5,49	5,52	5,52
Desv. Estándar	0,00		0,08		0,00		0,00	
Turbidez 10[min] [NTU]	114,50	127,50	131,95	129,50	95,90	95,50	84,00	85,00
Desv. Estándar	9,19		1,73		0,28		0,71	
Turbidez 30[min] [NTU]	150,90	148,35	28,95	25,10	30,00	30,30	30,40	32,60
Desv. Estándar	1,80		2,72		0,21		1,56	

Tabla E. 16. Resultados pruebas sedimentación para concentrado final con variación de pH; floculante Magnaflor 333;
O: prueba original, D: prueba duplicado.