

2018

# CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

ORTEGA MORAGA, CRISTIAN EDUARDO

---

<http://hdl.handle.net/11673/43474>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALURGIA Y MATERIALES  
VALPARAÍSO, CHILE



## **CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA**

Propuesta de tema de memoria presentado en conformidad con los requisitos y reglamentos  
requeridos para optar al título de Ingeniero Civil Metalúrgico

**CRISTIÁN EDUARDO ORTEGA MORAGA**

Profesor Guía: Dr. Jorge Ipinza

OCTUBRE, 2018

## RESUMEN

Cantidades significativas de ultrafinos y arcillas presentes en las unidades geológicas en las instalaciones de plantas concentradoras de cobre ha obligado a la industria a considerar alternativas para el tratamiento previo del mineral. En esa línea, estudios en la materia evidencian la factibilidad técnica y económica de emplear la flotación inversa como alternativa para remover las fracciones de arcilla más complejas permitiendo a su vez concentrar elementos de valor económico, como son los óxidos de hierro, vanadio, cobalto, uranio y tierras raras, tecnología propuesta a la industria minera por el Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales (DIMM).

La presencia de minerales ultrafinos, que incluyen arcillas y filosilicatos, en los minerales chilenos fluctúa entre un 5 y un 25% causando impactos negativos en las diferentes operaciones unitarias de una planta concentradora. En la actualidad la problemática que implica trabajar minerales complejos asociados a gangas problemáticas y con alto contenido de arcillas y otros filosilicatos ha sido ampliamente documentada. Esto último debido a que se busca evitar efectos adversos como la caída entre 2 y 10 puntos porcentuales de la recuperación metalúrgica de cobre y de sus subproductos (oro, plata y molibdeno), disminución de la cantidad de agua recuperada, incremento entre 3 y 5 veces los consumos de reactivos en la flotación, detenciones de equipos y a menudo, detención total de la planta.

Estudios previos demuestran que la flotación es un método efectivo para la extracción selectiva de óxidos contenidos en los relaves y la concentración de tierras raras. Además, se observa en estos estudios que una el retiro temprano de estos materiales finos produce un cambio significativo en las propiedades reológicas del relave final, mejorando la recuperación de agua clara debido a un aumento en la velocidad de sedimentación y conducta reológica.

La presente memoria de título corresponde a un estudio experimental y teórico que tiene por objetivo complementar el estudio de la flotación inversa de arcillas iónicas proponiendo el uso de una fórmula de reactivos optimizada que contempla coagulación + floculación en combinación con un colector de óxidos, para determinar el efecto sobre la recuperación metalúrgica de las arcillas iónicas y en la conducta sedimentológica y reológica de las colas flotadas.

Respecto a los resultados obtenidos se considera que la fórmula de reactivos que permite obtener una mejor respuesta metalúrgica es utilizando una alta dosis de floculante y colector en ausencia de coagulante. Se trata de una fórmula que permite extraer sobre un 40% en peso de arcillas cuyas principales fases minerales reportadas en el concentrado sean aquellas menos cristalinas, (es decir amorfas) y que exhiben un D10 uniforme y menor a 8  $\mu\text{m}$ , repercutiendo de mejor manera en la velocidad de sedimentación y en los parámetros reológicos de las colas flotadas.

El retiro preferente de fracciones de tamaño por debajo del D10 es responsable de la mejoría en la conducta sedimentológica de las colas flotadas, pues las partículas pasan a decantar a una velocidad de 8,9  $\text{cmh}^{-1}$ , más del doble de la inicial. Por otro lado, una extracción preferente de especies de Moscovita/Illita y feldespato de potasio que aportan a la estabilidad coloidal del conjunto en su totalidad produce un efecto de cambio positivo significativo en la tensión de fluencia de la cola y su viscosidad.

Asimismo, se confirma la hipótesis planteada en este estudio pues los resultados obtenidos permiten recuperar un 73,9% del agua total que ingresa al circuito de espesamiento de relaves.

## ABSTRACT

Significant amounts of ultrafine and acilla present in the geological units in copper concentrator plant facilities has forced the industry to consider alternatives for the pre-treatment of the ore. In this line, studies in the field show the technical and economic feasibility of using reverse flotation as an alternative to remove more complex clay fractions while allowing to concentrate elements of economic value, such as iron oxides, vanadium, cobalt, uranium and rare earths, technology proposed to the mining industry by the Department of Metallurgical and Materials Engineering (DIMM).

The presence of ultrafine minerals, including clays and phyllosilicates, in Chilean minerals fluctuates between 5 and 25%, causing negative impacts on the different unit operations of a concentrator plant. At present the problematic that involves working complex minerals associated with problematic bargains and with high content of clays and other phyllosilicates has been widely documented. The latter because it seeks to avoid adverse effects such as the fall between 2 and 10 percentage points of the metallurgical recovery of copper and its by products (gold, silver and molybdenum), decrease in the amount of water recovered, increase between 3 and 5 Sometimes the consumption of reagents in the flotation, equipment stops and often, total detention of the plant.

Previous studies show that flotation is an effective method for the selective extraction of oxides contained in tailings and the concentration of rare earths. In addition, it is observed in these studies that an early removal of these fine materials produces a significant change in the rheological properties of the final tailings, improving the recovery of clear water due to an increase in the speed of sedimentation and rheological behavior.

The present title report corresponds to an experimental and theoretical study that aims to complement the study of the inverse floating of ionic clays proposing the use of an optimized reagent formula that contemplates coagulation + flocculation in combination with an oxide collector, to determine the effect on the metallurgical recovery of the ionic clays and on the sedimentological and rheological behavior of the floated tails.

With regard to the results obtained, it is considered that the formula of reagents that allows obtaining a better metallurgical response is using a high dose of flocculant and collector in the absence of coagulant. It is a formula that allows extracting about 40% by weight of clays whose main mineral phases reported in the concentrate are those less crystalline (ie amorphous) and which exhibit a uniform D10 and less than 8  $\mu\text{m}$ , having a better effect in the sedimentation velocity and in the rheological parameters of the floated tails.

The preferential withdrawal of fractions of size below the D10 is responsible for the improvement in the sedimentological behavior of the floated tails, since the particles pass to decant at a speed of 8.9  $\text{cmh}^{-1}$ , more than double the initial one. On the other hand, a preferential extraction of Muscovite / Illita species and potassium feldspar that contribute to the colloidal stability of the whole as a whole produces a significant positive change effect on the yield stress of the glue and its viscosity.

Likewise, the hypothesis proposed in this study is confirmed because the results obtained allow recovering 73.9% of the total water entering the tailings thickening circuit.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1. Antecedentes generales. ....	10
1.2. Planteamiento del problema. ....	11
1.2.1. Hipótesis.....	12
1.2.2. Objetivos .....	12
CAPÍTULO 2. REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA.....	14
2.1. Relaves. ....	14
2.1.1. Generalidades .....	14
2.1.2. Reología de relaves .....	15
2.1.3. Separación sólido-líquido.....	22
2.2. Minerales de arcillas.....	27
2.2.1. Generalidades .....	27
2.2.2. Estructura y clasificación .....	34
2.2.1. Propiedades .....	36
2.2.2. Alternativas tecnológicas para su tratamiento.....	37
2.3. Antecedentes de la flotación de arcillas. ....	39
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....	41
3.1. Procedimiento experimental.....	41
3.2. Equipos y materiales. ....	44
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1. Experimentación y análisis.....	45
4.1.1. Caracterización del relave recibido. ....	45
4.1.2. Pruebas de flotación inversa y sedimentación.....	51
4.1.3. Caracterización de los productos obtenidos de la flotación inversa de relaves.....	65
4.1.4. Incidencia del componente mineralógico en el comportamiento reológico y sedimentológico de relaves. ....	73
4.1.5. Estudio técnico. ....	77
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....	83
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....	85
CAPÍTULO 7. ANEXOS.....	89
7.1. Procedimiento para medición de densidad específica a partir del método de picnometría.....	89
7.2. Procedimiento estándar de sedimentación .....	89
7.3. Base de cálculo para dosificación de reactivos según masa de mineral alimentado .....	90

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

7.4.	Datos experimentales y resultados de pruebas de flotación y sedimentación .....	91
7.5.	Datos de distribución granulométrica por muestra.....	105
7.6.	Flowsheet planta Codelco - División Ministro Hales .....	108
7.7.	Balance hídrico condición de diseño área concentración – espesamiento de planta Codelco – DMH .....	109
7.8.	Balance hídrico condición experimental de flotación inversa de arcillas .....	110
7.9.	Flowsheet de planta Codelco – DMH incorporando unidad de flotación inversa.....	111
7.10.	Afiche de campaña: “Comprometidos con la sustentabilidad y ahorro de agua”, impulsada por Codelco DMH, 2018. ....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Perfil de velocidades de un fluido sometido a un esfuerzo cortante. Análisis a un elemento diferencial.....	15
Figura 2.2 Reograma de diferentes tipos de fluidos.....	16
Figura 2.3 Comportamiento de la tensión de fluencia de Bingham de distintos minerales del grupo de los filosilicatos. Spherical: esférica; Platy: plana; Swelling: hinchadas; Fibrous: fibrosa (Ndlovu, et al., 2014).....	18
Figura 2.4 Comportamiento de la viscosidad de Bingham de distintos minerales pertenecientes al grupo de los filosilicatos. ....	19
Figura 2.5 Viscosidad de una suspensión en función de la forma de las partículas.....	20
Figura 2.6 Comparación de la incidencia de la forma de partículas en los parámetros reológicos de interés. ....	20
Figura 2.7 Influencia del pH y formación de estructuras en el límite de fluencia (Ndlovu, et al., 2011). ....	21
Figura 2.8 Tensión de fluencia en función del pH y contenido de sólidos (Fourie, 2002). ....	21
Figura 2.9 Fases involucradas en un régimen de sedimentación zonal o discontinua.....	23
Figura 2.10 Curva característica de sedimentación donde se observan las fases presentes: Zona B: donde comienza la sedimentación libre, Zona C: punto crítico donde la velocidad de sedimentación es máxima y Zona D: lugar de compactación donde la velocidad de sedimentación es mínima. ....	23
Figura 2.11 Mecanismo de coagulación (Cárdenas, 2000). ....	25
Figura 2.12 Etapas sucesivas en un proceso de floculación selectiva (a) sólidos dispersos, (b) adición de floculante, (c) adsorción selectiva de floculante, (d) floculación selectiva y (e) sedimentación y separación (Read, 1972).....	25
Figura 2.13 Contenidos de arcilla en el mineral de alimentación de algunas plantas concentradoras del país. ....	28
Figura 2.14 Efecto de la aglomeración de arcillas sobre la conducta de flotación para evitar que se produzcan recubrimientos arcillosos. ....	30
Figura 2.15 Efecto de distintos filosilicatos en la ley y recuperación de cobre (S. Farrokhpay, 2014). ....	32
Figura 2.16 Efecto de distintos filosilicatos en la estabilidad de la espuma (S. Farrokhpay, 2014). ....	33
Figura 2.17 Consumo total de reactivos en algunas plantas concentradoras del país. ....	34
Figura 2.18 Representación esquemática de las estructuras de arcilla. (a) unidad tetraédrica del $\text{SiO}_4$ y capas T, (b) unidad octaédrica $\text{XO}_6$ y diferencia entre capas O de brucita y gibssita. ....	35
Figura 2.19 Clasificación de los grupos minerales de silicatos.....	36
Figura 2.20 Recuperación versus tamaño de partícula para dos tipos de mineral: Fuertemente flotable, débilmente flotable y un tercer mineral recuperado por atrapamiento. (Wills, 2016).....	39
Figura 2.21 Velocidades de sedimentación [cm/h] de relave natural, relave natural más dosis óptima de floculante, relave natural más dosis óptima de floculante y coagulante y cola flotada en condición mejorada (colector de óxido: AERO845) (Cruz, et al., 2016).....	40
Figura 4.1 Composición mineralógica de relave recibido.....	46
Figura 4.2 Tamaño de partícula para los grupos minerales presentes en el relave recibido.....	47
Figura 4.3 DRX-ID arcillas del relave recibido. ....	47
Figura 4.4 Concentración de elementos químicos presentes en el relave recibido para ser alimentado a experimentos de flotación inversa. ....	49
Figura 4.5 Distribución granulométrica del relave recibido.....	50
Figura 4.6 Resultados de flotación de relaves con distintas dosis de floculante y su respectiva velocidad de sedimentación. ....	55

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Figura 4.7 Resultados de flotación de relaves con distinta dosis de coagulante y su respectiva velocidad de sedimentación. ....	56
Figura 4.8 Resultados de flotación de relaves con dosis óptima de coagulante + floculante y variando dosis de espumante junto a su respectiva velocidad de sedimentación.....	58
Figura 4.9 Resultados de flotación de relaves en ausencia de floculante y variando dosis de coagulante junto a su respectiva velocidad de sedimentación.....	59
Figura 4.10 Resultados de flotación de relaves en ausencia de floculante y variando dosis de colector junto a su respectiva velocidad de sedimentación.....	61
Figura 4.11 Resultados de flotación de relaves en ausencia de coagulante y variando dosis de colector junto a su respectiva velocidad de sedimentación.....	62
Figura 4.12 Resultado de flotación de relaves con fórmula óptima y variando dosis de colector junto a su respectiva velocidad de sedimentación.....	64
Figura 4.13 Pruebas de flotación con fórmulas optimizadas.....	64
Figura 4.14 Recuperación metalúrgica de las especies minerales más significativas en los concentrados generados mediante flotación inversa de los puntos óptimos. ....	65
Figura 4.15 DRX-ID de arcillas de los concentrados generados por flotación inversa.....	67
Figura 4.16 Recuperación metalúrgica de los elementos químicos más significativos en los concentrados generados por flotación inversa.....	68
Figura 4.17 Razón de enriquecimiento (RE) de los principales elementos químicos obtenidos en los concentrados por flotación inversa.....	69
Figura 4.18 Distribución granulométrica de las colas flotadas en los puntos óptimos. ....	70
Figura 4.19 D <sub>10</sub> de las especies minerales más significativas en los concentrados generados mediante flotación inversa de los puntos óptimos. ....	71
Figura 4.20 Velocidad de sedimentación de las colas remanentes vs D <sub>10</sub> del concentrado obtenido por flotación inversa.....	71
Figura 4.21 Tensión de fluencia y Viscosidad de las colas remanentes.....	72
Figura 4.22. Composición mineralógica de relaves provenientes de distintas unidades geológicas de Codelco DMH. ....	74
Figura 4.23. Diagrama de flujos de entrada y salida de la etapa de flotación inversa de relaves.....	80
Figura 4.24. Flowsheet de unidad de Flotación inversa. ....	82
Figura 7.1 Curva de ensayo de sedimentación y regresión lineal obtenida en condición (Izquierda; Derecha): relave recibido; cola flotada con condición: 8 g t <sup>-1</sup> coagulante + 45 g t <sup>-1</sup> floculante.....	93
Figura 7.2 Curva de ensayo de sedimentación y regresión lineal obtenida del relave recibido sin flotar en condición óptima: 8 g t <sup>-1</sup> coagulante + 45 g t <sup>-1</sup> floculante.....	94
Figura 7.3 Curva de ensayo de sedimentación y regresión lineal obtenida en condición (Izquierda; Derecha): Cola flotada con condición óptima 13 g t <sup>-1</sup> coagulante y en presencia de floculante; Relave recibido sin flotar con condición óptima.....	97
Figura 7.4 Curva de ensayo de sedimentación y regresión lineal obtenida en condición (Izquierda; Derecha): Cola flotada con condición óptima 25 g t <sup>-1</sup> colector y en ausencia de floculante; Relave recibido sin flotar con condición óptima.....	100
Figura 7.5 Curva de ensayo de sedimentación y regresión lineal obtenida en condición (Izquierda; Derecha): Cola flotada con condición óptima 40 g t <sup>-1</sup> colector y en ausencia de coagulante; Relave recibido sin flotar con condición óptima.....	103
Figura 7.6. Flowsheet área concentración - espesamiento de planta Codelco DMH; Balance hídrico: Condición de diseño.....	109
Figura 7.7. Flowsheet de la unidad de Flotación inversa - Espesamiento/Filtrado; Balance hídrico: Condición experimental. ....	110

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Figura 7.8. Flowsheet área de concentración - espesamiento de planta Codelco DMH incorporando unidad de flotación inversa. .... 111

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Diámetro característico y densidad de sólidos presentes en relaves chilenos (JRI, 2010).	17
Tabla 2.2 Naturaleza y características de los floculantes (Cano, 2015).	26
Tabla 2.3 Contenido de filosilicatos en muestras de yacimientos chilenos (Bulatovic, et al., 1999) .	28
Tabla 2.4 CIC y área superficial específica de distintos minerales de arcilla.	37
Tabla 4.1 Parámetros de entrada que caracterizan al relave recibido.	45
Tabla 4.2 Aporte elemental (% en peso) por estequiometría de la muestra de RR.	46
Tabla 4.3 Semicuantificación a la fracción < 2µm.	48
Tabla 4.4 Diámetros característicos del relave recibido.	49
Tabla 4.5 Propiedades reológicas medidas del relave recibido.	50
Tabla 4.6 Parámetros de operación de flotación de relaves.	51
Tabla 4.7 Diseño de pruebas de flotación inversa.	52
Tabla 4.8 Fórmula optimizada de reactivos en estudio previo (Cruz, et al., 2016).	53
Tabla 4.9 Diseño de pruebas de flotación en presencia de coagulante y variando dosis de floculante.	54
Tabla 4.10 Resultados obtenidos de recuperación en peso y de agua clara al variar dosis de floculante.	54
Tabla 4.11 Diseño de pruebas de flotación en presencia de floculante y variando dosis de coagulante.	55
Tabla 4.12 Resultados obtenidos de recuperación en peso y de agua clara al variar dosis de coagulante.	56
Tabla 4.13 Diseño de pruebas de flotación con dosis óptima de coagulante + floculante y variando dosis de espumante.	57
Tabla 4.14 Resultados obtenidos de recuperación en peso y de agua clara al variar dosis de espumante.	57
Tabla 4.15 Diseño de pruebas de flotación en ausencia de floculante y variando dosis de coagulante.	58
Tabla 4.16 Resultados obtenidos de recuperación en peso y de agua clara en ausencia de floculante y variando dosis de coagulante.	59
Tabla 4.17 Diseño de pruebas de flotación en ausencia de floculante y variando dosis de colector.	60
Tabla 4.18 Resultados obtenidos de recuperación en peso y de agua clara en ausencia de floculante y variando dosis de colector.	60
Tabla 4.19 Diseño de pruebas de flotación en ausencia de coagulante y variando dosis de colector.	61
Tabla 4.20 Resultados de recuperación en peso y de agua clara en ausencia de coagulante y variando dosis de colector.	62
Tabla 4.21 Diseño de pruebas de flotación con fórmula optimizada y variando dosis de colector.	63
Tabla 4.22 Resultados de recuperación en peso y de agua clara con fórmula optimizada y variando dosis de colector.	63
Tabla 4.23 Porcentaje relativo de especies de arcilla detectadas bajo < 2µm de los concentrados generados por flotación inversa.	66
Tabla 4.24 Concentración de los principales elementos químicos presentes en los concentrados de arcilla generados por flotación inversa.	67
Tabla 4.25 Diámetros característicos de los relaves flotados.	69

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 4.26 Propiedades reológicas medidas de los puntos óptimos de los relaves envejecidos. ....	72
Tabla 4.27 Comparación de resultados metalúrgicos utilizando distintas unidades geológicas. ....	74
Tabla 4.28 Parámetros granulométricos principales y densidad de sólidos de ambos relaves. ....	75
Tabla 4.29 Contraste de la conducta reológica y sedimentológica de los puntos óptimos encontrados en ambos estudios. ....	75
Tabla 4.30 Análisis comparativo del balance hídrico en estudio. ....	78
Tabla 4.31. Previsión de ahorros por concepto de recuperación y recirculación de aguas de proceso al instalar unidad de flotación inversa. ....	79
Tabla 4.32. Especificaciones técnicas generales de las celdas de flotación, Flotación inversa. ....	81
Tabla 7.1 Parámetros de entrada requeridos para cálculos de masa de pulpa y mineral y dosificación de reactivos requeridos. ....	90
Tabla 7.2 Dosificación en [g] y [ $\mu$ L] calculadas para los reactivos a utilizar en presencia de coagulante y variando dosis de floculante. ....	91
Tabla 7.3 Resultados de recuperación en peso de pruebas en presencia de coagulante y variando dosis de floculante. ....	91
Tabla 7.4 Datos obtenidos de ensayos de sedimentación discontinua en condición (Izquierda; derecha): como Relave recibido; Cola flotada con dosificación de $45 \text{ gt}^{-1}$ floculante + $8 \text{ gt}^{-1}$ coagulante; relave recibido sin flotar con dosis óptima: $45 \text{ gt}^{-1}$ floc + $8 \text{ gt}^{-1}$ coag. ....	92
Tabla 7.5 Dosificación en [g] y [L] calculados para los reactivos a utilizar en presencia de floculante y variando dosis de coagulante. ....	95
Tabla 7.6 Resultados de recuperación en peso de pruebas en presencia de floculante y variando dosis de coagulante. ....	95
Tabla 7.7 Datos obtenidos en ensayos de sedimentación discontinua efectuados en presencia de floculante y variando dosis de coagulante. ....	96
Tabla 7.8 Dosificación en [g] y [L] calculados para los reactivos a utilizar en ausencia de floculante y variando dosis de colector. ....	98
Tabla 7.9 Resultados de recuperación en peso de pruebas en ausencia de floculante y variando dosis de colector. ....	98
Tabla 7.10 Datos obtenidos en ensayos de sedimentación discontinua efectuados en ausencia de floculante y con distintas dosis de colector. ....	99
Tabla 7.11 Dosificación en [g] y [L] calculados para los reactivos a utilizar en ausencia de coagulante y variando dosis de colector. ....	101
Tabla 7.12 Resultados de recuperación en peso de pruebas en ausencia de coagulante y variando dosis de colector. ....	101
Tabla 7.13 Datos obtenidos en ensayos de sedimentación discontinua efectuados en ausencia de coagulante y distintas dosificaciones de colector. ....	102
Tabla 7.14 Dosificación en [g] y [L] calculados para los reactivos a utilizar en presencia de coagulante + floculante y variando dosis de colector. ....	104
Tabla 7.15 Resultados de recuperación en peso de pruebas en presencia de coagulante + floculante y variando dosis de colector. ....	104

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes generales.

La caída de la ley en los yacimientos y la preponderancia de la ganga en el beneficio del mineral ha aumentado la complejidad de los yacimientos provocando que el rendimiento metalúrgico deba ser investigado constantemente para lograr optimizar los parámetros de operación y que se reflejen en un mayor rendimiento metalúrgico y económico.

El procesamiento de minerales de baja ley requiere de una molienda más fina para conseguir una adecuada liberación, siendo éstos a menudo, minerales complejos asociados a gangas problemáticas y con alto contenido de arcillas y otros filosilicatos, que inciden directamente en la calidad del concentrado final (incremento de insolubles, incremento de impurezas castigadas comercialmente, como arsénico, plomo, mercurio, antimonio, bismuto, entre otros).

Las arcillas corresponden a partículas provenientes de la descomposición de rocas sedimentarias (principalmente filosilicatos) de tamaño muy fino, menor a 2  $\mu\text{m}$ . Su presencia en los minerales chilenos fluctúa entre un 5 y 25%, y causa impactos negativos en las diferentes operaciones unitarias de una planta concentradora.

Las arcillas, por su elevada relación área de contacto versus peso de partículas, estabilidad química y mecánica, estructura laminar y alta capacidad de intercambio catiónico, son un excelente material absorbente, pero por estas características, producen graves problemas en las distintas etapas del proceso de concentración de minerales, esto es, molienda, flotación, espesado y filtración del mineral, afectando su eficiencia e impactando negativamente en la recuperación y en la ley del concentrado comercial.

Se conoce que las arcillas tienen un efecto importante y negativo en la flotación de minerales, pues reducen el rendimiento del proceso productivo al consumir y capturar agua por sobre el 100% de su peso, alta relación superficie de contacto versus peso de partículas que incide en incrementos de hasta tres veces el consumo normal de reactivos (colectores, espumantes y floculantes). Sin embargo, el impacto más negativo se produce por el cambio de las propiedades reológicas del relave, que afecta significativamente la operación normal de un espesador de relaves, impidiendo lograr el porcentaje de sólidos deseado en la descarga y con ello el nivel requerido de agua clara.

En la actualidad, la industria dirige sus esfuerzos en estudiar alternativas que permitan controlar la situación que implica operar con altas concentraciones de finos y en presencia de ganga reactiva. En esa línea, las plantas concentradoras chilenas han evaluado la adición de ciertos reactivos (Rheomax y otros) que permiten desestabilizar la suspensión coloidal y favorecer con ello, la coagulación y aglomeración de estas logrando una mayor probabilidad de colisión y con ello un aumento de la velocidad de sedimentación.

### 1.2. Planteamiento del problema.

Las plantas concentradoras de cobre y en particular las chilenas, han experimentado en la última década un crecimiento sostenido en el contenido de partículas ultrafinas, por debajo de los 10 micrones, que afectan desde las etapas de conminución hasta la filtración (en el caso de concentrados) y tranque de relaves (en el caso de relaves). Algunos de los principales efectos adversos que genera esta condición, es la caída entre 2 y 10 puntos porcentuales de la recuperación metalúrgica de cobre y de sus subproductos (oro, plata y molibdeno), disminución de la cantidad de agua recuperada, incremento entre 3 y 5 veces los consumos de reactivos en la flotación, detenciones de equipos y a menudo, detención total de la planta.

En términos generales, los problemas asociados a minerales ricos en arcilla y filosilicatos finos son de índole fisicoquímicos, impactando todas las etapas del circuito de procesamiento de minerales. En esa línea, el aumento en la viscosidad de la pulpa es responsable de causar impactos negativos en la recuperación de cobre, afectando la capacidad de tratamiento. Por otro lado, el desbalance de los estándares operacionales que habían sido definidos en la etapa de diseño provoca que disminuya la producción horaria de la planta concentradora, generando variabilidad en sus procesos.

Los problemas derivados por la presencia de arcilla se basan en la ocurrencia variable de éstos en las unidades geometalúrgicas, su capacidad de capturar agua por sobre el 100% de su peso, alta relación superficie de contacto versus peso de partículas, comportamiento reológico plástico e impermeabilidad de los sustratos que se generan. Así, los principales problemas asociados a las arcillas son los siguientes:

- Responsable directo en el mayor número de eventos de embancamiento de celdas de flotación y espesadores de relaves.
- Aumenta OPEX producto de uso intensivo de mano de obra y mayor demanda de reactivos e insumos en general
- Menor recuperación por efecto de arrastre de partículas de arcilla en el proceso de flotación y por consiguiente se precisa de un mayor número de etapas de limpieza.
- Disminución de la competitividad de la planta concentradora. Menor rendimiento de espesamiento, filtrado y recuperación de agua en tranques.
- Mayor consumo de agua por unidad de mineral tratada, debido a la alta tasa de captura de la arcilla presente en el relave.
- Adhesión a paredes de equipos y unidades de almacenamiento, como en chancadores y harneros provocando detenciones e indisponibilidad de la planta.

En flotación, la presencia de arcillas y ultrafinos, al mantenerse en suspensión, afecta la espuma que concentra las menas de interés adquiriendo una textura fina, pobremente mineralizada e incapaz de transportar partículas gruesas. Esta incapacidad de transportar la mena producto de la adherencia natural que exhibe la arcilla sobre las burbujas de aire ha obligado a actualizar y validar una nueva fórmula de reactivos capaz de aglomerar los finos y, por consiguiente, aumentar la recuperación del metal de interés.

En el caso particular de los relaves, las plantas concentradoras han buscado alternativas tecnológicas para resolver de manera parcial el problema descrito, como son la instalación previa

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

al espesador de baterías de hidrociclones, las que han tenido un pobre desempeño, debido a la alta variabilidad en los tamaños de las arcillas y su condición de tipo coloidal en muchos casos, lo que afecta el D50 del hidrociclón afectando entonces la selectividad buscada. Actualmente, Codelco - Distrito Ministro Hales, evalúa la colocación previa de un equipo de espesamiento tipo pasta con un costo superior a los US\$50.000, no teniéndose certeza respecto a un mejoramiento significativo en la recuperación de aguas. En el caso de minera Collahuasi, que también experimenta en sus minerales un alto contenido de arcillas, el incremento significativo de insolubles en el concentrado comercial se intenta resolver mediante una batería de celdas de flotación con generación de micro-burbujas a continuación de las columnas de limpieza, también con un alto CAPEX.

Estudios previos, como el reportado por (Cruz, et al., 2016) consideran la flotación inversa, como una alternativa tecnológica factible y económicamente viable para flotar minerales no metálicos, y en particular arcillas iónicas contenidas en los relaves, con el objeto de recuperar algunos elementos de tierras raras de contenidos significativos y de alto valor comercial.

En relación con estos usos, existe una serie de reactivos químicos competentes para la flotación de minerales no metálicos (óxidos) y en particular de arcillas. Su selección debe tener presente que los relaves chilenos presentan un contenido entre 35 y 50% de cuarzo (SiO<sub>2</sub>).

Debido al tamaño de las arcillas asociadas a los relaves chilenos, no basta utilizar sólo un colector de óxidos, sino que también una adición balanceada de floculante y coagulante, que, por efectos de carga eléctrica superficial y aglomeración, logran un tamaño crítico mínimo, para su adhesión a las burbujas de aire.

Considerando tanto las líneas de investigación abiertas en torno a la sintetización de reactivos específicos y su comportamiento sobre las unidades de extracción, como la realidad actual de la industria, se ha formulado esta propuesta de memoria de título, que busca complementar el estudio de la flotación inversa de arcillas iónicas proponiendo el uso de una fórmula de reactivos optimizada que contempla el efecto coagulación + floculación en combinación con un colector de óxidos, para determinar el efecto sobre la recuperación metalúrgica de las arcillas iónicas.

### 1.2.1. Hipótesis

Es posible mejorar las propiedades reológicas de los relaves producidos de la flotación convencional de cobre e incrementar la recuperación de agua clara en el espesamiento si se extrae selectivamente minerales de arcilla por flotación inversa empleando una fórmula optimizada de reactivos.

### 1.2.2. Objetivos

#### *Objetivo General*

Concentrar mediante flotación inversa arcillas iónicas y filosilicatos, para mejorar las propiedades reológicas de las colas e incrementar la recuperación de agua clara en el espesamiento de relaves.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

### *Objetivos Específicos*

- i. Encontrar una relación entre la adición de floculante y coagulante con la magnitud de la velocidad de sedimentación de la cola flotada
- ii. Relacionar la velocidad de sedimentación con las propiedades reológicas de la cola de flotación y el relave de alimentación, ajustados a un valor de porcentaje de sólidos en peso que permita su medición.
- iii. Verificar si existe una relación entre la recuperación en peso de arcillas iónicas y filosilicatos en el concentrado y la recuperación de agua clara en el espesador de relaves.
- iv. Realizar un análisis comparativo del balance hídrico de la situación actual de la planta concentradora y la recuperación de aguas claras obtenidas por flotación inversa.

## CAPÍTULO 2. REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA

### 2.1. Relaves.

#### 2.1.1. Generalidades

La explotación minera produce, además de la extracción de minerales valiosos, un descarte industrial denominado relave el que fundamentalmente corresponde a un material formado por partículas finas, de 20 a 120 micrones aproximadamente, y agua (en menor medida junto con reactivos) conformando una pulpa con contenidos de sólidos en un rango entre 55 a 70%. La generación y acumulación de relaves en Chile ha experimentado un crecimiento sostenido en la última década, esperando que siga incrementándose a tasa creciente debido a tres factores: (1) incremento de la producción, (2) a que la mayor parte de las reservas conocidas son sulfuros de cobre y (3) a que la ley de cobre ha disminuido en los yacimientos actuales.

Se ha estimado que las faenas mineras actuales generan relaves a una tasa de 537 millones de toneladas al año cubriendo extensas áreas, acumulando hasta el presente 23 mil millones de toneladas en el territorio nacional (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2017). Estos grandes volúmenes de descarte generados albergan constituyentes minerales complejos asociados a gangas problemáticas y con un alto contenido de arcillas y otros filosilicatos ultrafinos que condicionan una operación normal de espesamiento; en particular se ha observado una disminución en la velocidad de sedimentación y un aumento en el esfuerzo de fluencia.

En consideración a esto, variaciones en la composición mineralógica tienen una incidencia directa en los procesos de espesamiento, transporte y disposición final de los relaves. La composición geoquímica o mineralógica de los relaves chilenos cuantifica la concentración de numerosos elementos y compuestos presentes ya sea de connotación ambiental o por valor económico, dependiendo directamente de la composición del yacimiento (unidades geológicas UG) y de las características de los procesos de concentración (concentración de sólidos, granulometría, pH y reactivos).

A grueso modo, un relave generado por la industria minera chilena del cobre está compuesto por dos tipos de minerales; ambos de asociación mineral compleja y presente tanto en fracciones gruesas (arenas) como en las finas (lamas): una parte metálica compuesta generalmente por calcosina, covelina, calcopirita, enargita, bornita, pirita, magnetita, molibdenita, blenda y galena, y en menor cantidad minerales de cobalto, plata y oro. Otra parte mayoritaria no metálica compuesta por cuarzo (entre un 35 y 50%), feldespato, moscovita/sericita, caolín y biotita (25% aprox.) y un no despreciable 0,01% de valores económicos rentables conocidos como tierras raras.

La ley de los relaves ha bajado en el tiempo, en forma similar a la caída de la ley de los minerales de cabeza. Hoy en día con leyes de cabeza entre 0,4 y 1,0%, las leyes de los relaves están entre 0,06 y 0,12% todas ellas en Cu total (JRI Ingeniería, 2017). Asimismo, se observa aumentos progresivos de elementos perjudiciales como hierro, causante directo del aumento de la densidad del relave.

2.1.2. Reología de relaves

La reología es el estudio de la deformación y el flujo de todo tipo de materiales, y dado que los relaves son transportados mediante bombeo, gradientes de presión o gravitacionalmente a través de canales y/o tuberías, es necesario conocer las características reológicas de éstas.

La importancia de la reología en las distintas etapas del circuito de procesamiento de minerales ha sido ampliamente estudiada por varios investigadores (p. e., (Boger, 2009), (Farrokhpay, 2012), (Ndlovu, et al., 2014), entre otros), pues su comportamiento en las pulpas minerales es indicativo del nivel de interacción o agregación entre partículas, de aquí deriva su importancia como variable de control. Su estudio se centra en comprender el comportamiento de un fluido a partir de la relación entre dos magnitudes físicas: esfuerzo de corte  $\tau$  ( $\text{Nm}^{-2}$ ) y tasa de deformación  $\dot{\gamma}$  ( $\text{s}^{-1}$ ), también denominada tasa de corte, velocidad de corte o velocidad de cizalle.

Para graficar de mejor manera esta relación se recurre al experimento de láminas paralelas separadas por una distancia  $dy$ , cuya área de contacto con un fluido confinado es  $A$  y en el que se presenta, tras la aplicación de una fuerza paralela a la superficie un movimiento relativo estable  $u$  (Figura 2.1). Se observa un perfil de velocidad lineal del fluido producto de la acción de una fuerza externa, cuya magnitud varía de acuerdo con la distancia del plano observado respecto a la placa fija. Si se considera un pequeño elemento de fluido, la viscosidad, que básicamente es una medida de la resistencia a fluir, actúa como una constante de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad definido por la siguiente ecuación, conocida como la ley de viscosidad de Newton:

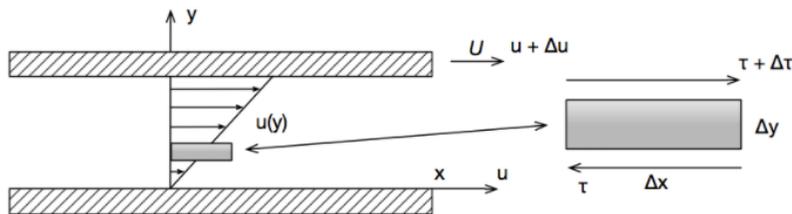


Figura 2.1. Perfil de velocidades de un fluido sometido a un esfuerzo cortante. Análisis a un elemento diferencial.

$$\tau_{yx} = \eta \frac{du}{dy} = \eta \dot{\gamma}$$

Por definición esta es la curva reológica, diagrama reológico o reograma de fluido cuya relación existente entre esfuerzo cortante y gradiente de velocidad permite de una forma práctica clasificar fluidos de acuerdo con su comportamiento viscoso. Por un lado, fluidos cuyas deformaciones son directamente proporcionales al esfuerzo aplicado, conocidos como newtonianos, y por otro, aquellos que no obedecen esta relación lineal conocidos como no newtonianos. En la Figura 2.2 los comportamientos reológicos ampliamente aceptados.

Para un fluido newtoniano la viscosidad permanece constante en el tiempo, por lo tanto, el esfuerzo de corte y la tasa de corte tienen una relación lineal. Por otra parte, entre los que poseen relaciones no lineales están los fluidos dilatantes cuya viscosidad aumenta con la tasa de corte y los pseudoplásticos que presentan una viscosidad decreciente con la tasa de corte. Asimismo, destacan en el gráfico aquellos que presentan una tasa de fluencia siendo necesario superar una tensión tangencial crítica  $\tau_f$  para que el fluido se ponga en movimiento.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

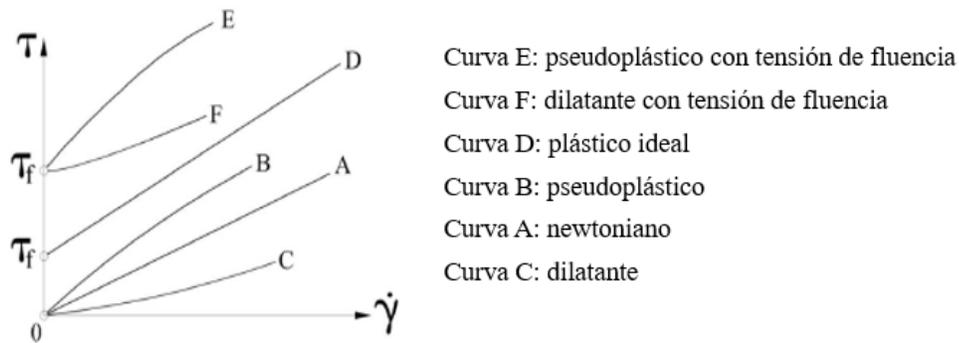


Figura 2.2 Reograma de diferentes tipos de fluidos.

Las pulpas, y en particular los relaves, exhiben un comportamiento viscoso cuya relación entre las magnitudes físicas:  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$  no es lineal, requiriendo de un esfuerzo crítico mínimo para deformarse, semejantes a un comportamiento de plástico ideal o de Bingham. Más aún, deben permanecer en movimiento sobre una velocidad mínima (velocidad crítica de sedimentación), de lo contrario fenómenos de segregación aparecen, precipitando los sólidos y separándose de la fase dispersante (en este caso agua).

Las variables reológicas más empleadas son la viscosidad y la tensión de fluencia, las cuales actúan como limitantes de algunos procesos minerales, acotando la capacidad de tratamiento de los equipos, además de aumentar el gasto energético en bombeo y consumo de agua, entre otros. Como se mencionó anteriormente, la viscosidad  $\eta$  (Pa s) se relaciona con la resistencia que opone un fluido a ponerse en movimiento al aplicarse sobre él un esfuerzo cortante, mientras que el esfuerzo de fluencia  $\tau$  ( $\text{Nm}^{-2}$ ) es el esfuerzo de corte mínimo requerido para que una sustancia comience a comportarse como un líquido.

Debido a la naturaleza de la superficie y carga de los distintos minerales presentes en minería, se tienen distintas viscosidades y por tanto una reología propia para cada mineral. La mayoría de los estudios que vinculan mineralogía y su comportamiento reológico en la industria de procesamiento de minerales se han limitado a minerales de mina, y en particular a los filosilicatos, actor preponderante en las unidades de extracción de varios yacimientos. Si bien se está frente a un escenario que es difícil de controlar especialmente cuando se estudia los efectos de un mineral en particular, los estudios apuntan en la importancia que presentan aspectos tales como: elevada área superficial, forma asimétrica de partículas y propiedades anisotrópicas de carga superficial que exhiben los filosilicatos en el mineral chileno.

En el caso de los relaves, la reología de estas suspensiones está determinada por una larga lista de variables, entre las que se pueden mencionar a las ya citadas: fricción entre partículas, coeficiente de restitución (choques), fuerzas de Van der Waals, fuerzas electrostáticas, fuerzas de Langevin, aceleración de gravedad, tamaño y número de partículas, etc., todas ellas desde el punto de vista de dinámica de partículas. Sin embargo, es la granulometría del mineral y su relación con la distribución de tamaño de partículas, la concentración de partículas y el pH, aquellas que pueden ser estudiadas con mayor facilidad.

2.1.2.1. Caracterización de las partículas

En una suspensión la caracterización de las partículas es un problema que involucra múltiples aspectos, entre ellos podemos mencionar:

- *Tamaño.* Se consideran aquellas ampliamente utilizadas en hidráulica fluvial, las cuales corresponden a diámetro nominal, de sedimentación y de tamiz. El conocimiento de la curva granulométrica es esencial para el flujo de suspensiones, tanto la velocidad, fricción y la capacidad portante de la mezcla dependen del tamaño y distribución de las partículas.
  - Los grandes tamaños definen en forma decisiva la tasa de desgaste de la tubería.
  - Los diámetros más pequeños influyen en el comportamiento reológico de la suspensión.
  - El diámetro mediano o  $d_{50}$  caracteriza el conjunto para ciertas propiedades.
- *Forma.* Se usan términos tales como esfericidad, área superficial o dimensiones triaxiales.
- *Densidad y concentración.* Cuando se trata de partículas que provienen de minerales asociados a cuarzo, sus densidades son cercanas a este compuesto  $\rho=2650$  [kg m<sup>-3</sup>]. A menudo se encuentra que en las faenas mineras la densidad de las partículas naturales no se aleja mucho de esta cifra, donde es típico encontrar valores que se encuentran entre 2700 y 2900 [kg m<sup>-3</sup>] (JRI, 2010).
- *Velocidad de sedimentación.* Está definida para una única partícula en un medio continuo (sedimentación libre) o para un conjunto de partículas (sedimentación retardada).

La Tabla 2.1 presenta los diámetros característicos y densidad de sólidos presentes en relaves chilenos a 2010. Si bien se observa que en estos se tiene un  $D_{50}$  que se encuentra entre 20 y 110 [μm], el escenario hoy en día apunta a medias cada vez más finas, siendo necesario estudiarlos de forma especial ya que su dinámica y en particular su reología es drásticamente distinta a los estudiados años atrás.

Tabla 2.1 Diámetro característico y densidad de sólidos presentes en relaves chilenos (JRI, 2010).

Diámetro característico	Media [μm]	Desviación estándar [μm]	Mínimo [μm]	Máximo [μm]
<b>D<sub>16</sub></b>	9	2,95	5	16
<b>D<sub>50</sub></b>	52	23,2	20	110
<b>D<sub>84</sub></b>	174	65,2	61	287
<b>Densidad de sólidos [kg m<sup>-3</sup>]</b>	2,74	-	2,0	3,4

2.1.2.2. Parámetros que afectan la reología

*Concentración y distribución granulométrica*

Dentro de los factores determinantes de la reología, estudios realizados por diversos autores concluyen que tanto la viscosidad y límite de fluencia tienden a aumentar con la concentración de sólidos en volumen y granulometría fina de una suspensión (Hea, 2004). Esto se debe a que en la medida que hay mayor espacio ocupado por sólidos, existe una mayor desviación de las líneas de flujo del medio dispersante, con el consiguiente aumento de las fuerzas viscosas y por lo mismo un aumento en la viscosidad de la suspensión. Del mismo modo, si las partículas son muy pequeñas, acciones eléctricas y viscosas producen aglomeración de estas y una consiguiente alta viscosidad,

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

existiendo una mayor probabilidad de colisión entre partículas de sólidos y, en consecuencia, una mayor oposición a las partículas que se intentan mover de forma solidaria a la fase dispersante.

Una clasificación simplista es propuesta por (JRI, 2010), donde es posible clasificar los relaves según su concentración y tensión de fluencia:

- Relaves diluidos: Cp (10 – 30) [%]  $\tau_f$ : 0 – 5 [Pa]
- Relaves normales: Cp (40 – 60) [%]  $\tau_f$ : 5 – 20 [Pa]
- Relaves espesados: Cp (60 – 65) [%]  $\tau_f$ : ~ 100 [Pa]
- Pasta: Cp 70 [%]  $\tau_f$ : ~ 300 [Pa]

La interacción entre estas dos variables resulta ser compleja y preponderante en el comportamiento reológico que exhibirá una suspensión. De hecho, una suspensión puede exhibir un amplio rango de comportamiento reológico, desde dilatante hasta pseudoplástico al modificar la concentración en volumen o tamaño de partícula (Napier-Munn, 1996). Sin embargo, debido a la complejidad de la mineralogía, la química y la forma de las partículas en las suspensiones, este comportamiento no queda sólo sujeta a estos parámetros, precisando considerar parte o la totalidad de éstos a los datos de medición de una suspensión en particular. Bajo tales circunstancias y considerando que los relaves en general y los chilenos en particular son suspensiones heterogéneas de partículas irregulares y de granulometría extendida se hace necesario precisar en estudios orientados a mineralogías complejas y bien diseminadas, característicos de éstos.

Bajo ese contexto y atendiendo a la preponderante presencia de filosilicatos en las gangas, (Ndlovu, et al., 2014) caracterizó reológicamente y de manera preliminar los principales tipos de filosilicatos presentes en depósitos de pórfidos de cobre. La relevancia del estudio y que se puede observar en la Figura 2.3 y Figura 2.4 radica en la capacidad de identificar aquella concentración crítica sobre la cual es probable que se presente problemas en el procesamiento.

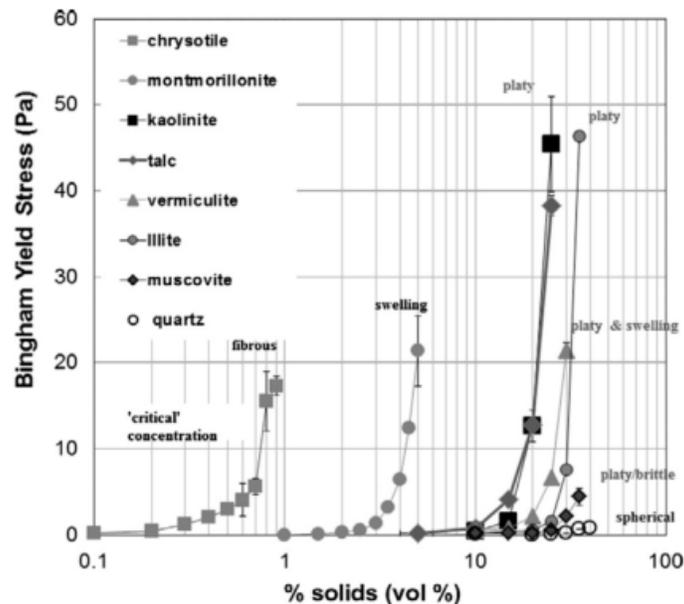


Figura 2.3 Comportamiento de la tensión de fluencia de Bingham de distintos minerales del grupo de los filosilicatos. Spherical: esférica; Platy: plana; Swelling: hinchadas; Fibrous: fibrosa (Ndlovu, et al., 2014).

En la Figura 2.3 se aprecia que aquellas especies que presentan morfologías más irregulares como el Crisotilo y la Montmorillonita se vuelven problemáticas a concentraciones en volumen menores que aquellas especies que presentan estructuras laminares como la Muscovita y Caolinita. De estos últimos, destacan por su preponderancia en los yacimientos y admisibilidad a mayores concentraciones, la Caolinita/talco, Vermiculita, Illita y Moscovita con concentraciones críticas de 20, 25, 30 y 35% de sólidos en volumen respectivamente.

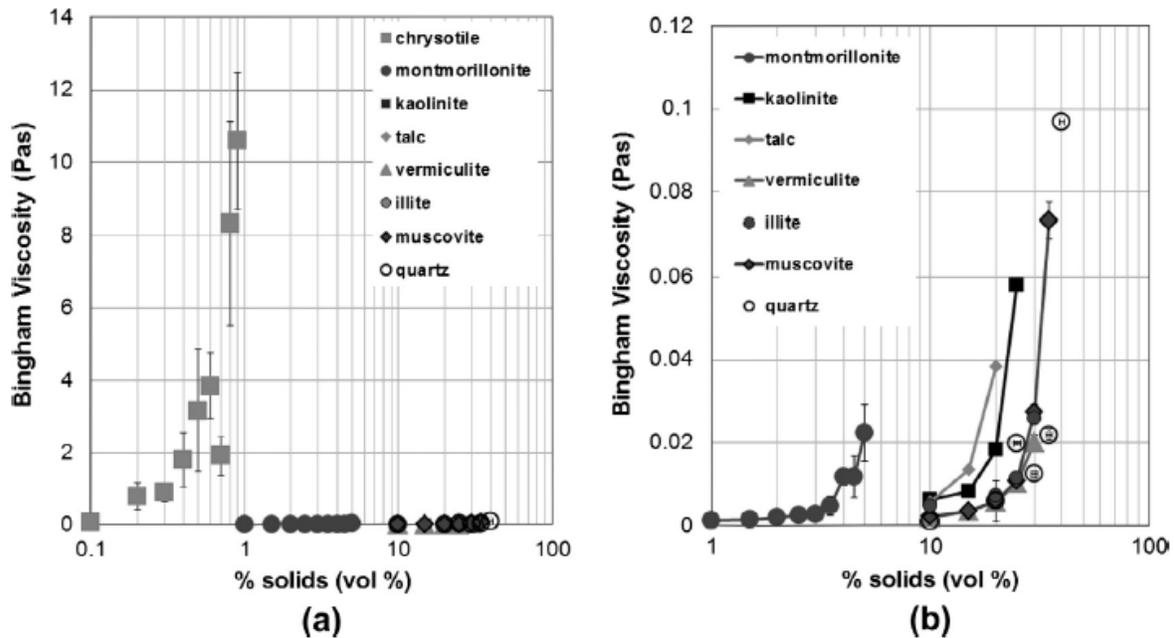


Figura 2.4 Comportamiento de la viscosidad de Bingham de distintos minerales pertenecientes al grupo de los filosilicatos.

Esta preponderancia de la morfología, y otras propiedades (anisotropía de carga, cristalinidad y capacidad de hinchamiento) en la tensión de fluencia también se observa en la viscosidad de una suspensión. En la Figura 2.4 (a) y en consecuencia con lo anterior, se observa viscosidades significativamente más altas en aquellas suspensiones conformadas por Crisotilo (morfología fibrosa). Si bien, las viscosidades de especies de morfología laminar como se observa en la Figura 2.4 (b) son significativamente más bajas, esto no implica que no revistan mayor complejidad, más aún, considerando que dichas suspensiones alcanzan valores de viscosidad y tensiones de fluencia mayores (específicamente para el caso de vermiculita y muscovita) que aquellas conformadas por cuarzo, el cual se presenta generalmente en forma granular.

### Morfología

Cuando la forma de una partícula difiere de una esfera, la viscosidad a un mismo contenido de sólidos en volumen también cambia y eso ha quedado plasmado en el análisis que acompaña a la Figura 2.4. Mas bien, el hecho de que la forma de las partículas cambia la concentración en volumen de una suspensión se debe a como estas partículas se empaquetan entre sí formando estructuras más complejas. Lo anterior obedece a la distribución no uniforme de cargas en la superficie de algunos filosilicatos y a otros fenómenos de fisicoquímica de superficies.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

La Figura 2.5 muestra un gran aumento de la viscosidad si la forma de una partícula difiere de una esfera, sobre todo a concentraciones de sólidos en volumen superiores a un 20%. Así, aquellas partículas en forma de láminas o barras manifiestan una viscosidad mucho mayor a mismos valores de concentración en volumen. Nuevamente aparece un crecimiento exponencial de la viscosidad, casi asintótico.

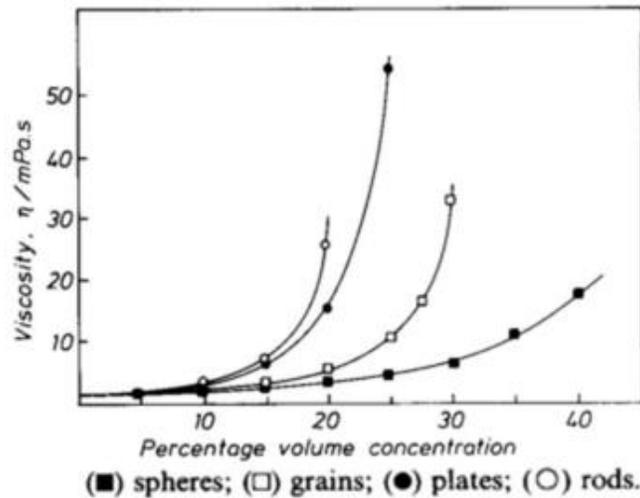


Figura 2.5 Viscosidad de una suspensión en función de la forma de las partículas.

En resumen, las partículas que experimentan un mayor aumento del límite de fluencia de Bingham son todos aquellos minerales con forma fibrosa, incluso a concentraciones de sólidos en volumen menores a un 1%. La Figura 2.6 reúne de manera conceptual la incidencia que tiene la forma en ambos parámetros reológicos.

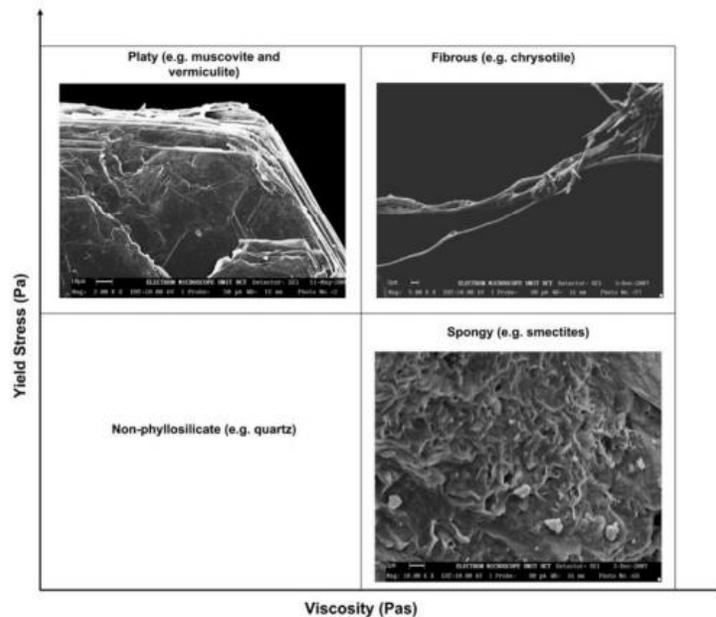


Figura 2.6 Comparación de la incidencia de la forma de partículas en los parámetros reológicos de interés.

pH

Es ampliamente aceptado el rol que tiene el pH en el comportamiento de las suspensiones, toda vez que determina las interacciones electrostáticas entre partículas, ya sea favoreciendo la coagulación de estas cuando la suspensión se encuentra cerca del punto isoeléctrico, o bien repeliéndolas. Tal como mencionan algunos autores, la influencia del pH es fundamental en el comportamiento de relaves con filossilicatos, pues regula la formación de estructuras de estos minerales, afectando de gran manera la viscosidad y límite de fluencia de las suspensiones. La Figura 2.7 muestra una interpretación de cómo el límite de fluencia varía de acuerdo con el pH, debido a la formación de estructuras en los filossilicatos.

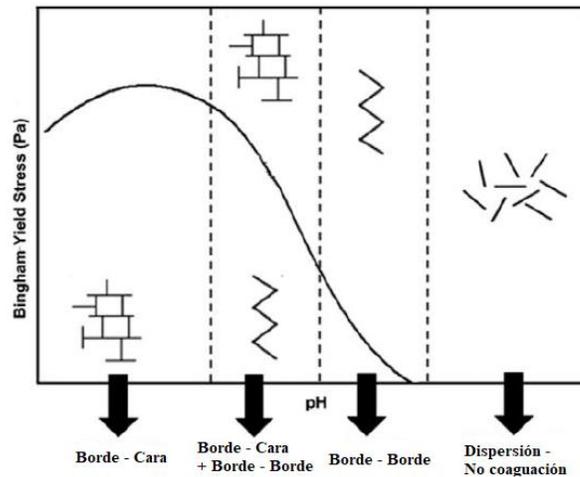


Figura 2.7 Influencia del pH y formación de estructuras en el límite de fluencia (Ndlovu, et al., 2011).

Ahora bien, como antecedente la Figura 2.8 muestra un estudio experimental de la influencia del pH y concentración en peso sobre la tensión de fluencia de un relave. Si bien no se especifica el tipo de relave, hay indicios de tratarse de un fino. De la figura se observa un límite de fluencia que crece monótonicamente con la concentración en peso a un pH dado, alcanzando un máximo a un pH ligeramente básico (pH ~7,5). Se anula, probablemente por efecto de dispersión, a pH inferiores a 5 y mayores a 10.

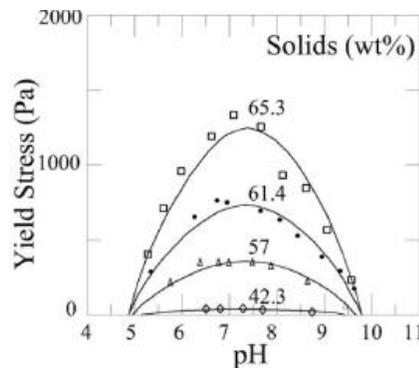


Figura 2.8 Tensión de fluencia en función del pH y contenido de sólidos (Fourie, 2002).

### 2.1.3. Separación sólido-líquido

Los productos de la flotación contienen habitualmente entre un 50% y 70% de sólidos. Gran parte del agua contenida en las pulpas producidas por la flotación es retirada en los espesadores de concentrado y colas, los que realizan simultáneamente los procesos de sedimentación y clarificación.

El producto obtenido en la descarga de los espesadores de concentrado puede contener entre 50% y 65% de sólidos. El agua remanente en estos concentrados espesados es posteriormente retirada mediante filtros hasta obtener un valor final que va desde 8% hasta 10% de humedad en el producto final.

Las colas obtenidas a su vez deben ser tratadas para recuperar sus aguas mediante el proceso de espesamiento resultando un líquido prácticamente exento de partículas y un producto con sólidos a una concentración superior a la pulpa de alimentación a ser enviada a tranques de relave.

#### 2.1.3.1. Sedimentación

El espesamiento es la primera operación de separación sólido-líquido con posterioridad a la etapa de concentración (flotación, separación gravitacional, separación magnética) cuyo principio es muy simple y consiste en la separación física de las fases sólida y líquida de una suspensión diluida produciendo un efluente claro y un sedimento denso.

Los espesadores son los equipos encargados de llevar a cabo esta operación, cuya dinámica funciona en un estado pseudo estacionario en la cual se ven involucradas dos tipos de fuerzas: la gravedad y el empuje. La primera, es aquella fuerza que la tierra ejerce sobre las partículas de sólido a que se dirijan hacia el fondo del estanque. Por otra parte, el empuje es una fuerza en sentido contrario ejercida por el fluido sobre un objeto sumergido.

Si la gravedad específica de cada partícula es suficiente para que la fuerza de gravedad supere a la de empuje, entonces esta partícula comenzará a sedimentar hacia el fondo del espesador a una determinada velocidad, en función de la diferencia de fuerzas y la concentración de partículas en el medio, siempre que las propiedades reológicas lo permitan. Si bien en la industria se trata de un proceso continuo, para la determinación experimental de la velocidad de sedimentación y su estudio en relación con los cambios en el seno de la solución se utilizan los datos obtenidos de una sedimentación discontinua efectuadas en probetas cilíndricas de vidrio.

El método descrito por los autores Kynch-Fitch se basan en ensayos de sedimentación discontinua, ver Figura 2.9 donde se observan las distintas fases caracterizadas por diferente concentración de sólidos y, por lo tanto, diferente velocidad de sedimentación. El proceso comienza con una suspensión a una concentración  $C_0$  al momento de iniciarse el experimento Figura 2.9(a). Al pasar unos minutos se observa una zona A de agua clara libre de sólidos que se distingue de una zona B donde la concentración de sólidos es prácticamente la inicial. De igual modo se va formando una zona C de tamaño y concentración variable donde los sólidos sedimentan sin contacto continuo, Figura 2.9(b). La zona final D aparece y en ella comienza a crecer un lodo concentrado con sólidos en contacto continuo. Llega un tiempo determinado en que desaparece la zona B y la zona C comienza a disminuir lentamente hasta alcanzar la concentración crítica de sólidos y una altura límite para la zona D, Figura 2.9(e). Es en este punto de unión de las interfases AC-CD conocido como punto crítico, donde las partículas pasan de sedimentar de forma individual (sedimentación libre) a estar en contacto continuo, produciéndose el fenómeno de sedimentación por compresión, Figura 2.9(e).

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

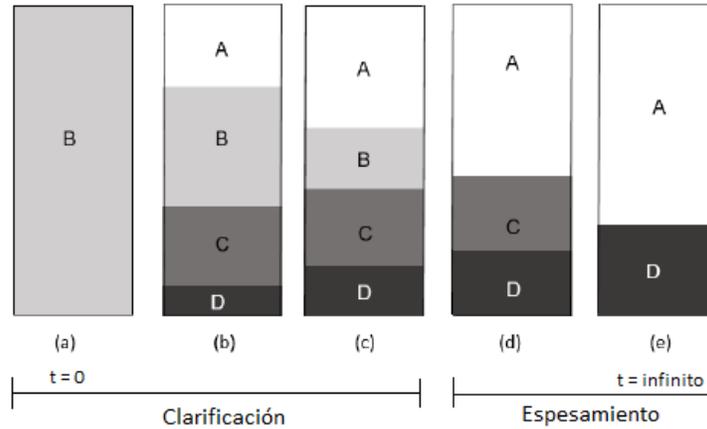


Figura 2.9 Fases involucradas en un régimen de sedimentación zonal o discontinua.

La interfase entre las zonas A y B suelen ser bastante nítida no así la distinción de las zonas C y D que resulta imposible de apreciar por simple observación. A bajas concentraciones como se dan en la interfaz A-B, la interacción entre partículas puede considerarse despreciable, descendiendo éstas sin estar en contacto continuo y a una velocidad de caída libre. No obstante, a medida que aumenta la concentración de sólidos (zonas C y D) las interacciones entre partículas o agregados son importantes resultando en una disminución en su velocidad de sedimentación.

Según el método de Kynch-Fitch se puede calcular la velocidad de sedimentación en cada interfase descrita anteriormente registrando la disminución de la altura del lecho en función del tiempo. En la interfase de la zona A-B se tiene una concentración de sólidos constante, la disminución de la altura es lineal con el tiempo por lo que la velocidad de sedimentación es constante. No obstante, cuando aparece la interfase de las zonas A-C la velocidad deja de tener un comportamiento lineal como resultado de una concentración de sólidos variable. Pueden obtenerse velocidades de sedimentación parciales a cada tiempo mediante tangentes a la curva experimental, esperándose que esta vaya disminuyendo hasta confluir en el punto crítico. La curva característica que grafica la altura de la interfase formada en un ensayo de sedimentación se observa en la Figura 2.10.

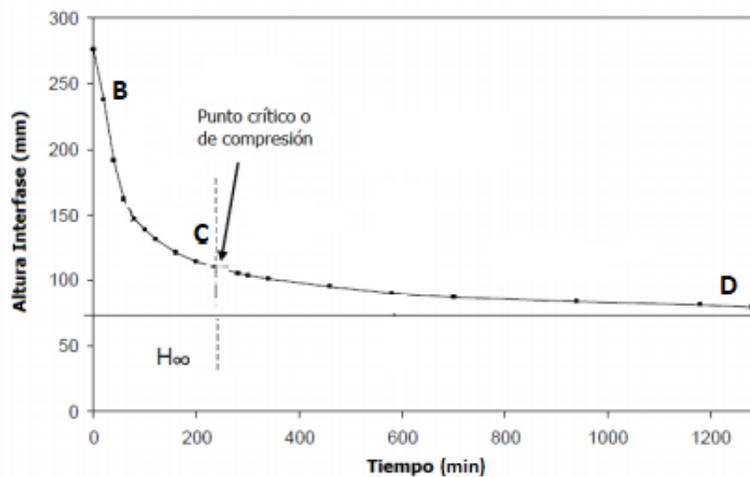


Figura 2.10 Curva característica de sedimentación donde se observan las fases presentes: Zona B: donde comienza la sedimentación libre, Zona C: punto crítico donde la velocidad de sedimentación es máxima y Zona D: lugar de compactación donde la velocidad de sedimentación es mínima.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Como es de suponer, el principio de sedimentación es la diferencia de densidades entre dos fases. El tanque espesador, y en particular, la sedimentación como operación unitaria se usa para: espesar y clarificar ocurriendo ambas simultáneamente. La primera para obtener una pulpa con una concentración de sólidos incrementada para alguna operación subsiguiente, mientras que la segunda para la obtención de una fase líquida clara, sin sólidos en suspensión.

La observación de la claridad del agua que rebosa da cuenta a menudo de la presencia de sólidos suspendidos asociados a sustancias disueltas en la fase líquida y coloides (partículas de tamaño menor a 2 micras, consistente principalmente de sílice finamente dividida, arcillas y limo). Como las partículas de tamaño ultrafino y/o sistemas coloidales sedimentan con mucha lentitud, una mayor velocidad de sedimentación se puede lograr induciendo la unión entre partículas, ya sea por coagulación o floculación.

### 2.1.3.2. Coagulación y floculación

La unión de partículas finas en suspensiones puede inducirse de tres maneras:

- a. Reduciendo la carga superficial
- b. Reduciendo la doble capa eléctrica
- c. Por conexión polielectrolítica

Los puntos (a) y (b) se consiguen cuando el pH se acerca al punto isoelectrico, es decir cuando el potencial zeta es igual a cero o cuando el potencial superficial es cero (PCC). En estos casos tanto la carga superficial como la doble capa eléctrica disminuyen, aminorando la repulsión entre las partículas coloidales y facilitando su adherencia hasta formar microflóculos de mayor tamaño. Este proceso se logra actuando sobre el medio (p.ej. modificando el pH o agregando iones específicos) para reducir la carga superficial de las partículas, disminuyendo la repulsión entre ellas. El proceso ocurre segundos después de la aplicación del químico coagulante al agua, siendo necesario un mezclado intenso para asegurar la uniformidad en la distribución del químico antes de que la reacción de coagulación concluya. La práctica en diseño ha revelado que se requieren alrededor de 30 segundos a 5 minutos para una coagulación con un mezclado rápido, usando instrumentos de mezclado de alta potencia.

Desde el punto de vista fenomenológico, el proceso es resultado de dos mecanismos: Inicialmente se efectúa un proceso esencialmente químico, el cual consiste en la reacción del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga. Esto último depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla. El proceso secundario es fundamentalmente físico, el cual consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas contenidas en la pulpa. En la Figura 2.11 se muestra cómo la adición de sustancias químicas anula las cargas sobre la superficie del coloide, permitiendo de este modo que las partículas coloidales se aglomeren formando microflóculos.

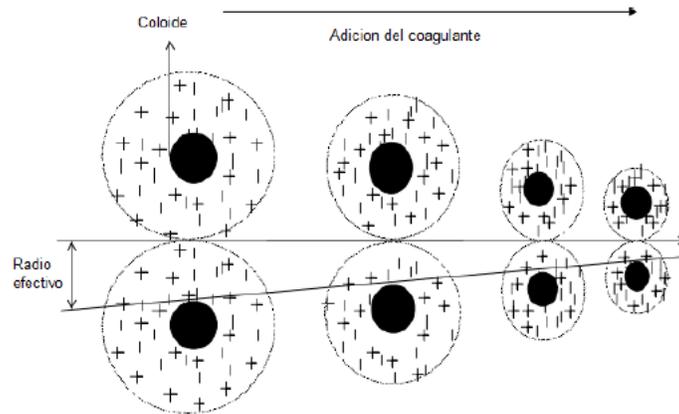


Figura 2.11 Mecanismo de coagulación (Cárdenas, 2000).

Los coagulantes más empleados son el sulfato de aluminio, sulfato ferroso, cal, cloruro férrico, sulfato férrico, aluminato de sodio, cloruro polialumínico y el cloruro poliférrico, entre muchos otros polielectrolitos de alta masa molecular. El consumo unitario de coagulante por tonelada de mineral procesado es relativamente bajo, siendo no más allá de 10 a 15  $gt^{-1}$ . Si se añade demasiado coagulante, las partículas pueden cargarse con el signo contrario, volviendo a dispersarse.

Más común es provocar la unión entre partículas utilizando floculantes, punto (c). Los floculantes son polímeros orgánicos de cadena larga y alta masa molecular, solubles en agua, que al establecer puentes entre partículas forman una partícula con un mayor tamaño aparente y permitiendo así que sedimenten más rápido. Este proceso de coalescencia de partículas coaguladas ocurre a un ritmo más lento que la reacción anterior y mucho más dependiente del tiempo y de la cantidad de agitación.

Shi y col., definen a la floculación selectiva como un proceso efectivo para recuperar partículas finas y ultrafinas de mineral. Para lograr esta selectividad, el floculante deberá absorberse específicamente en partículas de mineral. En la Figura 2.12 se esquematiza lo esencial del proceso y como los flocos de un componente pueden ser fácilmente eliminados de la dispersión de otros.

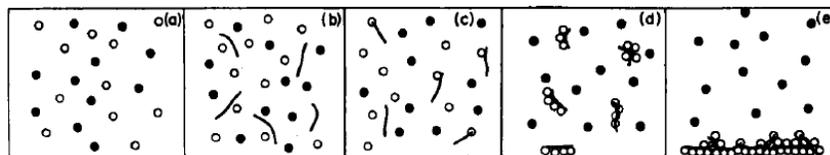


Figura 2.12 Etapas sucesivas en un proceso de floculación selectiva (a) sólidos dispersos, (b) adición de floculante, (c) adsorción selectiva de floculante, (d) floculación selectiva y (e) sedimentación y separación (Read, 1972).

Existe un consenso entre varios autores, los cuales sostienen que para seleccionar las mejores condiciones de operación que permitan alcanzar la selectividad, existen tres factores básicos que deben ser considerados:

- **Tipo de Floculante:** Se debe tomar en cuenta el tipo de grupos funcionales, sus propiedades físicas y electroquímicas, costo por unidad de mineral recuperado y dificultad para su eliminación. En la Tabla 2.2 se presentan las características de los floculantes de acuerdo con su naturaleza.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 2.2 Naturaleza y características de los floculantes (Cano, 2015).

Tipo de floculante	Características
Mineral	La sílice activada, su preparación es delicada y presenta el riesgo de gelatinización.
Orgánicos naturales	Son polímeros naturales extraídos de sustancias animales o vegetales.
Orgánicos sintéticos	Son los más utilizados. Constituyen macromoléculas de gran cadena, con masa molecular elevada. Se clasifican de acuerdo con la ionicidad de los polímeros (iónicos y no iónicos). Ej. Poliácridamidas, poliácridatos y polietilén óxidos.

- *Naturaleza del mineral:* Es importante conocer las características superficiales del mineral, solubilidad y otras propiedades físicas tales como, carga superficial al estar en medio acuoso.
- *Medio acuoso:* Los tipos y concentraciones de los diferentes electrolitos presentes y su comportamiento frente a cambios de pH, factores hidrodinámicos, influencia de las propiedades electroquímicas y físicas del floculante, así como sobre las superficies de los minerales, e inclusive la misma adsorción del floculante sobre la superficie del mineral puede ser reforzada o inhibida con un control del medio acuoso.

En la literatura, son numerosos los estudios que comprueban la efectividad de aglomerar de manera selectiva los constituyentes de menor tamaño, de manera tal que el nuevo “agregado” pueda ser tratado mediante procesos convencionales de separación (Read, 1972) (Ibarra, et al., 2010) (Song, 1998). En esa línea, *Read A.D* en su estudio pionero demostró la posibilidad de flocular tanto hematita como silicatos cuyo tamaño de partícula no sobrepasaba los 20 micrones a partir del uso de polímeros de floculación selectiva de diferente carácter aniónico. Asimismo, *Ibarra, V. et. al.*, utilizó la técnica de floculación para flotar y concentrar las micropartículas de malaquita (< 20µm) presente en minerales oxidados de cobre mediante su aglomeración, usando para tal efecto Tautómero Hidroxamato Octílico de Potasio (HOP) como reactivo floculante (Ibarra, et al., 2010).

Dependiendo de la aplicación específica, la dosificación de floculantes puede ser muy variable, en el rango de 10 a 250 g t<sup>-1</sup> de mineral. La mayoría de los floculantes (principalmente convencionales) utilizados por las principales empresas de la gran minería del cobre son reactivos importados de naturaleza aniónica. Sin embargo, debido a la necesidad de un aumento de la eficiencia de los espesadores encargados de recuperar agua, en algunos casos los floculantes convencionales no son capaces de mantener su eficiencia y se producen problemas operacionales (aumento torque de rastras) y de transporte de espesado, siendo necesario en esos casos la utilización de polímeros floculantes modificadores reológicos (líneas de reactivos Rheomax) cuyo objetivo es aumentar la eficiencia de los espesadores.

Otro estudio reciente que apunta al uso de floculantes no convencionales estudia el efecto de la caolinita en la velocidad de sedimentación y la tensión de fluencia empleando dos tipos de floculantes: Rheomax DR 1050 (Aniónico) en dosis de 15, 25 y 35 g/t, y SNF 4096 (Catiónico) en dosis de 60, 100 y 130 g/t. Operando el equipo siderack, (Raval, 2017) mide las velocidades de sedimentación de pulpas de cuarzo al 28 %w/w, a las cuales se les añadió caolinita en porcentajes desde 0, 0.5, 1, 1.5 y 2 %w/w, y se evaluó el efecto del pH a valores de 9 y 11. Los resultados obtenidos en términos de velocidad de sedimentación a distintos contenidos de caolinita difieren al utilizar un floculante y otro.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Comparando los floculantes estudiados, se observan mejorías en ciertos aspectos al utilizar uno por sobre el otro. Por ejemplo, al emplear el reactivo Rheomax se observaron mejores resultados en la velocidad de sedimentación en comparación al SNF 4096, para todas las condiciones estudiadas. Sin embargo, Rheomax no tuvo una eficiente captación de la fracción fina de la suspensión, resultando con altos niveles de turbidez del agua clara. Por otra parte, el floculante que causó un efecto positivo en los valores de esfuerzo de fluencia y turbidez, incidiendo directamente en el transporte del sedimento del underflow del espesador y en la calidad del agua clara recuperada fue el floculante catiónico SNF 4096. Sin embargo, este último causó un efecto negativo en la velocidad de sedimentación y bajos porcentajes de sólidos del sedimento, incrementando los tiempos de residencia en el espesador, perdiendo capacidad de tratamiento y disminuyendo la recuperación de aguas claras.

De los resultados obtenidos se observa que la variable que tiene mayor efecto tanto en la velocidad de sedimentación, como en los valores de esfuerzo de fluencia es el pH. En ambos casos para las pruebas realizadas a valores de pH 11 se tiene un sistema más disperso con mayores fuerzas repulsivas que resultan en una mayor dificultad para el proceso de floculación. Esto se explica por la fisicoquímica de superficie a través del potencial zeta, que indica que para el cuarzo a medida que se incrementa el pH, adquiere un valor más negativo de potencial zeta, es decir, una carga eléctrica superficial de las partículas más negativas, lo cual se traduce en sistemas más dispersos.

Es importante tener presente que el tiempo total de sedimentación depende mucho del tipo de agente floculante que se use y obviamente de la cantidad que se dosifique del mismo. En partículas floculadas, un número de partículas pequeñas se agrupan entre sí. Los flóculos pueden contener apreciables cantidades de líquidos dentro de los espacios vacíos de las partículas. La forma y la densidad guardan muy poca relación con las características naturales de las partículas originales. Por estas razones, la determinación de la velocidad de sedimentación en partículas floculadas es muy empírica (Svarovsky, 2000).

### 2.2. Minerales de arcillas.

#### 2.2.1. Generalidades

Las arcillas son aluminosilicatos hidratados, con distintas cantidades de hierro, magnesio, metales alcalinos y otros cationes. Se caracterizan por estar formadas por partículas muy finas (menor a  $2\mu\text{m}$ ), de forma aplanada y, por lo tanto, con una superficie específica muy elevada. Ello implica, en mayor o menor grado, los siguientes caracteres específicos:

- Plasticidad.
- Propiedades coloidales.
- Propiedades absorbentes con respecto al agua y a cationes.

Es preciso mencionar que existe una diferencia entre las arcillas y los minerales de arcilla. Las arcillas propiamente tal son sedimentos que comprenden a los minerales de arcilla y otros minerales accesorios, mientras que los minerales de arcilla corresponden a los minerales propiamente tal, que son estructuras laminares de silicatos responsables de las propiedades clásicas de las arcillas, como la plasticidad en presencia de agua y dureza en seco (Deer, et al., 1992).

La definición y aclaración previa es relevante ya que existen otros minerales capaces de generar problemas similares en su procesamiento. De hecho, algunas definiciones orientadas a la industria

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

han categorizado como arcillas a todas las partículas con un tamaño menor a 20  $\mu\text{m}$ , ya que, en dichos tamaños coloidales, el área superficial específica es grande, lo que acentúa la influencia de las cargas superficiales. Así, la probabilidad de arrastre de partículas finas al concentrado, el recubrimiento de partículas mayores con partículas finas y el aumento en los tiempos de residencia, todos ellos problemas ocasionados por éstas se ven potenciados.

Dentro del proceso extractivo del cobre se ha constatado la presencia no menor, entre un 5 y un 25% de estos minerales en los yacimientos chilenos causando impactos negativos en las diferentes operaciones unitarias de una planta concentradora. A saber, el tipo de arcilla y su ley presente en el mineral varía por yacimiento, y eso ha quedado constatado en estudios previos de hace años y que se presentan en la siguiente Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Contenido de filosilicatos en muestras de yacimientos chilenos (Bulatovic, et al., 1999).

Yacimiento	Origen	Tipo de roca	Cantidad y tipo de arcillas
<b>Escondida (Benc 1906)</b>	Chile	Pórfido/Andesita	18% Illita
			12% Caolinita
<b>Disputada</b>	Chile	Pórfido/Cuarzo	10% Montmorillonita
			4% Illita
<b>Mansa Mina (veta 3)</b>	Chile	Andesita/Cuarzo	8% Caolinita
			4% Illita
<b>Escondida (Andesita)</b>	Chile	Andesita	4% Montmorillonita
			2% Bramalita

Si bien esta información data de dos décadas atrás, esta tendencia se mantiene e incluso se acentúa en algunos de los principales yacimientos del país. Por ejemplo, hoy en día Distrito Ministro Hales identifica dificultades con la presencia de arcillas como la Limonita y la Serecita, mientras que, en Minera Centinela, los esfuerzos están dirigidos a tratar los efectos que trae consigo la presencia de Caolinita, Clorita, Illita y Montmorillonita. La Figura 2.13 muestra la preponderancia que revisten las arcillas en el material que alimenta a diferentes plantas concentradoras chilenas (Ipinza, 2013).

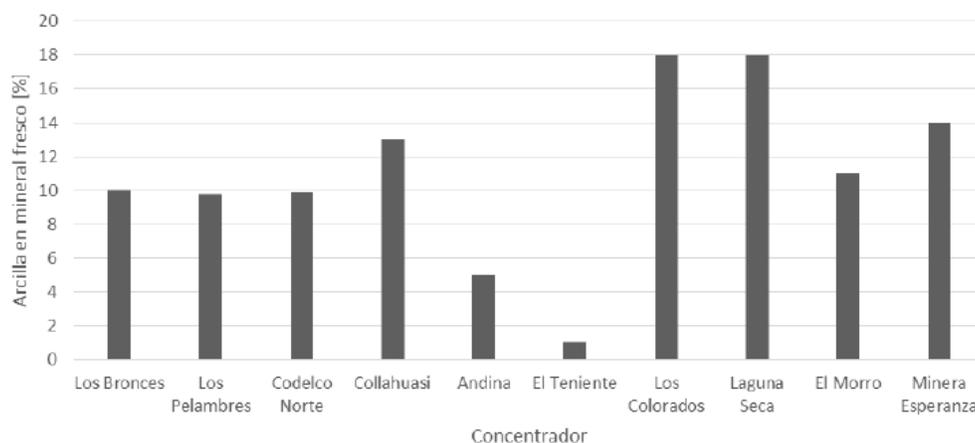


Figura 2.13 Contenidos de arcilla en el mineral de alimentación de algunas plantas concentradoras del país.

La presencia de minerales del grupo de los filosilicatos y en particular arcillas, causa impactos de distinta magnitud en las operaciones unitarias de lixiviación, flotación y espesamiento, entre otras,

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

siendo consecuencia de la gran área superficial característica de estos minerales que los hace altamente reactivos y sensibles a los cambios.

Bajo esa premisa, resultaría interesante relacionar qué aspectos característicos de estos constituyentes minerales son los responsables de causar estragos en los resultados metalúrgicos. En términos generales, se sabe o se intuye que los problemas asociados a minerales ricos en arcillas y filosilicatos en general son de índole fisicoquímicos, ya que se trata de partículas muy finas que aportan al sistema estabilidad mecánica y química como consecuencia de una elevada área superficial efectiva.

El tratamiento de minerales ricos en filosilicatos y arcillas ha sido ampliamente documentado pues su presencia impacta todas las etapas del circuito de procesamiento de minerales, incluso ya desde etapas tempranas, con las mayores ineficiencias en el transporte de pulpas y concentración a través de secado y disposición de relaves.

En conminución, por ejemplo, un aumento en la cantidad de partículas finas de arcilla en el chancado y molienda generalmente resulta en atollos y detenciones de equipos. Estos retrasos en el proceso productivo que se acentúan en rangos de molienda ultrafino son causados por los efectos de viscosidad y plasticidad en presencia de agua que exhiben las arcillas. Si bien, hoy en día las concentradoras optan por operar el molino a capacidad y densidad menores a las establecidas por diseño, esto reduce los volúmenes de mineral a tratar. Además, se observa mayores ineficiencias en el transporte de pulpas, como consecuencia de la naturaleza pegajosa de los filosilicatos que dificulta el trabajo de las correas y ductos generando así una dependencia excesiva a incrementar de modo notable la demanda de agua para favorecer su transporte mediante bombas.

Algunos investigadores sostienen que la morfología y en particular la relación de aspecto (diámetro/largo) es de gran relevancia pues buena parte de los cambios reológicos de las pulpas estarían asociados a la relación de aspecto de las partículas que la componen. De los seis grupos de arcillas, cinco son de estructura laminar y uno es de forma fibrosa. A razón de aquello y atendiendo a lo expuesto anteriormente es de esperar que aquellas partículas que exhiban una forma variada e irregular de aspecto sean las causantes de ocasionar mayores problemas al formar estructuras complejas afectando el empaquetamiento, incluso a bajas concentraciones de sólidos.

Sin embargo, los mayores impactos en plantas concentradoras se aprecian en las operaciones unitarias de flotación, transporte y disposición de relaves. Evidencia demuestra que la presencia de aluminosilicatos y silicatos de magnesio afectan el proceso de flotación de las siguientes formas, entre otras:

### *1. Recubrimientos arcillosos o “slime coating”*

Si bien no se conoce a cabalidad el mecanismo exacto por el cual las arcillas interactúan con los demás minerales en el proceso de flotación, se acepta ampliamente que se debe a propiedades de carga superficial anisotrópicas, gran área superficial, reología compleja en suspensiones y su hidrofobicidad (Ndlovu, et al., 2013).

La formación de recubrimientos arcillosos en los minerales de interés y las burbujas han sido atribuida a fuerzas electrostáticas atractivas entre éstas y las partículas de arcilla con cargas superficiales opuestas a condiciones de pH específicas (Jorjani, et al., 2011). En este fenómeno como se observa en la Figura 2.14, partículas de mineral valioso relativamente gruesas resultan completa o parcialmente cubiertos por una capa de arcillas hidrofílicas, inhibiendo así la absorción del colector. Asimismo, las burbujas de aire también son recubiertas por las arcillas previniendo de esa manera la unión burbuja-partícula mineral de mayor tamaño. (Wen & Sun, 1977)

Estudios en la materia han demostrado que las burbujas en agua (sin reactivos) tienen carga negativa prácticamente en todo rango de pH, presentando un punto isoeléctrico entre pH 1 y 3.5 (Alty, 1926). Adicionalmente, se ha demostrado que una adición típica de espumante en planta juega un rol clave en la carga que adquiere una burbuja. Por un lado, la adición de surfactantes no-iónicos no influyen en la carga de las burbujas, por lo que éstas siguen siendo negativas en un amplio rango de pH (Elmahdy, et al., 2008). Sin embargo, al agregar surfactantes iónicos, las burbujas se cargan con el mismo signo que la cabeza polar del surfactante en cuestión. Por lo tanto, en ambas condiciones las partículas arcillosas mantienen su carga negativa característica en sus caras, y dado que las fuerzas electrostáticas son mucho más importantes que las fuerzas inerciales y viscosas para las partículas ultrafinas, existe la posibilidad que se generen recubrimientos de partículas arcillosas sobre la superficie de las burbujas.

En definitiva, todo se explica por la influencia de las cargas superficiales como consecuencia de poseer una alta superficie de contacto versus peso de partícula. Así, cuando el recubrimiento arcilloso sobre las burbujas se ha generado, es muy difícil para las partículas de mayor tamaño hacer contacto con la burbuja, lo que implica una baja en la recuperación.

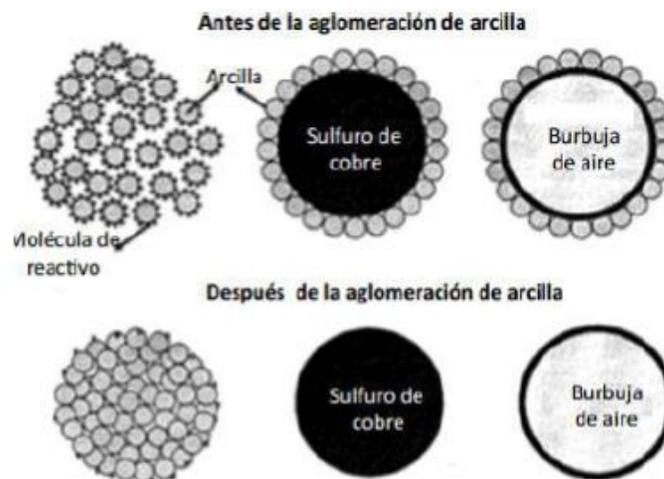


Figura 2.14 Efecto de la aglomeración de arcillas sobre la conducta de flotación para evitar que se produzcan recubrimientos arcillosos.

## 2. Cambios en la reología de la pulpa y su efecto en flotación

Existe documentación que demuestra que las suspensiones ricas en filosilicatos y arcillas presentan un comportamiento reológico bastante más complejo que otros minerales (Hea, 2004). Esto provoca una alta viscosidad en la pulpa, lo que resulta en una mala dispersión del gas, formación de vacíos y alteraciones en la turbulencia y en la tasa de coalescencia de burbujas.

Atendiendo al hecho que una baja viscosidad de pulpa genera una reducción del amortiguamiento de la turbulencia, lo que aumenta la probabilidad de encuentro y apego del agregado burbuja-partícula, mientras que aumenta la probabilidad de desapego (Finch, et al., 1997).

Asimismo, al disminuir el pH de flotación se observa un efecto similar en la reología de la pulpa, causado por un aumento en la coagulación entre las partículas cargadas positiva y negativamente. (Ndlovu, et al., 2013) Señala lo interesante de notar que el recubrimiento arcilloso y los cambios en la reología de la pulpa están intrínsecamente relacionados, y que su efecto negativo en la flotación es de magnitudes similares.

Por otro lado, dejando fuera los efectos químicos como la carga superficial, que han sido profundamente mencionados, existen efectos físicos que vale la pena considerar. En esa línea, estudios recientes han estudiado la morfología de las partículas, siendo el efecto de la relación de aspecto ( $d/l$ ) el más relevante, ya que buena parte de los cambios reológicos de las pulpas estarían asociados a la relación de aspecto de las partículas que los componen.

### 3. Arrastre de arcillas y su efecto en la recuperación y ley

Uno de los efectos relevantes de la morfología de las arcillas estaría relacionado con el arrastre de éstas al concentrado.

Diversos estudios, entre ellos el presentado por (Bhambhani, et al., 2014) realizado con moscovita, (que, si bien no es un mineral de arcilla propiamente tal, cumple con las propiedades de forma planar y tamaño ultrafino, además de ser un precursor natural de la Illita, guardando varias similitudes fisicoquímicas con ésta) y cuarzo, propone que a tamaños ultrafinos (25 – 50  $\mu\text{m}$ ) el mecanismo predominante es el atrapamiento clásico por arrastre de agua. Para tamaños medios (50 – 100  $\mu\text{m}$ ) no se observa un arrastre considerable, lo cual se condice con la idea que existe un límite superior de tamaño de partícula sobre el cual no existe atrapamiento, límite que podría suponerse cercano a los 50  $\mu\text{m}$  (Neethling, 2009). Sin embargo, para partículas gruesas (100 – 150  $\mu\text{m}$ ) existe un aumento en la recuperación de moscovita con respecto al cuarzo. Considerando que la moscovita es de naturaleza hidrofílica, el autor propone que el mecanismo que explica esto se debe a un efecto similar al arrastre por soporte, donde la moscovita, al tener una relación de aspecto mayor al cuarzo, tiene una mayor superficie, lo que aumenta la probabilidad de que estas partículas sean arrastradas hasta la espuma por el enjambre de burbujas, lo que está relacionado con la fuerza de flotabilidad, dependiente también de la relación de aspecto. Este efecto también permite a los minerales con esta morfología a persistir por más tiempo en la fase espuma y no ser sujeto a fenómenos de drenaje. Si bien la relación del factor forma con respecto al drenaje no ha sido discutida en la literatura, existen estudios en torno a las diferencias de sedimentación de partículas con distintas formas que apoyan lo anterior (A. Hazzab, 2008).

Es preciso destacar que, si bien es posible identificar algunos efectos generales, se ha observado en diversos estudios que los efectos de las arcillas suelen ser específicos al tipo de mineral que se está concentrando. En el caso de la flotación de cobre proveniente de yacimientos porfíricos se ha identificado que el proceso se ve limitado por la presencia de aluminosilicatos como la caolinita, vermiculita y moscovita, produciendo concentrados con bajas leyes y recuperación de cobre, y con alto contenido de alúmina y cuarzo (Jorjani, et al., 2011).

Para estudiar este problema, investigaciones se han realizado utilizando mineral sulfurado de cobre cuyo  $P_{80}$  es de 90  $\mu\text{m}$  y adiciones a distintas concentraciones de diferentes tipos de arcillas y filosilicatos problemáticos (S. Farrokhpay, 2014). Las pruebas de flotación se realizaron en columnas a pH 8, agregando 40 ppm de MIBC como espumante y 100 g/t de PAX (Potasio Amil Xantato) como colector. Los resultados que se muestran en la Figura 2.15 muestran como la ley del concentrado se ve afectada fuertemente por todos los filosilicatos en cuestión, mientras que existe una baja en la recuperación, pero menos pronunciada. Así, el efecto perjudicial de los filosilicatos la encabeza el Talco, y luego la montmorillonita y caolinita, siendo la illita o moscovita las menos dañinas.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

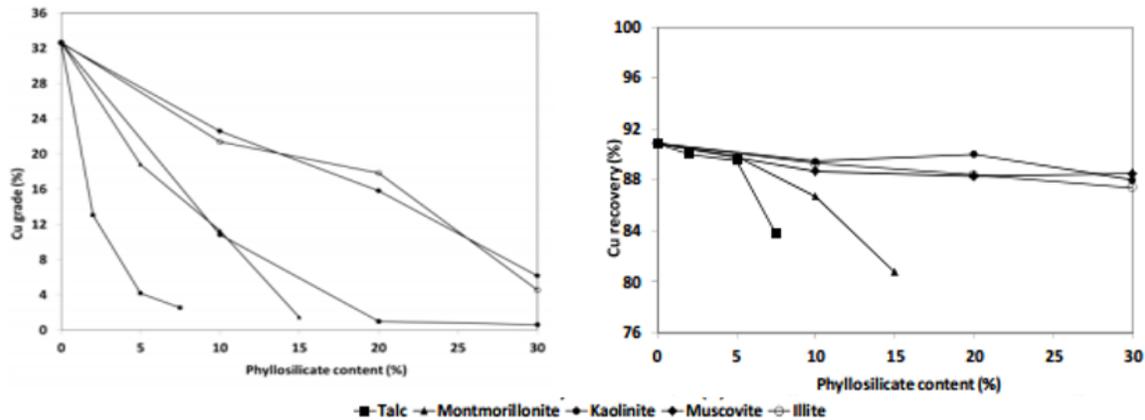


Figura 2.15 Efecto de distintos filosilicatos en la ley y recuperación de cobre (S. Farrokhpay, 2014).

El permanente desafío que representa para las operaciones de flotación la presencia de arcillas a llevado a estas a estudiar otros mecanismos. En esa línea un reciente estudio desarrollado por (Jeldrez V., 2017) y que se enmarca en un informe de memoria de título evaluó el uso de goma guar como agente recubridor de la superficie de las arcillas.

Los resultados revelaron que el uso de goma guar favorece la recuperación de calcopirita en presencia de caolinita, debido a que induce la formación de agregados de arcilla que decantan por efectos gravitacionales, impidiendo el efecto *slime coating* y disminuyendo el excesivo consumo de colector por parte de la arcilla. Asimismo, otro efecto positivo de la goma guar fue que no presenta un efecto depresivo en la calcopirita. Respecto al pH, este parámetro jugó un rol clave en el rendimiento de la goma guar, la cual presentó su mayor efectividad en agua convencional a condiciones altamente alcalinas (pH 11), en donde se logró mejorar la recuperación desde un 73% a un 90%. Sin embargo, el uso de agua de mar disminuyó la eficiencia del polisacárido, en donde se lograron leves mejoras, pero sólo a pH 11.

Por otra parte, la goma guar al interactuar con arcillas se comporta como un dispersante o floculante, dependiendo de la concentración en que se trabaje, provocando alteraciones en la reología del sistema. Este fenómeno se observó debido a que a bajas dosis de goma guar, las propiedades reológicas presentaban una leve disminución, sin embargo, éstas aumentaban considerablemente a dosis mayores de goma guar. Asimismo, los resultados indicaron que la reología de la pulpa se ve influenciada de diferente manera dependiendo del tipo de arcillas. A bajas concentraciones de este mineral, la viscosidad fue mayor en presencia de caolinita en comparación a montmorillonita, sin embargo, esta última presentó una mayor tasa de crecimiento con respecto a la concentración del sólido.

#### 4. Efecto de las arcillas en la estabilidad de la espuma

La estabilidad de la espuma es un parámetro clave al momento de optimizar la ley y la recuperación en el proceso de flotación. El comportamiento de la espuma no depende únicamente del tipo y concentración de espumante, sino también de la cantidad y naturaleza de las partículas suspendidas, en términos de su tamaño e hidrofobicidad.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

(S. Farrokhpay, 2014), analiza en su estudio la presencia de diversos filosilicatos en la estabilidad de la espuma. Para efectos de este, procuró analizar la altura máxima de la espuma y la vida media de la misma, cuyos resultados se muestran en la Figura 2.16.

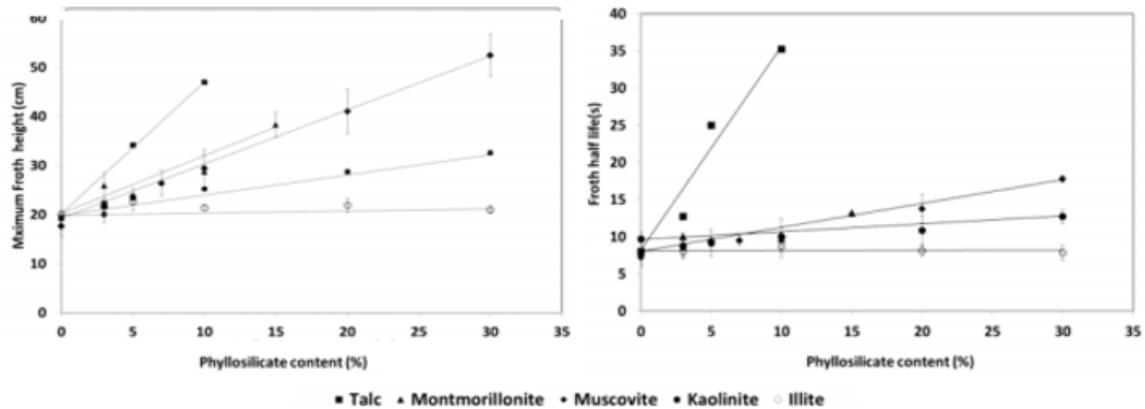


Figura 2.16 Efecto de distintos filosilicatos en la estabilidad de la espuma (S. Farrokhpay, 2014).

Se observa que, en términos de estabilidad de espuma, se evidencia que el talco y la montmorillonita son los que causan mayor inestabilidad de la fase espuma y reducción de su poder espumante, a diferencia de la caolinita e illita. Es importante aclarar que se tiende a pensar que el espumante es adsorbido por las arcillas, resultando en una menor estabilidad de espuma. Sin embargo, en este mismo estudio se realizaron análisis a los concentrados y relaves y se encontró que el MIBC no ha sido adsorbido ni por los filosilicatos ni por los minerales de cobre. Es importante entonces destacar que la estabilidad de la espuma está fuertemente relacionada con la reología de la espuma, pues una cantidad significativa de arcilla aumenta la viscosidad de la pulpa, lo que afecta negativamente la distribución de las burbujas de aire (disminuyendo su tamaño) y la movilidad/drenaje de la espuma.

### 5. Aumento del consumo de reactivo (especialmente colectores) y baja selectividad

Adicionalmente a los problemas descritos con anterioridad, dado su tamaño ultrafino característico y alta viscosidad, las arcillas pueden generar un aumento en el consumo de reactivos al absorberlos y restringir los procesos de colección en flotación (impacta en la selectividad).

Este aumento en el consumo de reactivos por parte de algunas plantas concentradoras va en concordancia a la preponderancia de mineralogías complejas en sus yacimientos, principalmente arcillas y otros filosilicatos ultrafinos. En la Figura 2.17 se observa el consumo total de reactivos de algunas plantas concentradoras chilenas. Relacionado este antecedente con la gráfica de la Figura 2.13 se concluye que no siempre se cumple una mayor demanda de reactivos a mayor contenido de arcillas en el mineral de alimentación. Si bien, esto incide, es preciso identificar qué especies mineralógicas están presentes.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

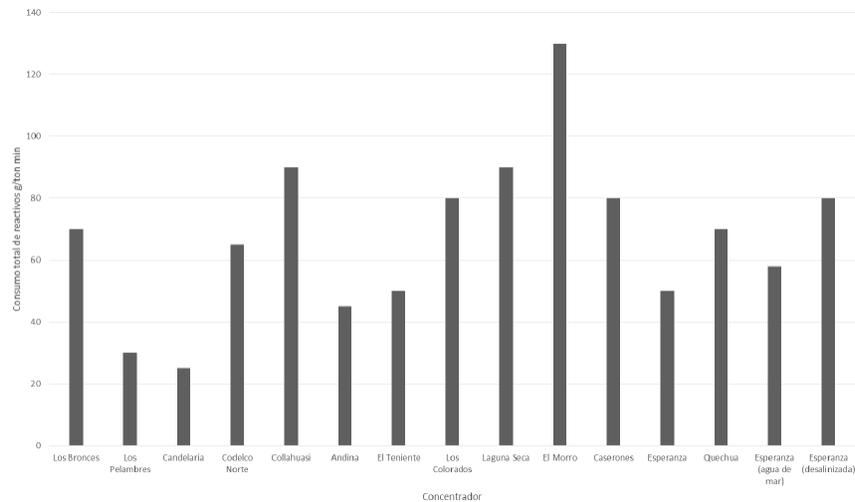


Figura 2.17 Consumo total de reactivos en algunas plantas concentradoras del país.

Frente a esta problemática, hoy en día las plantas concentradoras buscan evitar que la presencia de arcillas en las unidades geológicas con valor reduzca el rendimiento del proceso al presentarse los problemas descrito anteriormente. Por ejemplo, optando por el uso de un colector que reúna propiedades espumantes, dispersantes y reductoras de la viscosidad.

### 2.2.2. Estructura y clasificación

Las arcillas generalmente se encuentran mezclados, no solo con otras arcillas, sino que con cristales microscópicos de minerales como carbonatos, feldespatos, micas y cuarzo y al igual que todos los filosilicatos exhiben un conjunto de propiedades como consecuencia de sus características estructurales. Cada unidad de mineral está compuesta por láminas bidimensionales cuyos vértices comparten moléculas tetraédricas de  $SiO_4$  y/o moléculas octaédricas. Se reconocen como capas tetraédricas (*T*) y octaédricas (*O*).

Una capa tetraédrica consiste en la unión de moléculas de sílice ( $SiO_4$ ) permitiendo la formación de enlaces Si-O-Si. Dichos enlaces son la base estructural de los filosilicatos, quienes están conformados por capas o láminas de tetraedros unidos formando anillos los cuales están ligados a otros anillos de la misma naturaleza. Asimismo, una unidad de la capa octaédrica consiste en un catión central con 6 sectores de enlace coordinados, enlazado con 6 grupos hidroxilos, resultando en una simetría octaédrica. Lo anterior se observa en la Figura 2.18.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

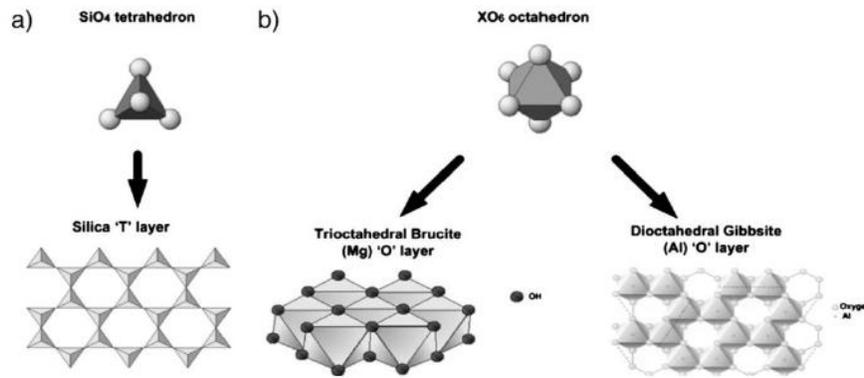


Figura 2.18 Representación esquemática de las estructuras de arcilla. (a) unidad tetraédrica del  $\text{SiO}_4$  y capas T, (b) unidad octaédrica  $\text{XO}_6$  y diferencia entre capas O de brucita y gibbsita.

La mayoría de los minerales de arcilla son química y estructuralmente análogos a otros filosilicatos. Se agrupan de acuerdo con la proporción de capas T y O, así como también dependiendo de las conexiones intercapas que puedan ocurrir en sucesivas unidades estructurales. Variaciones en las disposiciones de sus capas resultan en minerales con estructuras relativamente similares, pero que difieren en sus propiedades físicas y químicas al contener cantidades variables de agua y permitir dentro de sus estructuras la sustitución de sus cationes. A raíz de esto, se han propuesto diversas clasificaciones de arcilla y filosilicatos en general, sin embargo, la clasificación más aceptada se visualiza en la Figura 2.19 y responde a los siguientes criterios:

1. Iones que ocupan la coordinación octaédrica:
  - Dioctaédricos, con iones trivalentes, generalmente Al.
  - Trioctaédricos, con iones divalentes, generalmente Mg o Fe.
2. La compensación de déficit de carga existente tanto en coordinaciones tetraédricas como octaédricas en el caso de existir sustituciones en las redes cristalinas:  
Tanto el tetraedro como octaedro se encuentran eléctricamente descompensados uniéndose entre sí y formando unidades estructurales para neutralizarse.
3. Espesor de las láminas y fuerza de ligazón entre éstas:
  - Si las hojas están ordenadamente apiladas y no ha habido sustitución o de otra forma se encuentra compensada totalmente por cationes no hidratados, la ligazón entre láminas llega a ser muy fuerte imposibilitando la absorción de cationes hidratados.
  - Si hay sustitución no compensada en su totalidad, y más aún si las hojas no están ordenadamente apiladas, los minerales resultantes tienen una ligazón entre hojas casi nula, posibilitando fenómenos de intercambio catiónico con otras especies y potencial expansión higroscópica.

A razón de esto, si sólo hay una capa tetraédrica y una octaédrica en cada lámina, la arcilla es conocida como arcilla 1:1. Alternativamente, las arcillas conocidas como 2:1 tienen 2 láminas tetraédricas con los vértices sin compartir apuntando uno al otro y formando a cada lado una lámina octaédrica.

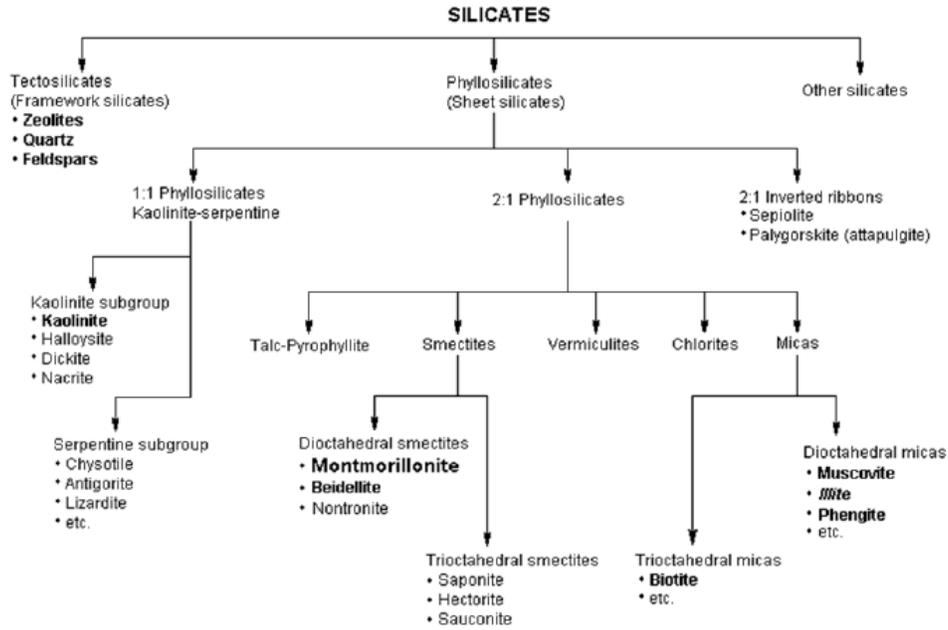


Figura 2.19 Clasificación de los grupos minerales de silicatos.

### 2.2.1. Propiedades

#### *Expansión higroscópica*

Uno de los fenómenos principales que se observan en la familia de las arcillas esmectitas es su expansión por hidratación. Este fenómeno consiste en el ingreso de agua por las capas de estos minerales, provocando su expansión y aumentando de forma aparente el contenido de sólidos (Laskowski, 1998). Una suspensión de arcillas expansivas puede aumentar dramáticamente su viscosidad y límite de fluencia, sin embargo, el efecto depende de la arcilla presente, por ejemplo, las arcillas del grupo de la esmectita tienden a manifestar mayor expansión que las del grupo de la caolinita.

Este fenómeno está fuertemente controlado por una sustitución no compensada totalmente de iones en la estructura de algunos minerales, y más aún si dichos minerales resultantes tienen una ligazón entre hojas casi nula, el intercambio catiónico con otras especies da lugar. Mientras mayor sea el área superficial específica de un mineral, mayor será su capacidad de intercambio catiónico (CIC).

La Tabla 2.4 reúne los valores de CIC y su relación con el área superficial específica (estructura) de una partícula en algunos minerales de arcilla. Se confirma nuevamente que las arcillas con una estructura 2:1, como la montmorillonita (grupo de las esmectitas) son más reactivas que aquellas que cuentan con una estructura 1:1, como el caolín; esto se traduce en una mayor hinchazón por el intercambio de cationes inorgánicos como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  que están fuertemente hidratados en presencia de agua y que cuando son tratados con algunos productos químicos desarrollan diferentes propiedades superficiales y reológicas.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 2.4 CIC y área superficial específica de distintos minerales de arcilla.

Especie	CIC [cmol kg <sup>-1</sup> ]	Área superficial específica [m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> ]
Caolin	1 – 15	10 – 30
Illita	10 – 40	50 – 100
Clorita	10 – 40	10 – 20
Esmectita	70 – 150	10 – 800
Vermiculita	130 – 210	150 – 800
Sepiolita/paligorskita	10 – 45 / 5 – 30	150 – 900

Esta capacidad de intercambio catiónico combinado con condiciones de pH con el medio de contacto impacta en la tensión superficial con otros materiales, favoreciendo a adherencia y cohesión. Esta última responsable del comportamiento reológico plástico en presencia de agua.

### *Propiedades de carga superficial*

Actualmente aún prevalece el debate en lo que respecta a la derivación de las cargas en los bordes y las caras de los filosilicatos (entre ellos, los minerales de arcilla). Se ha planteado que los bordes presentan cargas dependientes del pH, determinadas por la protonación y desprotonación de los grupos anfóteros expuestos como silanol y aluminol (Ndlovu, et al., 2011).

Si bien la hidrólisis de la sílice en su plano superficial puede resultar en una carga ligeramente dependiente del pH en las caras basales T (Sutherland, 1948), se asume que la carga está relacionada principalmente a la sustitución isomorfa de iones de alta valencia por iones con una valencia menor. Esto resulta en un desbalance de cargas en el plano T, dejando a las caras con una carga negativa (Ndlovu, et al., 2014). Esta separación de cargas entre los diferentes planos resulta en cargas anisotrópicas, que son características de los filosilicatos.

Estas propiedades de carga superficial afectan la interacción entre partículas a distintos pH. Las teorías convencionales basadas en el modelo original de Van Olphen sugiere que las arcillas pueden asociarse en configuraciones borde-borde, borde-cara y cara-cara, donde la formación de cada una depende del balance de interacciones electrostáticas en los planos de las partículas adyacentes (Crawford, 1988).

### 2.2.2. Alternativas tecnológicas para su tratamiento

Un problema creciente de la industria es evitar que la presencia de arcillas, presente en las unidades geológicas con valor, reduzcan el rendimiento del proceso productivo: menor rendimiento de equipos como chancadores, aglomeradores y espesadores, dificultades en procesos de flotación por arrastre y mayor consumo de agua. Dificultades presentes en mineras como Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Minera Centinela y Distrito Ministro Hales de CODELCO.

El retiro temprano de ultrafinos, en los que se incluyen las arcillas, permiten aumentar la productividad, disminuir los consumos específicos de energía y afectar significativamente el OPEX de una planta. En algunos casos, este tratamiento temprano permite, además, recuperar especies de valor económico, tales como cobre, oro/plata, molibdeno, tierras raras, óxidos de hierro magnéticos, entre otros.

La primera alternativa tecnológica a mano que debiésemos considerar para tratar minerales con altos contenidos de arcilla consiste en el lavado. Esta opción de clasificación fina o deslamado permite mejorar la operación, sin grandes pérdidas de rendimiento y a condición de que el tamaño de corte

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

sea muy fino (de 10 a 20  $\mu\text{m}$ ). Para lograr estas separaciones aguas arriba se requieren a menudo la incorporación de hidrociclones de diámetro pequeño (100 mm para deslamado a 15  $\mu\text{m}$ ) y con geometría (fondo plano) y configuración específica (Ipinza, 2013). Si bien, en un principio se implementó por ejemplo en las plantas Mount Keith y Windimurra, en Australia (Senior y Thomas, 2005), tales ajustes no solo son altamente intensivos en capital, sino que también son insostenibles ya que pueden ser incapaces de adaptarse a las variaciones en la mineralogía del mineral.

Otras soluciones incluyen la mezcla de minerales que contienen filosilicato con minerales menos problemáticos, pero este enfoque se limita a concentraciones por debajo de las cuales el mineral que porta filosilicato comienza a causar problemas de procesamiento. De hecho, algunas operaciones abordaron los problemas de procesamiento al encontrar soluciones químicas y de ingeniería. Estos incluyen el uso de modificadores de la viscosidad como el pirofosfato de sodio (TSPP) y la soda cáustica, como se hace en las problemáticas plantas de oro de Merrill Crowe (Connelly, 2011).

En muchos casos, estos problemas simplemente se evitan ya sea por no procesar los minerales en absoluto, o por algunas operaciones que optan por funcionar a concentraciones de sólidos significativamente más bajas. La dilución de lodo con agua también se usa con frecuencia para reducir la viscosidad media en todo el circuito (Connelly, 2011). Sin embargo, esto ejerce una presión sobre un recurso cada vez más escaso, especialmente dado que muchas minas se encuentran en regiones áridas o desérticas.

A la luz de los antecedentes expuestos, pareciera ser que una de las alternativas factibles de ser empleadas por parte de las concentradoras sería la incorporación de un circuito de flotación. La existencia de metales útiles contenidos en las fracciones finas sostiene esta idea, y eso en conjunto con procesos de separación sólido/líquido para la recuperación de agua y disposición de relaves permitiría a las concentradoras hacer frente a la preponderancia que representan estas mineralogías complejas. En esa línea, el lugar donde se configurará este nuevo proceso de concentración dependerá de la operación cuyo beneficio por la implementación de este proceso cobre mayor relevancia en términos de rentabilidad. Hoy en día, las concentradoras evalúan las siguientes alternativas para la instalación en sus líneas de producción:

1. Flotación selectiva de arcillas de finos antes del SAG. Aumentar la capacidad de tratamiento del SAG y mejorar las conductas del feed-back.
2. Flotación selectiva de finos en over del ciclón. Aumentar la capacidad de tratamiento de los molinos de bolas y mejorar las conductas de flotación.
3. Flotación selectiva de arcillas de relave antes del espesamiento de relave para mejorar la conducta de sedimentación y aumentar la altura de agua clara.

Teniendo en cuenta que de la experiencia práctica se desprende que las partículas menores a unas cuantas micras no pueden ser capturadas y considerando la importancia económica que esto conlleva, podemos suponer con bastante certeza que esta limitación no puede ser superada por cambios o variaciones de los parámetros habituales del proceso de flotación, tales como, tamaño de burbuja, ángulo de contacto y agitación. A razón de aquello, las plantas concentradoras hoy en día apuestan al aumento de tamaño de las partículas gracias a fenómenos de coagulación mutua y floculación con el propósito esencial de aumentar el tamaño de partícula y que esto se refleje en una mayor probabilidad de colisión.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

### 2.3. Antecedentes de la flotación de arcillas.

Conocido es el hecho que el proceso de flotación aprovecha las diferencias entre las propiedades superficiales de los minerales para enriquecer el mineral valioso. Estas propiedades dependen de:

- Naturaleza del mineral.
- Heterogeneidad (liberación, diseminación y asociación del mineral).
- Forma y topografía de las partículas (rugosidad).

Como se mencionó anteriormente las propiedades de las arcillas como consecuencia de sus características estructurales define los fenómenos fisicoquímicos involucrados cuando se está en presencia de estos.

Existe evidencia en publicaciones técnicas sobre el uso de la flotación en la recuperación de arcillas con fines comerciales, como es el caso del caolín para la fabricación de cerámicos. Asimismo, también se ha utilizado con éxito en la flotación de arcillas asociadas con especies de tierras raras, como etapa de concentración colectiva.

Como en todos los procesos de separación mineral, la recuperación por flotación es dependiente del tamaño de partícula. De acuerdo a la Figura 2.20, las partículas finas y débilmente hidrofóbicas, como las arcillas, exhiben una baja recuperación, siendo a menudo por efectos de arrastre. La baja probabilidad de colisión de estas partículas se debe a la incapacidad de éstas de cruzar las líneas de flujo que rodean a una burbuja de aire, como consecuencia de una inercia insuficiente.

A raíz de esto, la flotación de los constituyentes finos y ultrafinos precisa la adición de ciertos reactivos que permitan la desestabilización de la suspensión coloidal y favorecer con ello, la coagulación y aglomeración de éstas logrando una mayor probabilidad de colisión y consecuentemente una mayor recuperación por flotación.

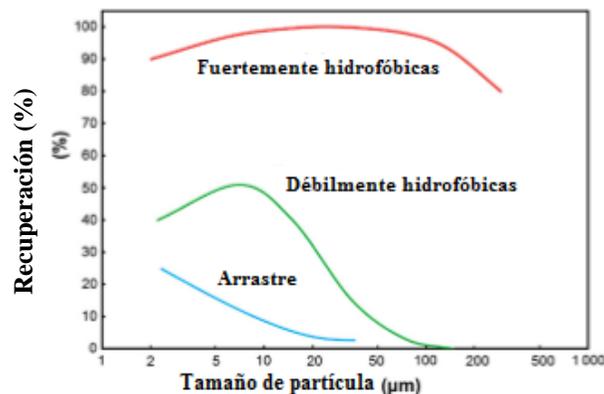


Figura 2.20 Recuperación versus tamaño de partícula para dos tipos de mineral: Fuertemente flotable, débilmente flotable y un tercer mineral recuperado por atrapamiento. (Wills, 2016)

En relación con estos usos, existen una serie de reactivos químicos competentes para la flotación de minerales no metálicos y en particular de arcillas (básicamente silicatos de hierro, aluminio y otros metales), que por su naturaleza química no se afectarían con los reactivos utilizados para la flotación de minerales metálicos. Por una parte, los colectores no ionizados, actúan de forma molecular y se aplican a menudo a minerales que cuentan con características pronunciadas en cuanto a hidrofobicidad como es el carbón, grafito, azufre, molibdenita y talco (Anon., 2012). Por otra parte,

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

son los colectores catiónicos los que han sido ampliamente utilizados para la flotación de sercicita, micas, caolinita, carbonatos, y en menor medida, silicatos y varios óxidos en general como en la flotación inversa de hierro.

(Cruz, et al., 2016), en su estudio considera que la alternativa tecnológica más coherente para separar las arcillas y finos presentes en el mineral que es procesado en la planta de molienda-flotación de DMH, es la flotación inversa permitiendo que las colas de este proceso sean enviadas al circuito de flotación actual para el procesamiento de los minerales de cobre con un mínimo de material fino o bien para su alimentación al espesador de relaves, según corresponda.

Para tales efectos considera esencial establecer una nueva fórmula de reactivos la cual incorpore no sólo reactivos específicos para la flotación inversa que sean selectivos para arcillas, si no también justificar la adición de floculante y pequeñas dosis de coagulante como responsables de favorecer la concentración de material extremadamente fino (menor a 10  $\mu\text{m}$ ) con propiedades coloidales.

Al realizar pruebas de flotación inversa con dosificación de floculante y coagulante se alcanza una mayor recuperación en peso tanto de arcilla como de agua clara en el espesador de relave, 21 y 55% respectivamente. El probable efecto del coagulante, que conlleva a la formación de flóculos de material fino favorece no solo la recuperación si no también la velocidad de sedimentación registrando ésta 9,78 [cm/h] al utilizar la siguiente composición óptima de la fórmula de reactivo: 25 g/ton de colector + 8 g/ton de coagulante + 30 g/ton de floculante. La Figura 2.21 representa lo mencionado. Comparando adicionalmente las velocidades de sedimentación en condiciones sin reactivos y con adición de floculante, coagulante o su mezcla. Cabe destacar que la velocidad de sedimentación de la cola flotada con adición óptima de coagulante y floculante es de 9,78 cmh-1, valor significativamente superior al del relave natural, que es de 3,4 cmh-1. Se concluye que el coagulante tiene una incidencia significativa en la velocidad de sedimentación.

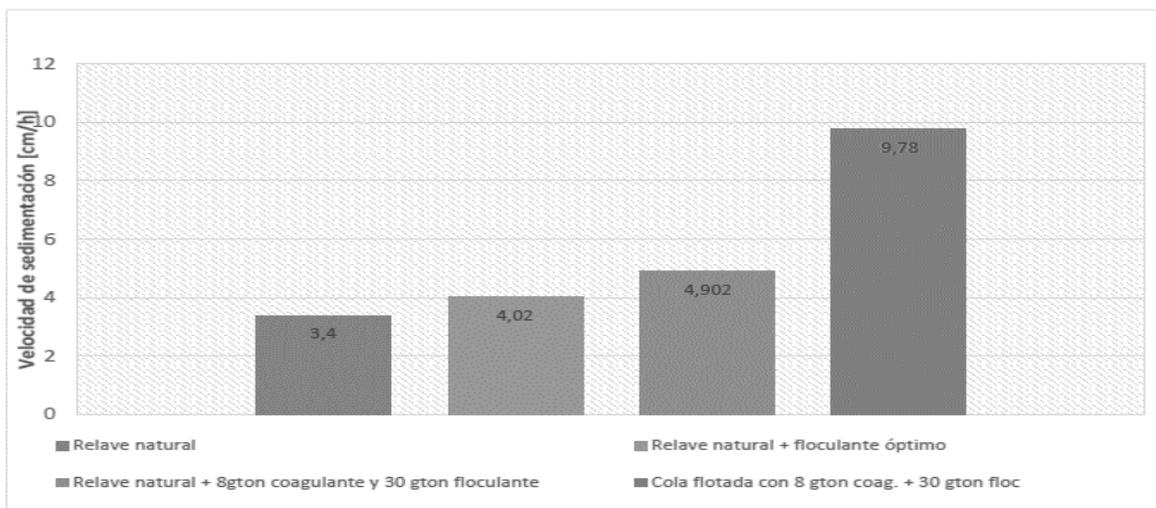


Figura 2.21 Velocidades de sedimentación [cm/h] de relave natural, relave natural más dosis óptima de floculante, relave natural más dosis óptima de floculante y coagulante y cola flotada en condición mejorada (colector de óxido: AERO845) (Cruz, et al., 2016).

En otras palabras, lo anterior demuestra que mediante la flotación selectiva de componentes de arcilla es posible modificar significativamente la conducta de sedimentación del material, probablemente debido a un cambio de las condiciones reológicas de esta cola flotada, junto con el beneficio de encontrarse a un % en sólidos levemente inferior al del material alimentado a la celda de flotación.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Procedimiento experimental.

Recibidas las muestras de relave proveniente de una determinada empresa minera se realizan las siguientes actividades de forma consecutiva:

#### a) Preparación de muestras de pulpa para caracterización inicial y pruebas de flotación

Con el objeto de reproducir resultados que reflejen el comportamiento característico de las muestras de relave recibidas en baldes se procede en primera instancia a constituir muestras representativas o compósitos para llevar a cabo las pruebas de flotación y caracterización requeridas. Se considera para aquello el siguiente protocolo:

- Agitar la pulpa contenida en los baldes usando un equipo de mezclado por agitación mecánica hasta observar homogeneidad. Luego, obtener muestras representativas de cada balde para generar compósitos representativos de la muestra original.
- Obtener un litro de pulpa del compósito, medir su pH (al menos tres mediciones).
- Pesar 1000 ml de pulpa y secar en horno a 105°C hasta que su peso permanezca constante. Esto permitirá contrastar el valor de porcentaje de sólidos obtenido con la balanza Marcy.
- Tomar 2 sub-muestras de 100 gramos cada uno de la muestra representativa del relave ya seco para análisis mineralógico y DRX por tipos de arcilla y para análisis químico por ICP. El sólido de la muestra restante se almacena como contra-muestra.
- Determinar el porcentaje de sólidos ( $C_p$ ) usando la balanza Marcy, empleando la pulpa del compósito.
- Almacenar la pulpa usada en la balanza para determinar la distribución granulométrica (serie ASTM y láser) y caracterización reológica.
- Luego, tomar una muestra del compósito para determinar s.g y velocidad de sedimentación usando los protocolos descritos en los anexos: 7.1 Procedimiento para medición de densidad específica a partir del método de picnometría y 7.2 Procedimiento estándar de sedimentación.

#### b) Pruebas de flotación inversa y sedimentación

El estudio de flotación del relave se orienta a determinar las variables respuesta: **recuperación en peso** y metalúrgica de arcillas y su razón de enriquecimiento y **velocidad de sedimentación** de las colas flotadas, a través de pruebas cuyo enfoque es:

**OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS METALÚRGICOS.** Determinar la mejor fórmula de reactivos selectivos para la arcilla, mediante ensayos de flotación batch a tiempo fijo variando la dosificación del reactivo colector, coagulante y floculante.

Tanto para las pruebas preliminares y pruebas de optimización en la dosificación de reactivos se debe seguir un procedimiento estándar el cual se detalla a continuación:

- Inspección visual de la máquina de flotación y sus conexiones.
- Preparar material requerido para el experimento: bandejas de recepción de concentrado y cola, piseta o bomba de reposición de agua. Pesar las bandejas y marcarlas con este valor usando un plumón permanente. Rotular debidamente las bandejas de concentrado y cola con el código de muestras.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

- Marcar la celda de acrílico considerando su llenado con agua a un volumen efectivo de 2,7 L y pegar una regleta de papel milimetrado para controlar el nivel de espuma.
- Adicionar 2,7 L de pulpa de relave como recibido, previamente homogeneizado, en la celda de acrílico.
- Medir el valor de pH natural usando un pH-metro.
- Medir la temperatura de la pulpa.
- De acuerdo con los requerimientos del experimento, se programa el equipo de flotación de marca EDEMET: tiempo de acondicionamiento, tiempo de flotación, velocidad de rotación del impulsor, frecuencia de paletado y flujo de aire. A continuación, dar partida al equipo.
- Se calcula la adición de reactivos (colector, espumante, floculante y coagulante) según las entradas de cálculo requeridas (revisar fórmulas en anexo: *7.3 Base de cálculo para dosificación de reactivos según masa de mineral alimentado*).
- Adicionar los reactivos a la celda de flotación siguiendo la secuencia: coagulante, floculante, colector y espumante, utilizando para esto una micro-pipeta. Se deja acondicionar por un tiempo ya determinado en minutos. Una vez que se cumple el tiempo se activa la alarma sonora que señala el momento de inicio de la flotación (flotación, paletado y reposición de agua).
- Terminada la flotación, se retira la bandeja de concentrado y se limpia la paleta con agua.
- Des-energizar el equipo, levantar el rotor y trasladar la pulpa remanente en la celda hacia la bandeja de cola. Utilizar la piseta para arrastrar el sólido retenido en el rotor y dentro de la propia celda.
- El concentrado y cola se filtran en vacío y se dejan secar en un secador a 105°C hasta pesaje constante.
- Pesar las bandejas (previamente enfriadas) y registrar los valores en bitácora.
- Disgregar la muestra seca con ayuda de la malla No. 20 ASTM (850µm). Mediante la técnica de cono y cuarteo, obtener muestras representativas de aproximadamente 100 gramos de concentrado y cola, para análisis instrumental y de respaldo (2 muestras por bandeja).
- Lavar la celda de flotación y material utilizado antes de iniciar una nueva experiencia.
- Realizar un ensayo de sedimentación a las colas remanentes de la celda luego de cada prueba de flotación inversa, según protocolo detallado en anexos.
- Filtrar y secar el concentrado obtenido para obtener recuperación másica y s.g resultante.

### c) Caracterización del relave recibido y flotado

Tanto el relave recibido como los productos obtenidos de la flotación inversa de los puntos óptimos encontrados son caracterizados por los siguientes análisis complementarios para una mejor discusión:

- Mineralogía por difracción de rayos X (DRX) y análisis modal  
El método de difracción de rayos X por la técnica de polvo vía difractométrica constituye una herramienta indispensable para caracterizar los componentes del relave especialmente lo concerniente a los minerales de arcilla.  
Las muestras fueron analizadas en los laboratorios pertenecientes al Centro de Estudios Mineralógicos (CEM) Geoatacama; referente a nivel latinoamericano en la industria respecto a análisis, identificación, cuantificación, estudio e investigación mineralógica. Debido a la multitud de factores que puedan influir en la identificación de las especies de arcilla, las muestras fueron pre-tratadas y preparadas siguiendo el esquema de preparación de muestras descrito con anterioridad. A cada muestra se le realizaron 4 procedimientos: separación

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

granulométrica (fracción fina  $<2\mu\text{m}$  y gruesa  $>2\mu\text{m}$ ), glicolación (solvatación con etilenglicol como compuesto orgánico) y calentamientos a 400 y 550°C.

Como consecuencia de la estructura de los minerales de la arcilla la difracción de rayos X es dependiente de los planos basales (001), ya que las intensidades de los máximos difractados por dichos planos son las más altas. Los espectros característicos de las muestras y conciliación con leyes de FRX precisaron de un difractómetro marca Bruker modelo D8 Endeavor y un equipo estacionario S8 Tiger. Por otra parte, los análisis de mineralogía modal fueron realizados utilizando un microscopio electrónico de barrido marca TESCAN.

- Mineralogía por espectrómetro de plasma inducido (ICP)  
Las muestras fueron enviadas al laboratorio químico minero-metalúrgico Metalab S.A, empresa que presta servicios a la minería. El análisis por ICP proporciona una rápida identificación y detección del contenido de trazas de metal en los productos de flotación, determinando concentraciones (en % y  $\text{mg kg}^{-1}$ ) de los principales elementos de valor como cobre, plata, hierro, cobalto, vanadio y contenidos de tierras raras.
- Granulometría  
La caracterización y análisis de las propiedades físicas de las muestras se llevó a cabo en las dependencias del Centro de Investigación de JRI S.A. Debido a la heterogeneidad de tamaños, cada muestra fue deslamada por la malla 325 ( $45\mu\text{m}$ ) y es analizada utilizando Ro Tap y equipo de difracción láser Microtrac S3500 para las fracciones +325# y -325# respectivamente. Los resultados que se obtienen son los diámetros característicos  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{80}$  y gráficos de distribución acumulativa conocido como curva granulométrica ( $P_{80}$ ).
- Propiedades reológicas  
La caracterización reológica de la pulpa de relave precisó la utilización del reómetro Haake RS6000 junto con dos tipos de sensores: Vane y helicoidal (o ranurado) cuya elección permite caracterizar a este tipo de fluidos a través de indicadores de tensión de fluencia y viscosidad. Las muestras son medidas a pH original y llevadas a un porcentaje de sólidos estándar de 60% de manera que el contraste de resultados sea válido. Los ensayos fueron realizados nuevamente en el CI-JRI S.A

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

### 3.2. Equipos y materiales.

- Equipos

Los equipos para utilizar en cada una de las etapas para el desarrollo de las pruebas se detallan a continuación:

Equipo	Descripción
<b>Químico</b>	
Equipo ICP-MS	Análisis químico por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente que utiliza la intensidad de la luz emitida desde una fuente para cuantificar elemento de una muestra en un amplio rango.
<b>Físico</b>	
Ro-Tap (Granulometría)	Tamizaje en seco y húmedo. Set de mallas U.S.A 4 a la 100. Rango de medición de 36 $\mu\text{m}$ a 4750 $\mu\text{m}$ .
Microtrac S3500 (Granulometría)	Análisis a través de 3 láser. Rango de medición entre 0,02 $\mu\text{m}$ a 2000 $\mu\text{m}$ .
<b>Reológico</b>	
Reómetro Haake RheoStress RS6000	Rango de frecuencia de oscilación de $10^{-5}$ – 100 Hz y rango de fuerza normal de 0,01 – 50 N. Temperatura de trabajo de -60 a 400°C.
Viscosímetro Haake VT550	Rango de torque de 0.01 - 3 sobre 400 rpm y de 0.01 - 2 sobre 800 rpm. Incerteza de +/- 0.5% fsd.

Equipo	Descripción
Celda de flotación	Celda de flotación mecánica modalidad de aire forzado. Modelo EDEMET de capacidad 3,0 L.
pH-metro	Para la medición de pH y potencial de los relaves.
Agitador mecánico	Sensores cilíndricos, paleta (Vane) y helicoidales.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando el marco de investigación descrito anteriormente y que sustenta esta propuesta de memoria, a continuación, se aborda el análisis de los principales resultados experimentales obtenidos de las pruebas de flotación inversa y de sedimentación del relave recibido.

### 4.1. Experimentación y análisis.

#### 4.1.1. Caracterización del relave recibido.

El material corresponde a un mineral proveniente de la División Ministro Hales – Codelco cuyo periodo de inactividad o reposo de la pulpa depositada en baldes fue de 5 meses aproximadamente. La pulpa proviene de cajones de distribución de colas producidas de la flotación convencional de cobre. La Tabla 4.1 detalla los parámetros que caracterizan el relave recibido según anexos correspondientes ya citados.

Tabla 4.1 Parámetros de entrada que caracterizan al relave recibido.

Parámetro de entrada	Unidad	Valor
<b>Porcentaje en peso (<math>C_p</math>)</b>	%	36,4
<b>Densidad específica mineral (s. g)</b>	g ml <sup>-1</sup>	2,50
<b>Densidad de pulpa</b>	g ml <sup>-1</sup>	1,28
<b>Velocidad de sedimentación (<math>V_{s0}</math>)</b>	cm h <sup>-1</sup>	3,80
<b>pH natural</b>	-	7,60

Los parámetros que caracterizan al relave serán utilizados para calcular la dosificación de reactivos a cada condición experimental y también para comparar las velocidades de sedimentación obtenidas con la inicial.

Se realizó una caracterización mineralógica para identificar y determinar la composición relativa de especies arcillosas presentes contenidas en el mineral mediante análisis semi-cuantitativo de difracción de rayos X, además de determinar los principales elementos de valor y concentración de elementos traza (%) mediante la técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP). También se caracteriza desde el punto de vista físico y reológico para contrastar estos antecedentes base con el escenario luego de realizar las pruebas de flotación inversa. A continuación, se describen los resultados obtenidos de estos análisis:

- Mineralogía por DRX

Mediante mineralogía automatizada se realizó al relave recibido, entendiéndose como mineral de cabeza, un análisis modal que corresponde a un análisis rápido a toda la muestra y donde se entrega información de masa mineral, masa elemental y distribución elemental. El resultado del análisis a las secciones de partículas se muestra en la Figura 4.1 y Tabla 4.2. De ésta se observa la predominancia de cristales microscópicos de Cuarzo (51,98%) estrechamente asociado a minerales de arcilla como la Muscovita/Illita (25,34%) y en menor proporción Pirita (5,89%) y Feldespato de potasio (3,84%) principalmente. Desde el punto de vista elemental, y dado que se trata de compuestos en cuya base estructural está presente sílice, el aporte queda sujeto a la predominancia de Si y O, y en menores cantidades Al, Fe y otros metales alcalinos, quienes sustituyen en la estructura de los silicatos al Si dando paso a las diferentes combinaciones

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

minerales que conforman este grupo. La conciliación del aporte registrado del análisis modal con las leyes por FRX muestra una correlación química certera de 99,94%.

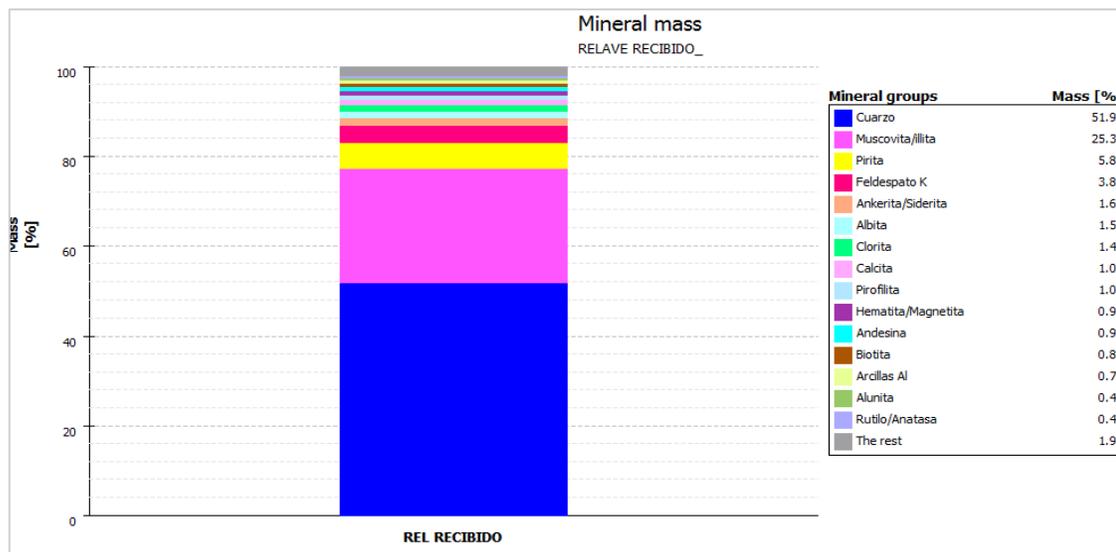


Figura 4.1 Composición mineralógica de relave recibido.

Tabla 4.2 Aporte elemental (% en peso) por estequiometría de la muestra de RR.

Elemento	O	Si	Al	Fe	S	K	Ca	Mg	C	Ti	H
RR	47,98	33,02	5,18	4,34	3,40	2,72	1,06	0,61	0,32	0,31	0,26

Elemento	Na	Cu	F	Pb	Mn	P	Ba	Zn	otros	Total
RR	0,20	0,16	0,15	0,11	0,07	0,05	0,04	0,01	0,03	100,00

Junto con la mineralogía más representativa, el modo de ocurrencia por elemento y el grado de liberación de los principales exponentes de aplicación industrial muestran que, para el caso de Cu la fase mineral que predomina es Calcopirita  $\text{CuFeS}_2$  (0,33% de la composición total), principal mena de cobre con casi dos tercios de su peso de Cu y Fe y estrechamente asociada a ésta se encuentra Pirita  $\text{FeS}_2$ , principal fase mineral de Fe. Asimismo, ambos minerales mayoritariamente cuentan con un área superficial completamente liberada o en su defecto con clases de liberación superiores a 90%. Este alto grado de liberación de las especies de cobre, indica que la planta concentradora tiene la oportunidad de mejorar sus condiciones operacionales, principalmente en flotación, para incrementar la recuperación de cobre. La probable pérdida de cobre en el relave podría estar asociada principalmente a recubrimientos parciales o completos de arcillas hidrofílicas sobre las partículas del mineral valioso relativamente gruesas, o bien asociadas al bajo tamaño de las partículas de cobre, en el rango de las llamadas lamas (ver Figura 4.2).

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Complementando la información mineralógica expuesta, la Figura 4.2

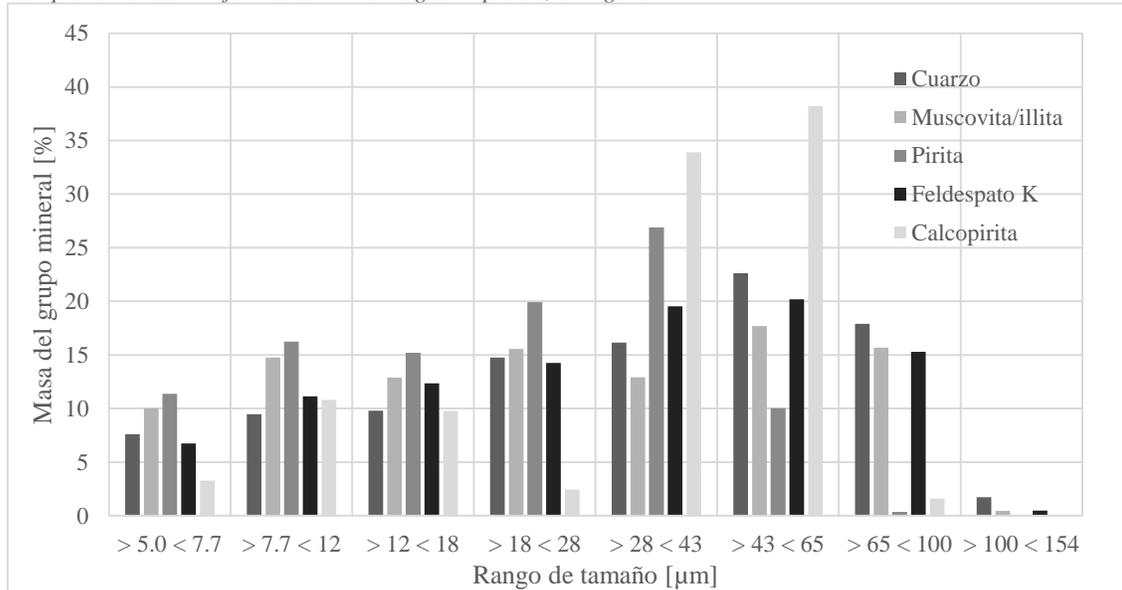


Figura 4.2 muestra la distribución en rangos de tamaño de estas partículas, haciendo énfasis en las fracciones de tamaño más finas donde predominan Pirita y arcillas del grupo de las Micas.

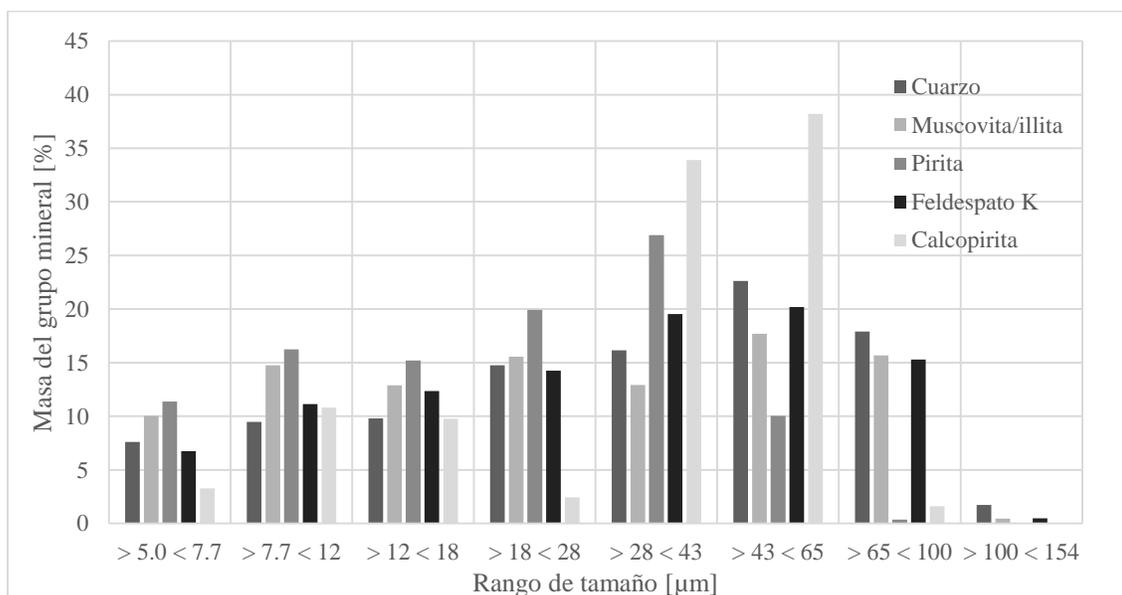


Figura 4.2 Tamaño de partícula para los grupos minerales presentes en el relave recibido.

Debido al pequeño tamaño que caracteriza a las arcillas y a los minerales asociados a éstas, su identificación certera, usualmente requiere análisis de difracción de rayos X. La muestra inicial se analiza considerando para efectos de este, una separación granulométrica correspondiendo un 10,78% a la fracción fina  $< 2\mu\text{m}$  y el porcentaje restante a la fracción gruesa  $> 2\mu\text{m}$ . El espectro característico de las reflexiones basales del relave como recibido para la fracción de arcilla total ( $< 2\mu\text{m}$ ), ver Figura 4.3 y Tabla 4.3, muestra la abundancia de arcillas del grupo illita, clorita, pirofilita y caolín, así como trazas de esmectita en la fracción evaluada. Nótese que los principales elementos de arcilla, moscovita/illita y Feldespato de potasio, tienen una contribución importante

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

para tamaños  $<10\mu\text{m}$ , que representan aproximadamente un 20% en peso. Este valor es considerado alto e incidente en las propiedades reológicas de una pulpa, debido a que gran parte de éste exhibe carga superficial y en algunos casos para granulometrías en el orden de los  $5\mu\text{m}$  características coloidales.

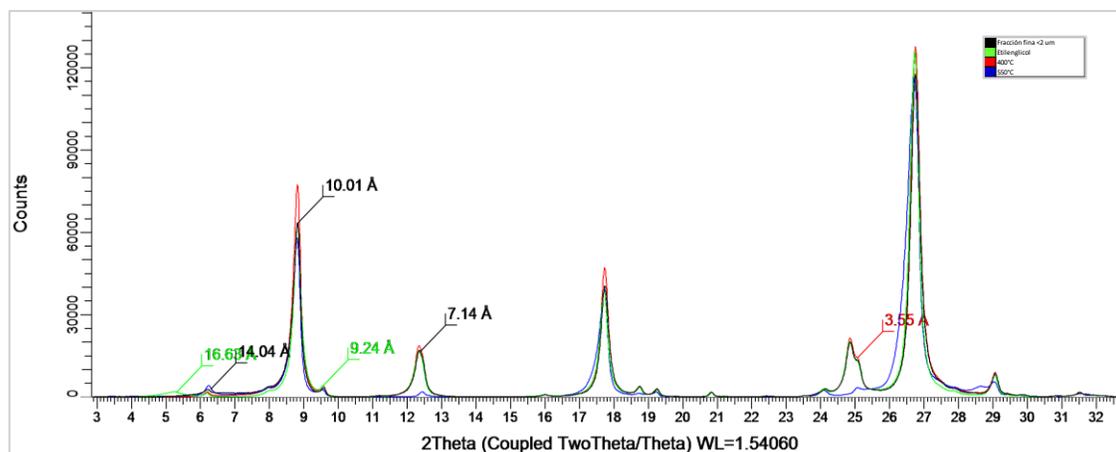


Figura 4.3 DRX-ID arcillas del relave recibido.

En el análisis por roca total, se encontró presencia de moscovita e illita mayoritariamente y menor proporción caolín, pirofilita y clorita.

Tabla 4.3 Semicuantificación a la fracción  $<2\mu\text{m}$ .

Arcilla	Fórmula química	Dureza*	% relativo	% en peso
<b>Illita</b>	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})]$	1 - 2	60,49%	6,52
<b>Caolín/Clorita</b>	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 / (\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2 - 2,5	35,26%	3,80
<b>Pirofilita</b>	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	1,5 - 2	4,26%	0,46
<b>Esmectitas</b>	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0,66}(\text{Al}, \text{Fe})_4(\text{Mg}, \text{Fe})_6(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_{20}(\text{OH})_4 n\text{H}_2\text{O}$	1 - 2	n. a	trazas

\*Valores de dureza según escala de Mohs.

Para una mejor comprensión del caso, las especies arcillosas presentes constituyen aquellas no expansivas o relativamente estables en presencia de agua y de mayor abundancia en la corteza terrestre. A su vez exhiben una baja dureza, lo que implica que estas se disgreguen con facilidad (minerales blandos dan muchas lamas), y dadas las diferentes propiedades que exhiben según el catión absorbido, resulta interesante saber que la actividad en absorber cationes de las arcillas Moscovita/illita, clorita y pirofilita es intermedia-baja y se dan en rangos típicos de CIC de  $10 - 40 \text{ cmol kg}^{-1}$ ; fenómeno que se explica producto de un área superficial específica entre  $10 - 100 \text{ m}^2 \text{ g}$ .

- Mineralogía por ICP

La cuantificación de los elementos químicos presentes en el relave recibido, como se observa en la figura 4.4 muestra que, los principales elementos asociados corresponden a aquellos metales alcalinos pertenecientes a los períodos 3 y 4 de la tabla periódica, esto es Aluminio (Al), Hierro

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

(Fe) y Potasio (K) con concentraciones de 40800, 29300 y 27200 [mg kg<sup>-1</sup>] respectivamente. Le sigue en abundancia Azufre (S), no metal con una concentración de 14200 [mg kg<sup>-1</sup>] y otros elementos como Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Manganeso (Mn), Cobre (Cu) y Titanio (Ti) que se encuentran en rangos menores, entre 5700 y 700 [mg kg<sup>-1</sup>].

Con respecto a la presencia de elementos de valor económico, sólo se muestra Lantano (La), elemento de tierra rara con una concentración relativamente baja de 23,58 [ppm]. Asimismo, en lo que respecta a Cobre, se reporta una ley de arrastre de este elemento en la cola de 0,15% aprox.

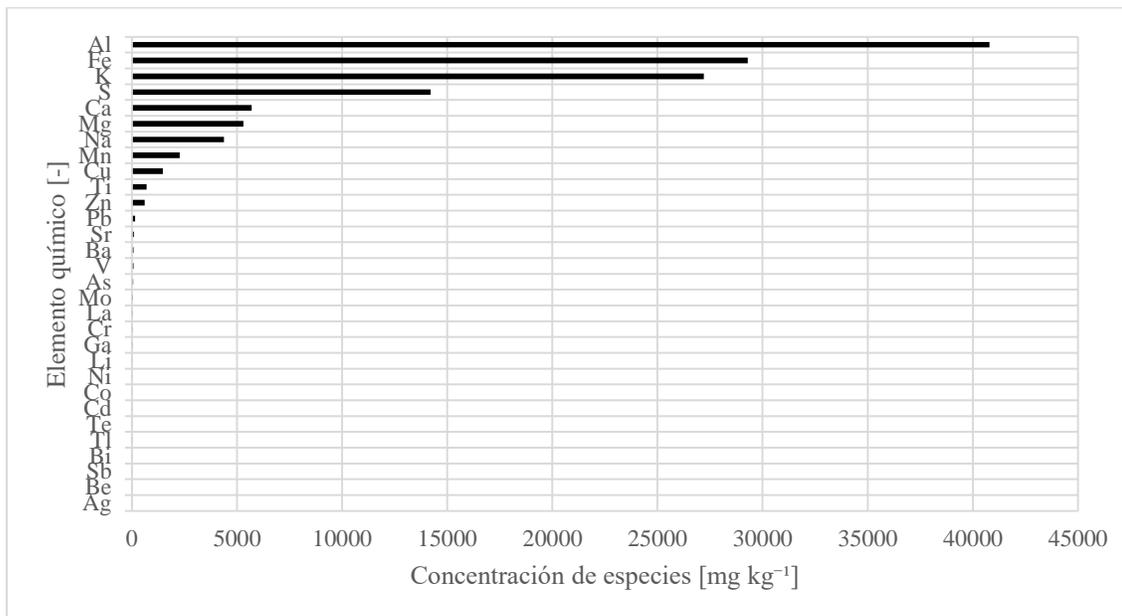


Figura 4.4 Concentración de elementos químicos presentes en el relave recibido para ser alimentado a experimentos de flotación inversa.

- Distribución granulométrica

Los diámetros característicos obtenidos del análisis granulométrico consolidado para la muestra cabeza se presentan en la Tabla 4.4. A partir de esta información y considerando que la notación  $D_x$  se refiere al diámetro por el que pasa el x por ciento de las partículas, se sabe que el 10% de la muestra tiene un diámetro menor a 3,1  $\mu\text{m}$ , así como el 50% y 80% de la muestra tienen un diámetro inferior a 35,6 y 172,5  $\mu\text{m}$  respectivamente.

Tabla 4.4 Diámetros característicos del relave recibido.

Muestra	Diámetro [ $\mu\text{m}$ ]		
	D10	D50	D80
<b>Relave recibido</b>	3,1	35,6	172,5

La curva generada de la distribución granulométrica se muestra en la Figura 4.5. De ahí se observa que la muestra de alimentación posee un F80 aproximadamente de 172,5  $\mu\text{m}$ .

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

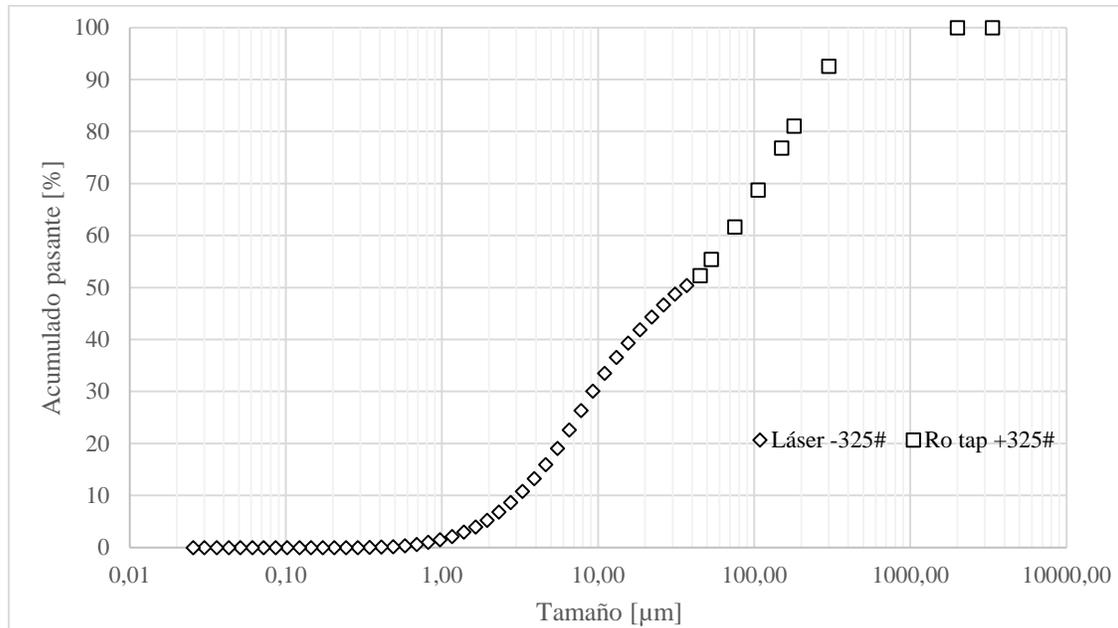


Figura 4.5 Distribución granulométrica del relave recibido.

- Reología del relave recibido

El comportamiento reológico del relave recibido subyace en los valores de tensión de fluencia y su viscosidad. En la Tabla 4.5 se observa los valores obtenidos, útiles al momento de analizar el cambio reológico de la pulpa luego de ser flotada.

Tabla 4.5 Propiedades reológicas medidas del relave recibido.

<b>Tensión de fluencia de Vane [Pa]</b>	<b>Tensión de fluencia de Bingham [Pa]</b>	<b>Viscosidad de Bingham [m Pa s]</b>
40,8	81 ± 2	67 ± 2

La mejor forma de evaluar las propiedades reológicas de un relave, y en detalle su respuesta al cizalle, es utilizar dos sensores con características específicas para cada fin: un sensor con amplia validación en la medición de tensiones de fluencia (sensor Vane) y otro para la aplicación de cizalle convectivo (sensor de cilindro helicoidal o ranurado).

Si bien, ambos métodos proporcionan como parámetro reológico: tensión de fluencia, hoy en día el valor proporcionado por el método Vane es el más utilizado pues, es el más representativo del efecto torque del espesador en las etapas de diseño, a diferencia del valor proporcionado por Bingham, el cual representa una propiedad intrínseca de la muestra en sí que guarda relación con el movimiento de constante agitación de ésta a causa de sus espiras y cuya lectura está sujeta a un procesamiento de datos con respecto a su viscosidad. Se diferencian desde el punto de vista del campo de aplicación y para efectos de análisis de resultados, en este trabajo se hace uso del parámetro de tensión de fluencia Vane.

Luego de esta consideración, importante es mencionar que el relave recibido exhibe una tensión de fluencia y viscosidad no menor pero dentro de un rango promedio típico, escenario que se condice con el 29% aprox. en peso que representan las arcillas en la muestra cabeza.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

### 4.1.2. Pruebas de flotación inversa y sedimentación.

#### 4.1.2.1. Parámetros de operación.

Las pruebas de flotación en laboratorios operan en un rango limitado de variables operacionales de acuerdo con los requerimientos de tiempo de residencia, a la presencia de arcillas, efectos de viscosidad y existencia de una interfase pulpa-espuma distintiva, requerida para la separación.

Las principales variables que influyen en el proceso de concentración por flotación y que se consideran en este estudio son:

- Porcentaje de sólidos y  $P_{80}$  de alimentación
- pH
- Flujo de inyección de aire
- Velocidad de agitación

En condiciones normales, los equipos de flotación batch operan controlando el porcentaje de sólidos y el pH de la operación, sin embargo, ya que se requiere una mejora a corto plazo posterior a la flotación convencional de cobre, se mantiene los valores obtenidos en la caracterización inicial del relave recibido sin variación, salvo algunas pruebas que precisan ser realizadas a pH cercano a 11. En cuanto a la inyección de aire y velocidad del impulsor, tasas entre  $10 - 18 \text{ L min}^{-1}$  y 750-1000 rpm son generalmente apropiadas para pruebas realizadas en una celda de hasta 5 litros (Runge, 2010); razón por la cual, y en consideración a ensayos previos en la colección de partículas menores a las  $10 \mu\text{m}$ , se selecciona una tasa de inyección de aire de  $15 \text{ L min}^{-1}$  y velocidades de rotación de 600 – 800 rpm para las etapas de acondicionamiento y flotación respectivamente (Cruz, et al., 2016).

Estas variables operacionales, junto con el nivel de altura de espuma, tienen un efecto significativo en la ley de concentrado y en la recuperación del mineral de interés. Los valores operacionales por utilizar para las pruebas se detallan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Parámetros de operación de flotación de relaves.

Parámetro	Unidad	Valor
<b>Cp</b>	%	36,7
<b>pH de trabajo</b>	-	11
<b>Tiempo de acondicionamiento y flotación</b>	min	10 – 5
<b>Velocidad de agitación en acondicionamiento y flotación</b>	rpm	600 – 800
<b>Flujo de aire</b>	$\text{L min}^{-1}$	15
<b>Frecuencia de paleteo</b>	s	10

Ensayos preliminares que analizan el comportamiento cualitativo de la zona de espuma dan cuenta de la necesidad de reponer regularmente agua en la celda para mantener una altura de espuma constante de 2 a 3 cm a lo largo de la prueba, y de esa manera favorecer una mejor colección de las partículas de interés y lograr un tiempo de residencia adecuado. Decisión considerada en perjuicio de posibles alteraciones en la reología de las colas flotadas.

Luego de concentrar arcillas por flotación inversa, las colas remanentes de la celda se agitan y se extrae de éstas 1 L de muestra para efectuar el ensayo de sedimentación según anexo 7.2 Procedimiento estándar de sedimentación. El cálculo de la velocidad con que sedimentan las

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

partículas y la obtención de la recuperación de agua en cada condición con respecto al agua que tiene inicialmente la muestra nos permitirá discernir qué situación es la más favorable.

### 4.1.2.2. Reactivos

El desarrollo del estudio considera para efectos de pruebas de flotación una fórmula de reactivos fija, cuya formulación contempla el uso de un reactivo coagulante y floculante, adicionalmente al colector de óxidos y espumante. El desarrollo de las pruebas busca determinar aquella dosificación óptima de reactivos que permita obtener el mejor desempeño metalúrgico. A continuación, el nombre de los reactivos a utilizar y su correspondiente gravedad específica:

Densidad [gml <sup>-1</sup> ]			
coagulante	floculante	colector	espumante
<b>Magnafloc 7793 LT</b>	<b>SF E 4833 Kemira</b>	<b>AERO845</b>	<b>AEROFROTH 70 MIBC</b>
1,51	n. a	1,12	0,81

El colector Aero845® es un promotor de tipo alquilo aniónico (C<sub>26</sub>H<sub>43</sub>lNNa<sub>4</sub>O<sub>10</sub>S) desarrollado para proveer una mayor selectividad que la obtenida con ácidos grasos o sulfonatos de petróleo. Se utiliza con éxito para el tratamiento de fosfato, fluoruro, cheelita, feldespato y arenas en general.

Asimismo, a raíz de la granulometría de entrada, que da indicios que tratarse de partículas que exhiben un comportamiento coloidal, se hace uso del reactivo coagulante Magnafloc 7793 LT y floculante SF 4833 Kemira para potenciar y favorecer la flotación selectiva de material particulado fino en suspensión.

### 4.1.2.3. Diseño de pruebas

El estudio de flotación del relave se orienta a determinar las variables respuesta: recuperación en peso y metalúrgica de arcillas y velocidad de sedimentación de las colas flotadas, a través de pruebas cuyo enfoque es la optimización en la dosificación de reactivos.

La Tabla 4.7 detalla el set de pruebas de flotación batch a tiempo fijo a ensayar, variando la dosificación de cada reactivo a utilizar. Los resultados obtenidos nos permitirán seleccionar aquellas pruebas que exhiban un mejor desempeño para ser posteriormente caracterizadas.

Tabla 4.7 Diseño de pruebas de flotación inversa.

#	Dosis gt <sup>-1</sup>			
	coagulante <b>Magnafloc 7793 LT</b>	Floculante <b>SF E 4833 Kemira</b>	Colector <b>AERO845</b>	Espumante <b>AEROFROTH 70 MIBC</b>
<b>1</b>	8	15	25	8
<b>2</b>	8	30	25	8
<b>3</b>	8	45	25	8
<b>4</b>	3	óptimo	25	8
<b>5</b>	8	óptimo	25	8
<b>6</b>	13	óptimo	25	8
<b>7</b>	óptimo	óptimo	25	3

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

8	óptimo	óptimo	25	8
9	óptimo	óptimo	25	13
10	3	0	25	óptimo
11	8	0	25	óptimo
12	13	0	25	óptimo
13	óptimo	0	15	óptimo
14	óptimo	0	25	óptimo
15	óptimo	0	40	óptimo
16	0	óptimo	15	óptimo
17	0	óptimo	25	óptimo
18	0	óptimo	40	óptimo
19	óptimo	óptimo	15	óptimo
20	óptimo	óptimo	25	óptimo
21	óptimo	óptimo	40	óptimo

### 4.1.2.4. Experimentos de optimización en la dosificación de reactivos.

Los datos experimentales de las pruebas de flotación y ensayos de sedimentación; junto a sus respectivas gráficas y cálculos se muestran en anexos 7.4 Datos experimentales y resultados de pruebas de flotación y sedimentación.

El material corresponde al mineral utilizado en un estudio previo desarrollado por el DIMM (Cruz, et al., 2016), por tanto, como primera aproximación se realizaron experimentos preliminares que buscan replicar los resultados obtenidos en términos de recuperación en peso, velocidad de sedimentación y recuperación de agua clara utilizando la fórmula más adecuada de reactivos para la flotación inversa del relave. La fórmula mejorada de reactivos que permitió obtener recuperaciones en peso del orden de 20% con una velocidad de sedimentación 6 puntos por encima que la registrada por el relave recibido se indica en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Fórmula optimizada de reactivos en estudio previo (Cruz, et al., 2016).

Dosis [ $gt^{-1}$ ]			
coagulante	Floculante	Colector	Espumante
<b>Magnafloc 7793 LT</b>	<b>SF E 4833 Kemira</b>	<b>AERO845</b>	<b>AEROFROTH 70 MIBC</b>
8	30	25	8

- a) Conducta de reactivos seleccionados frente a cambios en la concentración del reactivo floculante

En un inicio, y de acuerdo con los resultados obtenidos en experiencias previas, se hace uso de reactivos cuya dosificación obedece al resultado óptimo encontrada para este tipo de mineral de pulpa. Adicionalmente se estudia el impacto de variar la adición de floculante sobre la separación de finos-arcillas contenidas. La Tabla 4.9 detalla el diseño de experimentos, en cuanto a la dosis de reactivos a utilizar.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 4.9 Diseño de pruebas de flotación en presencia de coagulante y variando dosis de floculante.

Muestra	Dosis [ $gt^{-1}$ ]			
	coagulante Magnafloc 7793 LT	floculante SF E 4833 Kemira	colector AERO845	espumante AEROFROTH 70 MIBC
<b>F 15-5M</b>	8	15	25	8
<b>F 30-5M</b>	8	30	25	8
<b>F 45-5M</b>	8	45	25	8

Es importante destacar que estas pruebas están situadas en el contexto de optimización del proceso, razón por lo cual se presentan pruebas diseñadas con una adición menor y mayor de floculante respecto a la dosis base. La Tabla 4.10 muestra los resultados obtenidos de las pruebas de flotación y sedimentación. Las últimas dos columnas muestran la fracción de agua recuperada en la zona de sedimentación ( $V_s$  máxima) y en la zona de compresión ( $H > \infty$ ) respectivamente obtenidas en porcentaje, las cuales representan el agua recuperada en las colas que se obtienen en el ensayo de sedimentación simulando el proceso industrial de espesamiento.

Tabla 4.10 Resultados obtenidos de recuperación en peso y de agua clara al variar dosis de floculante.

Muestra	Dosis de floculante [ $gt^{-1}$ ]	Recuperación en peso [%]	Recuperación de agua clara [%]	
			Zona sedimentación	Zona compresión
<b>F 15-5M</b>	15	37,2	36,6	60,8
<b>F 30-5M</b>	30	25,5	33,4	57,9
<b>F 45-5M</b>	45	26,1	36,6	61,5

La recuperación de agua en la zona de compresión se encuentra en un rango bastante acotado, entre 58 – 61% aproximadamente; cifra no menor considerando que se trata de un relave cuyos principales componentes corresponden a arcillas no expansivas del grupo de las micas. Ahora bien, resultaría interesante llegar a porcentajes mayores de recuperación de agua debido a la presencia preponderante en la pulpa cabeza de arcillas que no tienen una capacidad de hinchamiento importante. Bajo esa premisa, probablemente las propiedades reológicas y consecuentemente las físicas nos permitirán más adelante discernir el tipo de arcillas que son recuperadas y cómo éstas son responsables de la tasa de recuperación de aguas claras.

La Figura 4.6 muestra la combinación de datos de recuperación en peso y velocidad de sedimentación obtenida para cada condición experimental descrita. A partir de esto es posible observar una ligera disminución de la recuperación en peso y un aumento en la velocidad de sedimentación a medida que aumenta la dosis de floculante utilizado. Considerando el escenario base del relave como recibido, una dosis de  $45\text{ }gt^{-1}$  de floculante recupera sobre un 25% favoreciendo la tasa con que sedimentan las partículas, sin embargo, sólo se logra una velocidad 0,6 puntos por encima de la velocidad de sedimentación inicial. Por otro lado, si bien en todos los casos se obtienen recuperaciones sobre el 20% en peso, dosis de 15 y  $30\text{ }gt^{-1}$  de floculante registran velocidades de sedimentación menores al relave como recibido, situación que puede deberse a una colección preferencial de gruesos por sobre finos en las etapas de flotación.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

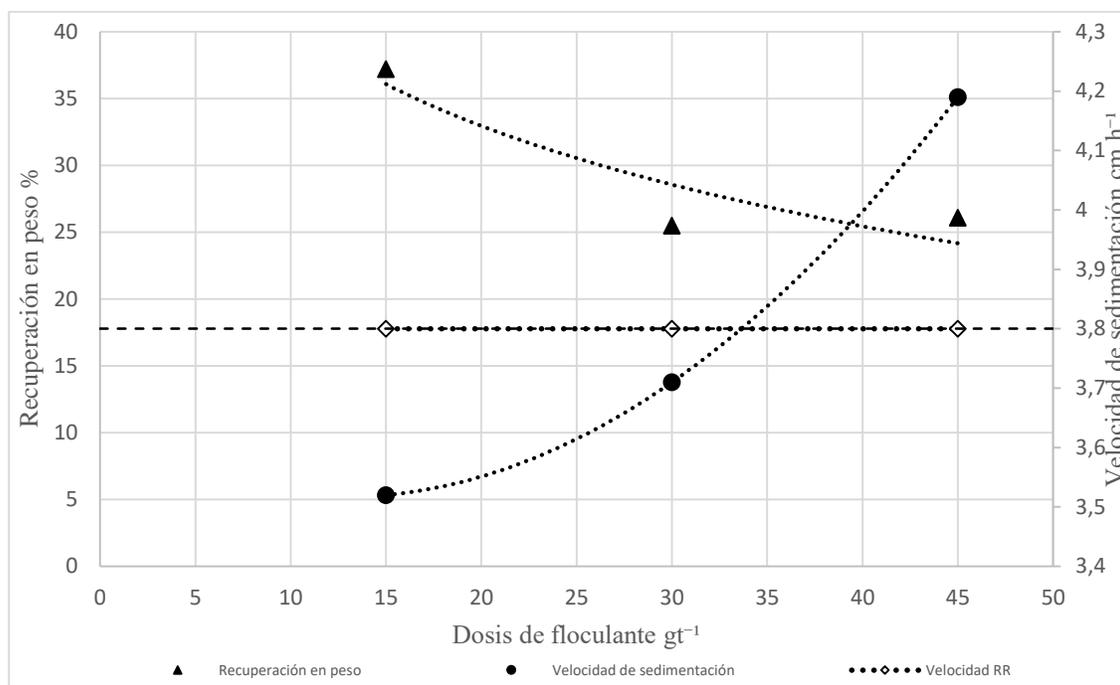


Figura 4.6 Resultados de flotación de relaves con distintas dosis de floculante y su respectiva velocidad de sedimentación.

A raíz de aquello, una dosis de 45  $\text{gt}^{-1}$  de floculante a pesar de que no representa una situación favorable, en términos económicos al escenario encontrado en el estudio previo, exhibe una mejoría en la velocidad de sedimentación y por ende en la recuperación de agua de proceso. Por lo tanto, el punto óptimo base en la dosificación del floculante se encuentra en aquella utilizada en la muestra F 45-5M.

### b) Conducta de la concentración del floculante seleccionado frente a cambios en la concentración del reactivo coagulante

Ahora bien, en vista que la extracción de material particulado fino y ultrafino precisa de una acción en conjunto con un agente coagulante para lograr mejores resultados, se realizan pruebas orientadas a establecer la dosis óptima requerida de este reactivo, para que, junto a los 45  $\text{gt}^{-1}$  de floculante se logre desestabilizar los coloides en suspensión y se aglomeren éstos para su posterior colección. La Tabla 4.11 detalla el diseño de experimentos en cuanto a la dosis de reactivos a utilizar, normalmente bajas para este tipo de reactivos.

Tabla 4.11 Diseño de pruebas de flotación en presencia de floculante y variando dosis de coagulante.

Muestra	Dosis [ $\text{gt}^{-1}$ ]			
	coagulante Magnafloc 7793 LT	floculante SF E 4833 Kemira	colector AERO845	espumante AEROFROTH 70 MIBC
<b>CF 3-5M</b>	3	45	25	8
<b>CF 8-5M</b>	8	45	25	8
<b>CF 13-5M</b>	13	45	25	8

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

La Tabla 4.12 muestra los resultados obtenidos de las pruebas de flotación y sedimentación. Con respecto a las recuperaciones de aguas claras obtenidas, tanto en la zona de sedimentación como en la de compactación no se observan diferencias significativas de una fórmula por sobre otra, dando pie a pensar a que no dependen fuertemente de la dosificación de coagulante. Sin embargo, se observa que, a pequeñas dosis, hay una mayor incidencia y esto eventualmente se deba a una acción más efectiva sobre el material de granulometría más fino que puede tener naturaleza coloidal, lo que permitiría mejorar significativamente la conducta reológica del material.

Tabla 4.12 Resultados obtenidos de recuperación en peso y de agua clara al variar dosis de coagulante.

Muestra	Dosis de coagulante [ $gt^{-1}$ ]	Recuperación en peso [%]	Recuperación de agua clara [%]	
			Zona sedimentación	Z. compactación
CF 3-5M	3	31,9	39,7	63,4
CF 8-5M	8	26,1	36,6	61,5
CF 13-5M	13	37,8	36,4	62,6

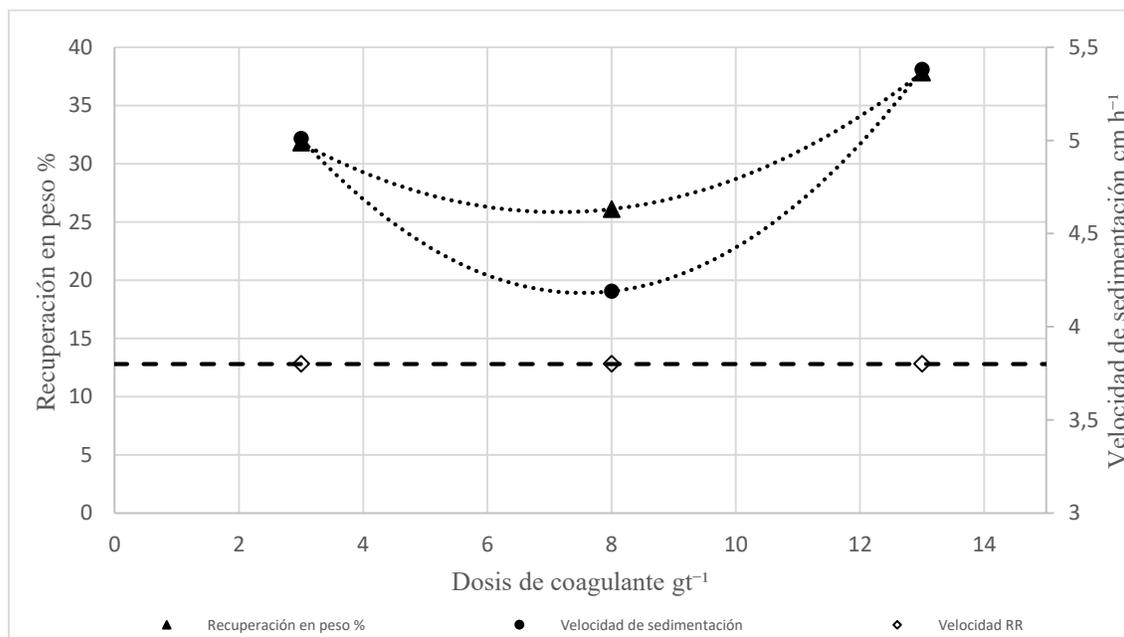


Figura 4.7 Resultados de flotación de relaves con distinta dosis de coagulante y su respectiva velocidad de sedimentación.

De la Figura 4.7 se observa que en todos los casos se obtienen velocidades de sedimentación superiores al escenario base junto con recuperaciones sobre el 25% en peso. Ahora bien, considerando el escenario base, operar con dosis de 3 y 13  $gt^{-1}$  de coagulante permitiría incrementar en 32 y 42% la tasa con la que sedimentan las partículas frente al 10% si utilizamos una dosis de 8  $gt^{-1}$ . Considerando este escenario, se selecciona como punto óptimo base, 13  $gt^{-1}$  como dosis de coagulante a utilizar para las próximas pruebas en vista del mejor rendimiento observado, en desmedro del factor económico (muestra CF 13-5M).

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

- c) Conducta de dosis coagulante + floculante seleccionada frente a cambios en la concentración del reactivo espumante

A raíz de lo observado en los ensayos previos, se estudia el efecto de variar la dosis de espumante, en cuya fórmula actúan conjuntamente las dosis óptimas determinadas tanto para coagulante como floculante. En ese contexto, la Tabla 4.13 reúne las dosificaciones de los reactivos a utilizar.

Tabla 4.13 Diseño de pruebas de flotación con dosis óptima de coagulante + floculante y variando dosis de espumante.

Muestra	Dosis [ $gt^{-1}$ ]			
	coagulante Magnafloc 7793 LT	floculante SF E 4833 Kemira	colector AERO845	espumante AEROFROTH 70 MIBC
<b>E 3-5M</b>	13	45	25	3
<b>E 8-5M</b>	13	45	25	8
<b>E 13-5M</b>	13	45	25	13

Durante el desarrollo de las pruebas se observa que la concentración de espumante a utilizar incide fuertemente en la calidad del colchón de espuma generado. Es más, tanto es así que diferencias de menos de  $10 gt^{-1}$  en la dosis de espumante afectan notoriamente se estabilidad y densidad de la espuma. Esto último se condice con los resultados experimentales de recuperación en peso y de agua clara obtenidos y que se detallan en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Resultados obtenidos de recuperación en peso y de agua clara al variar dosis de espumante.

Muestra	Dosis de espumante [ $gt^{-1}$ ]	Recuperación en peso [%]	Recuperación de agua clara [%]	
			Zona sedimentación	Zona compresión
<b>E 3-5M</b>	3	14,3	15,5	48,8
<b>E 8-5M</b>	8	37,8	36,4	62,6
<b>E 13-5M</b>	13	26,9	5,6	38,3

Comparando las recuperaciones en peso obtenidas, trabajar con dosis de  $8 gt^{-1}$  de espumante permite recuperar un 38% de sólidos y/o finos; 11 y 23 puntos porcentuales mayor respecto a trabajar bajo una dosificación mayor y menor de este reactivo respectivamente. Resulta esperable esto, toda vez que su incorporación afecta la resistencia de las burbujas y su superficie útil disponible.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

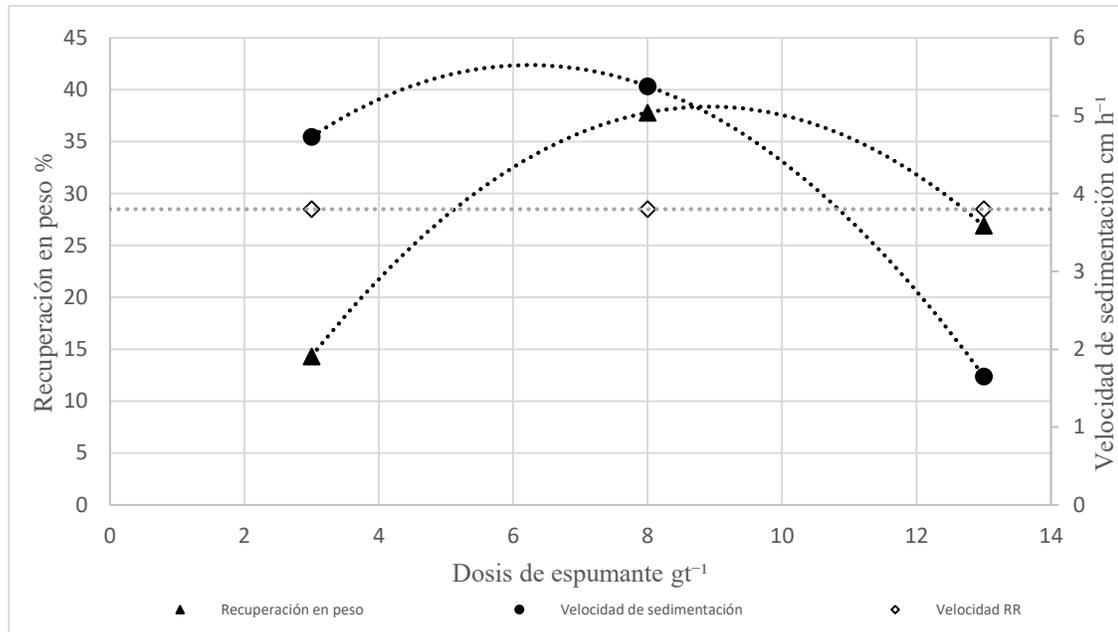


Figura 4.8 Resultados de flotación de relaves con dosis óptima de coagulante + floculante y variando dosis de espumante junto a su respectiva velocidad de sedimentación.

Tanto en la zona de sedimentación como de compactación, se observa una incidencia mayor en la recuperación de aguas al trabajar bajo una dosificación media de 8 gt<sup>-1</sup> de espumante, obteniéndose un 36 y 63% de recuperación respectivamente. Por otro lado, otro aspecto que reafirma lo anterior yace en la tasa con que sedimentan las partículas que no fueron retiradas y que permanecen aún en las colas. La Figura 4.8 confirma que trabajar con una dosis de 8 gt<sup>-1</sup> permite que la velocidad de sedimentación de las colas flotadas aumente respecto a la del relave como recibido. Así, los parámetros metalúrgicos de interés se ven mejorados trabajando con la dosificación de espumante considerada desde un inicio, pues su concentración permitía generar una espuma estable y más fácil de romper, aumentando el rendimiento y eficiencia en la recuperación de arcillas y consecuentemente en una mejora de la respuesta reológica.

### d) Conducta sin adición de floculante frente a cambios en la concentración del reactivo coagulante

Ahora bien, seleccionada la dosificación coagulante + floculante que exhibe mejores resultados, resultaría interesante estudiar la incidencia por separado que tiene la adición de ambos reactivos en los parámetros metalúrgicos de interés. La Tabla 4.15 detalla el diseño de experimentos, esta vez en ausencia de floculante. Sus resultados nos permitirían realizar un análisis consistente y encontrar la mejor fórmula de reactivos para lograr los objetivos propuestos.

Tabla 4.15 Diseño de pruebas de flotación en ausencia de floculante y variando dosis de coagulante.

Muestra	Dosis [gt <sup>-1</sup> ]			
	coagulante	floculante	colector	espumante
	Magnafloc 7793	SF E 4833 Kemira	AERO845	AEROFROTH 70 MIBC
	LT			
C 3-5M	3	0	25	8

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

<b>C 8-5M</b>	8	0	25	8
<b>C13-5M</b>	13	0	25	8

Los valores obtenidos de recuperación en peso y recuperación de aguas claras de los experimentos planificados en este set se muestran en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16 Resultados obtenidos de recuperación en peso y de agua clara en ausencia de floculante y variando dosis de coagulante.

Muestra	Dosis de coagulante [gt <sup>-1</sup> ]	Recuperación en peso [%]	Recuperación de agua clara [%]	
			Zona sedimentación	Zona compresión
<b>C 3-5M</b>	3	24,7	5,4	36,9
<b>C 8-5M</b>	8	31,0	5,4	36,0
<b>C 13-5M</b>	13	24,4	13,5	52,1

Con respecto a la recuperación de aguas claras obtenidas tanto en la zona de sedimentación como en la de compactación, se observan porcentajes bajos que no superan un 5 y 40% para las muestras cuya dosis utilizada fue de 3 y 8 gt<sup>-1</sup> respectivamente. Estas bajas cifras desde el punto de vista de la eficiencia en la recirculación de aguas de proceso, probablemente se deba a la incapacidad de aglomerar selectivamente los constituyentes de menor tamaño, siendo insuficiente la desestabilización superficial de éstas. La Figura 4.9 muestra cómo se relaciona la recuperación en peso con la velocidad de sedimentación en cada condición experimental descrita.

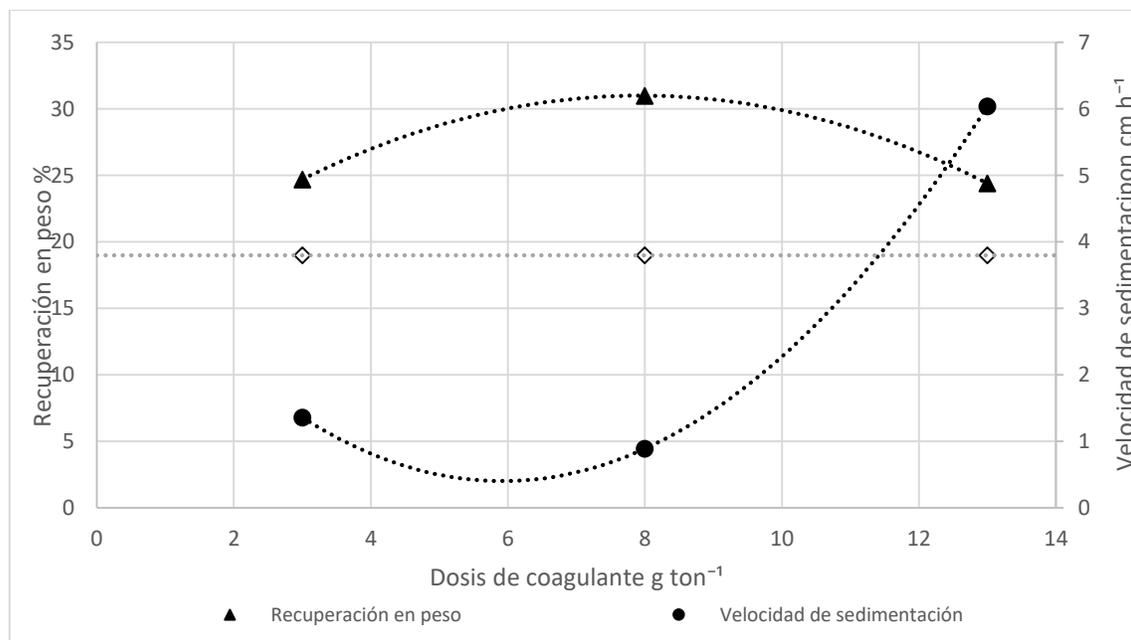


Figura 4.9 Resultados de flotación de relaves en ausencia de floculante y variando dosis de coagulante junto a su respectiva velocidad de sedimentación.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

De la gráfica es posible concluir que frente a una dosis de  $13 \text{ gt}^{-1}$  de coagulante la velocidad de sedimentación es significativamente mayor respecto a los otros escenarios. Esto probablemente se deba a la exigencia de una alta dosificación que sea capaz de ejercer una acción efectiva de desestabilización sobre aquellas fracciones ultrafinas que puedan exhibir un carácter coloidal cuando se está frente a un escenario de ausencia de floculante. Sin embargo, esta conclusión precisa más atención considerando la conducta reológica por ejemplo de las colas flotadas y la incidencia de otros reactivos.

e) Conducta sin adición de floculante frente a cambios en la concentración del reactivo colector

A raíz de los resultados anteriores, resultaría interesante evaluar si existe alguna mejoría respecto a la conducta sedimentológica de las colas flotadas y consecuentemente en la recuperación de aguas claras al variar la dosis del reactivo colector. La decisión de aquello obedece probablemente a la posibilidad de mejorar el escenario descrito anteriormente en caso de requerir una menor dosificación de este reactivo. La Tabla 4.17 reúne las dos dosificaciones a ensayar.

Tabla 4.17 Diseño de pruebas de flotación en ausencia de floculante y variando dosis de colector.

Muestra	Dosis [ $\text{gt}^{-1}$ ]			
	coagulante Magnafloc 7793 LT	floculante SF E 4833 Kemira	colector AERO845	espumante AEROFROTH 70 MIBC
CO15-5M	13	0	15	8
CO40-5M	13	0	40	8

Respecto a los resultados obtenidos y que se encuentran detallados en la Tabla 4.18 y Figura 4.10 se puede concluir que trabajar con una dosis distinta a los  $25 \text{ gt}^{-1}$  no mejora los parámetros metalúrgicos de interés. En general se observa una conducta desmejorada respecto a la velocidad con que sedimentan las partículas que permanecen aún en las colas y eso junto con la casi nula variación en la recuperación de arcillas impide alcanzar un escenario más favorable en la recuperación de aguas claras.

Tabla 4.18 Resultados obtenidos de recuperación en peso y de agua clara en ausencia de floculante y variando dosis de colector.

Muestra	Dosis de colector [ $\text{gt}^{-1}$ ]	Recuperación en peso [%]	Recuperación de agua clara [%]	
			Zona sedimentación	Zona compresión
CO 15-5M	15	25,1	1,4	30,3
CO 25-5M	25	24,4	13,5	52,1
CO 40-5M	40	22,5	19,1	51,6

Llama la atención los resultados obtenidos toda vez que se espera que a mayor dosificación de colector mayor sea la recuperación en peso a causa de una mayor superficie expuesta a hidrofobizarla. Sin embargo, esto último permite concluir que trabajar con una dosis de  $25 \text{ gt}^{-1}$  y no menor, asegura la obtención de los mejores resultados.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

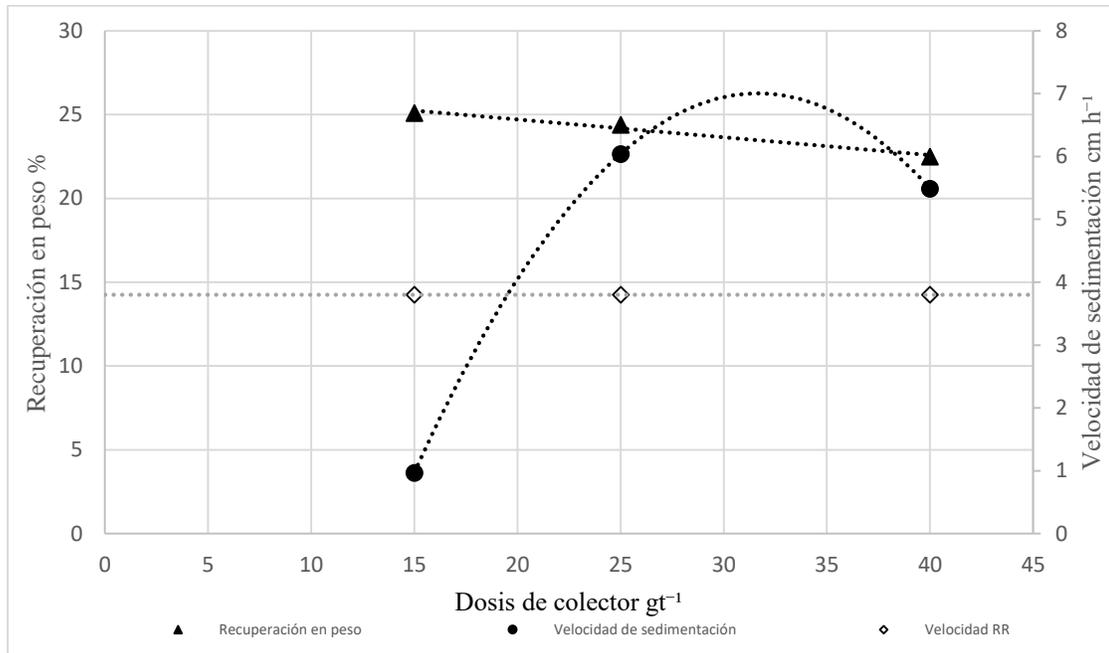


Figura 4.10 Resultados de flotación de relaves en ausencia de floculante y variando dosis de colector junto a su respectiva velocidad de sedimentación.

### f) Conducta sin adición de coagulante frente a cambio en la concentración del reactivo colector

Una vez estudiado la incidencia por separado que tiene la adición de coagulante en el proceso de flotación, resta ahora evaluar el efecto que genera en los parámetros metalúrgicos variar la dosificación de colector en presencia sólo de floculante. La Tabla 4.19 detalla el diseño de experimentos, esta vez en ausencia de coagulante. Sus resultados nos permitirían realizar un análisis consistente y encontrar la mejor fórmula de reactivos para lograr los objetivos propuestos.

Tabla 4.19 Diseño de pruebas de flotación en ausencia de coagulante y variando dosis de colector.

Muestra	Dosis [gt <sup>-1</sup> ]			
	coagulante Magnafloc 7793 LT	floculante SF E 4833 Kemira	colector AERO84 5	espumante AEROFROTH 70 MIBC
<b>COF 15-5M</b>	0	45	15	8
<b>COF 25-5M</b>	0	45	25	8
<b>COF 40-5M</b>	0	45	40	8

La Tabla 4.20 y Figura 4.11 muestran los resultados obtenidos de las pruebas de flotación y sedimentación. Con respecto a las recuperaciones de aguas claras obtenidas, tanto en la zona de sedimentación como en la zona de compactación no se observan diferencias significativas de una fórmula por sobre otra, dando pie a pensar a que no dependen fuertemente de la dosificación de colector y en presencia de floculante. Sin embargo, se observa que, a altas dosis de colector, hay una mayor incidencia y esto se debe a una mayor recuperación en peso de las arcillas y otros filosilicatos de granulometría más fina que permitiría mejorar significativamente la conducta reológica del material.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 4.20 Resultados de recuperación en peso y de agua clara en ausencia de coagulante y variando dosis de colector.

Muestra	Dosis de colector [ $gt^{-1}$ ]	Recuperación en peso [%]	Recuperación de agua clara [%]	
			Zona sedimentación	Zona compresión
COF 15-5M	15	23,9	10,5	48,9
COF 25-5M	25	23,1	11,4	49,0
COF 40-5M	40	42,9	15,5	51,2

Este alto porcentaje de recuperación en peso se condice con la velocidad de sedimentación significativamente superior al caso base como se observa en la Figura 4.11. El mecanismo de acción en conjunto de un colector con un floculante permitió extraer selectivamente un mayor contenido de partículas ultrafinas, y eventualmente de naturaleza coloidal, permitiendo alcanzar tasas de sedimentación mejoradas y recuperación de aguas claras respecto a trabajar en un escenario donde esté presente el mecanismo de acción en conjunto de un colector y coagulante. Esto probablemente se deba a un rendimiento mermado del reactivo coagulante al estar operando en un ambiente alcalino y/o a un eventual cambio en las características morfológicas de los coloides por el hecho trabajar con un relave que lleva 5 meses inactivos.

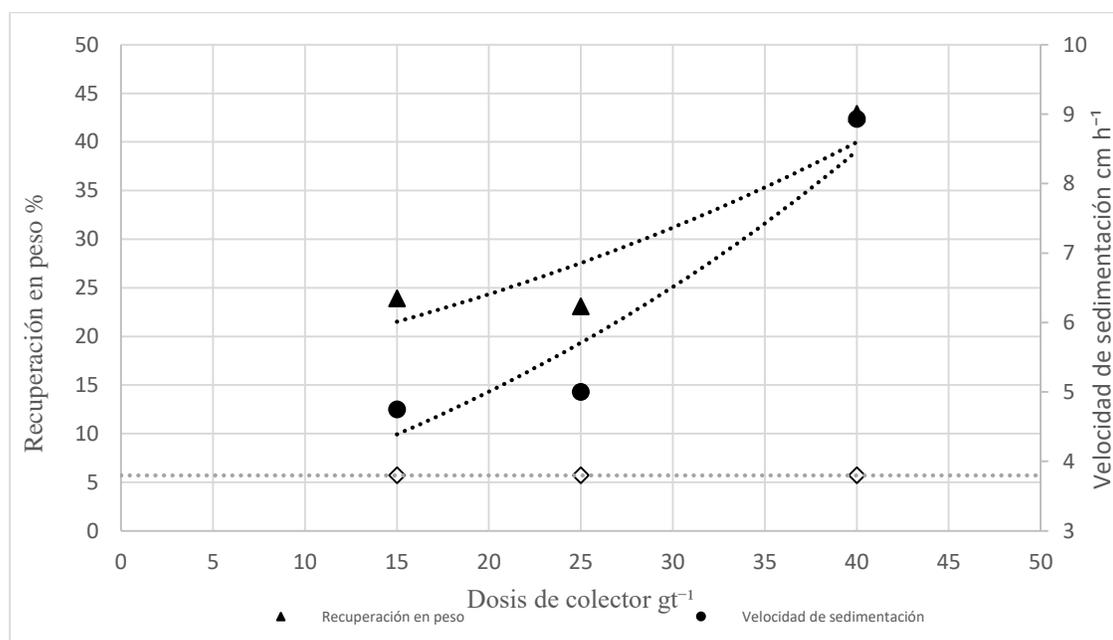


Figura 4.11 Resultados de flotación de relaves en ausencia de coagulante y variando dosis de colector junto a su respectiva velocidad de sedimentación.

g) Conducta de la concentración de reactivos seleccionada frente a cambios en la concentración del colector

A raíz de los resultados anteriores y de la base de contar en la fórmula de reactivos tanto con coagulante como floculante (13 y 45  $gt^{-1}$  respectivamente) resultaría interesante evaluar si existe alguna mejoría respecto a la conducta sedimentológica de las colas flotadas y consecuentemente en la recuperación de aguas claras al variar la dosis del reactivo colector. La decisión de aquello

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

obedece probablemente a la posibilidad de mejorar el escenario descrito anteriormente en caso de requerir una menor dosificación de este reactivo. La Tabla 4.21 reúne las dos dosificaciones a ensayar.

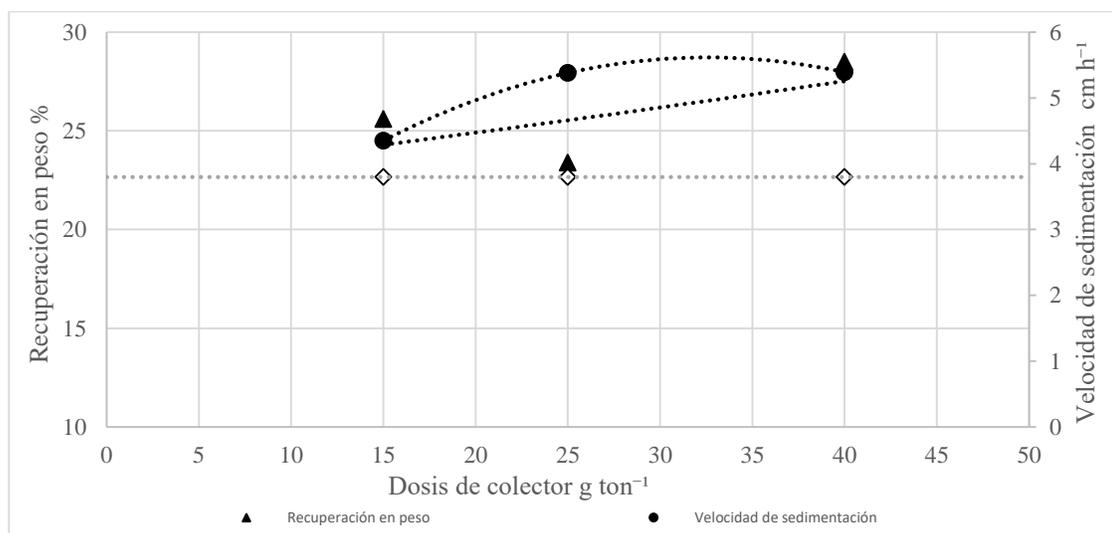
Tabla 4.21 Diseño de pruebas de flotación con fórmula optimizada y variando dosis de colector.

Muestra	Dosis [ $gt^{-1}$ ]			
	coagulante Magnafloc 7793 LT	floculante SF E 4833 Kemira	colector AERO845	espumante AEROFROTH 70 MIBC
<b>FC 15-5M</b>	13	45	15	8
<b>FC 40-5M</b>	13	45	40	8

Los valores obtenidos de recuperación en peso y recuperación de aguas claras de los experimentos planificados en este set se muestran en la Tabla 4.22. Con respecto a la recuperación de aguas claras obtenidas tanto en la zona de sedimentación como en la zona de compactación, se observan porcentajes bajos que no superan el 15 y 50% respectivamente, para aquellas muestras cuya dosis de colector utilizada era de 15 y 40  $gt^{-1}$ . Estas bajas cifras desde el punto de vista de la eficiencia en la recirculación de aguas de proceso, probablemente se deba, a una colección preferencial de gruesos por sobre finos y/o a probables efectos de interferencia que ocurren cuando se sobrepasa una cierta cantidad de colector en presencia de otros reactivos. La Figura 4.12 muestra la combinación de datos de recuperación en peso y velocidad de sedimentación obtenida para cada condición experimental descrita.

Tabla 4.22 Resultados de recuperación en peso y de agua clara con fórmula optimizada y variando dosis de colector.

Muestra	Dosis de colector [ $gt^{-1}$ ]	Recuperación en peso [%]	Recuperación de agua clara [%]	
			Zona sedimentación	Zona compresión
<b>FC 15-5M</b>	15	25,6	7,5	44,7
<b>FC 25-5M</b>	25	37,8	36,4	62,6
<b>FC 40-5M</b>	40	28,5	15,3	49,4



## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Figura 4.12 Resultado de flotación de relaves con fórmula óptima y variando dosis de colector junto a su respectiva velocidad de sedimentación.

A partir de esto es posible observar la existencia de una marcada tendencia hacia la utilización de dosis intermedias de colector, cuyo sustento se reafirma con los porcentajes de recuperación de arcillas registrados, pues dosificando  $25 \text{ gt}^{-1}$  se concentra un 12 y 10% más de sólidos que al utilizar una baja y alta dosis de este reactivo. Esto último se condice con la velocidad de sedimentación que se registran en las colas flotadas, pues sedimentan los sólidos a una tasa de  $5,38 \text{ cmh}^{-1}$ , similares a la obtenida al trabajar con una alta dosis.

A la luz de los resultados descritos anteriormente y que precisan de una mayor caracterización para robustecer el análisis de éstos, las cuatro pruebas que exhiben un mejor desempeño son las siguientes:

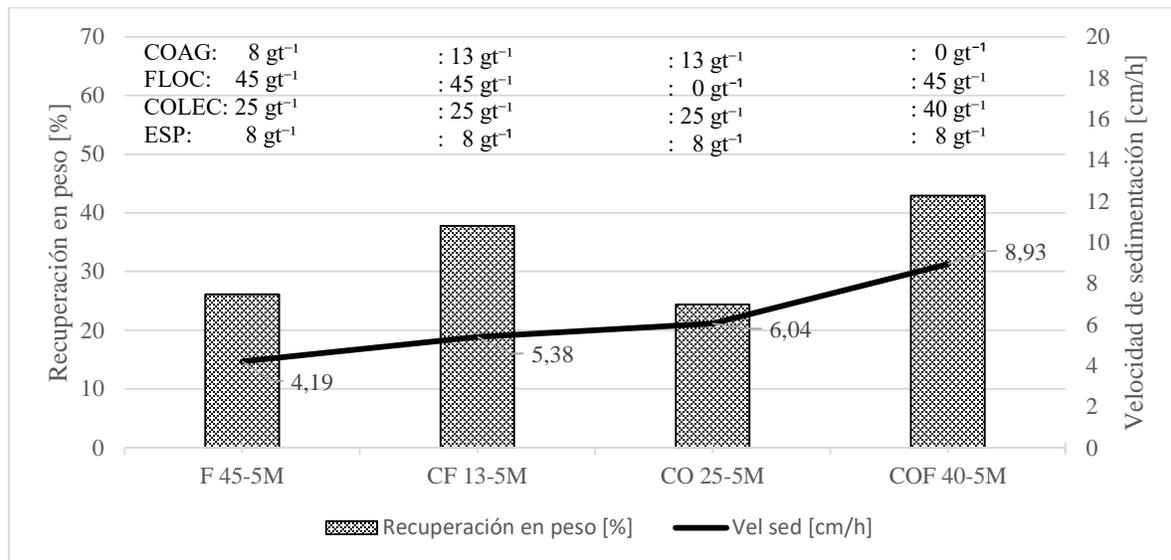


Figura 4.13 Pruebas de flotación con fórmulas optimizadas.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

### 4.1.3. Caracterización de los productos obtenidos de la flotación inversa de relaves.

Análisis previos de los resultados experimentales obtenidos de las flotaciones inversas indican que retirar una fracción de finos/arcillas de la pulpa de relave proveniente de un circuito de flotación aumenta la velocidad de sedimentación de las colas remanentes del ensayo de flotación favoreciendo la recuperación de agua clara en la etapa de espesamiento. No obstante, se realizaron análisis complementarios a los productos de la flotación inversa, concentrado (C) y colas flotadas (T) para robustecer el análisis de los resultados a través de análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX), análisis químico por espectrómetro de plasma inducido (ICP), análisis físico y distribución granulométrica y reología de las colas obtenidas de los ensayos de flotación. A continuación, el análisis de cada producto obtenido:

- Mineralogía por difracción de rayos X

En la Figura 4.14, el análisis de los productos obtenidos de la flotación inversa de los relaves, evidencia, en el caso de los concentrados, recuperaciones metalúrgicas por especie superiores al 20%. Si bien, existen diferencias al considerar una especie por sobre otra, se observa mejores recuperaciones de arcillas al operar con altas dosis de floculante (C4) y/o en presencia con coagulante (C2). Por otro lado, resulta interesante la evidencia de recuperaciones de calcopirita y piritita superiores al 23%, implicando que se trata de fases minerales muy diseminada en la ganga no metálica.

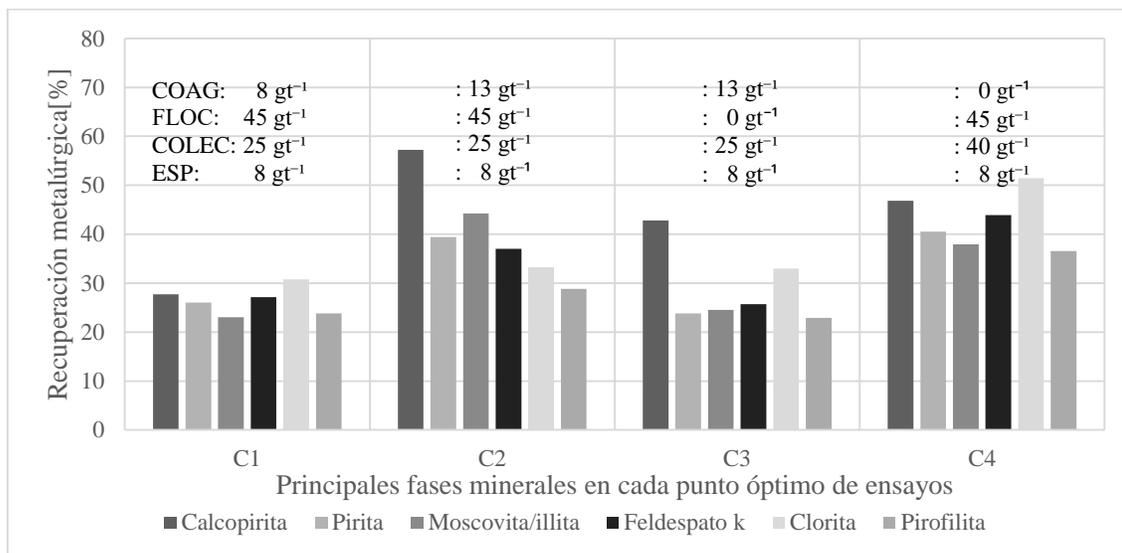


Figura 4.14 Recuperación metalúrgica de las especies minerales más significativas en los concentrados generados mediante flotación inversa de los puntos óptimos.

Analizando en detalle las fracciones granulométricas de los concentrados, se observa para el caso de la calcopirita una distribución de tamaños desplazada mayoritariamente hacia rangos más finos, representando del total de la composición, 30-40% aquellas menores a los 18  $\mu\text{m}$  (C3 y C4) y 20% para aquellas fracciones de partículas mayores a 65  $\mu\text{m}$  (C2). En el caso de las arcillas moscovita/illita el panorama nuevamente evidencia una concentración preferente de las fracciones finas por sobre las intermedia-gruesas. En particular, el concentrado C2 evidencia la mayor proporción de finos (40% mayores al caso base) y un aumento menos significativo para el caso del concentrado C3, en aquellas fracciones de tamaño menores a los 12  $\mu\text{m}$ .

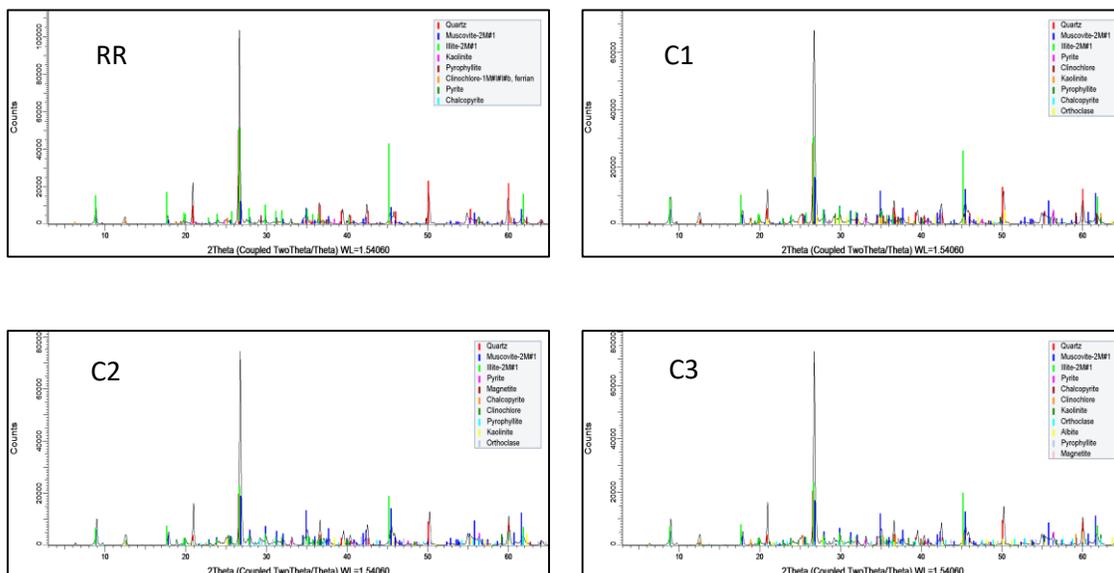
## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Ahora bien, el espectro característico de las reflexiones basales de los concentrados para la fracción de arcilla total (<2 µm), ver Tabla 4.23, muestra la misma tendencia y similar proporción de las especies de arcillas detectadas en el relave recibido, salvo en el concentrado C1 donde la proporción es similar. Se observa de los resultados semi-cuantitativos obtenidos, la abundancia de arcillas del tipo 2:1, en particular de illita y caolín/clorita.

Tabla 4.23 Porcentaje relativo de especies de arcilla detectadas bajo < 2µm de los concentrados generados por flotación inversa.

Arcilla	RR	C1	C2	C3	C4
	10.8% fino	12.1% fino	11.9% fino	12.1% fino	18.6% fino
<b>Illita</b>	60,49	28,89	54,67	60,74	55,7
<b>Caolín/clorita</b>	35,26	28,89	38,32	33,88	38,6
<b>Pirofilita</b>	4,26	3,68	7,01	5,37	0,057
<b>Esmectitas</b>	n. a	n. a			

Por otro lado, para obtener más información respecto a la conducta de las arcillas en la flotación se grafica a continuación la intensidad de los peaks en función del ángulo de barrido 2θ, considerando los datos una vez orientados (línea de color negro en las gráficas de la Figura 4.15). El contraste de los difractogramas muestra que la intensidad de los peaks reportados en los concentrados disminuye respecto a los observados en el relave recibido. Esto último resulta de interés, toda vez que la altura de los peaks se pueda relacionar con la cristalinidad de las especies de arcilla contenidas en cada producto de flotación. En ese sentido, las especies de arcilla que se reportan en los concentrados son aquellas fracciones menos cristalinas con tendencia a ser coloidales, es decir amorfas, que cuando se encontraban en el relave recibido. Esto último implica eventuales mejorías en la reología de las colas flotadas una vez que se extrae parte del material amorfo, pues al aplicar una carga a un material amorfo en un intervalo racionado de tiempo, la sustancia desarrollará una deformación pseudo-permanente, es decir, fluirá como si fuera un líquido de viscosidad muy alta.



## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

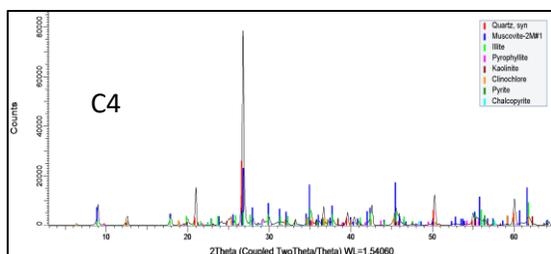


Figura 4.15 DRX-ID de arcillas de los concentrados generados por flotación inversa.

- Análisis mineralógico por ICP

Los ensayos por ICP a los concentrados flotados de arcillas son analizados por elementos en unidades de  $\text{mg kg}^{-1}$  con el objeto de saber su recuperación bajo las condiciones experimentales a las que se llevaron a cabo cada prueba de flotación inversa. Los elementos de valor en el relave recibido y su recuperación potencialmente como producto comercial muestran a partir de la Tabla 4.24 que la concentración y tendencia de especies principales se mantiene en todos los puntos óptimos. En los concentrados generados se observa que la concentración de los tres principales elementos reportados en el relave de cabeza (Al, Fe, K) varía en un rango que va entre 1300 mg y 10400 mg de elemento por kilogramo de relave. No obstante, y dado el interés que suscita la concentración de otras especies de valor estrechamente asociadas a arcillas, Lantano experimenta un leve incremento pasando de 23,58 mg por kg de relave a concentraciones en torno a los 31 mg  $\text{kg}^{-1}$  como máximo.

Tabla 4.24 Concentración de los principales elementos químicos presentes en los concentrados de arcilla generados por flotación inversa.

Muestra	Concentración elemental [ $\text{mg kg}^{-1}$ ]									
	Al	Fe	K	S	Ca	Mg	Na	Mn	Cu	La
<b>RR</b>	40800	29300	27200	14200	5700	5300	4370	2268	1467	23,6
<b>C1</b>	30400	26900	29000	14100	4300	3700	2480	1800	1614	20,0
<b>C2</b>	35500	36700	24700	18700	5600	4300	3490	2508	2141	29,5
<b>C3</b>	39500	37700	25700	19300	5400	4800	2910	2591	2262	31,7
<b>C4</b>	31400	33400	22500	15700	5600	3500	2920	2329	1600	27,0

Junto con los datos obtenidos de recuperación másica de las pruebas efectuadas bajo las condiciones óptimas encontradas y a la información reportada de leyes de los principales elementos presentes tanto en el relave recibido como en los concentrados generados, se obtiene la recuperación metalúrgica como indicador de rendimiento el cual se presenta en la Figura 4.16. A partir de estos resultados es posible afirmar la obtención de recuperaciones en un rango entre los 15 y 55 puntos porcentuales, todos ellos significativos. No obstante, se observan algunas diferencias al utilizar distintas fórmulas de reactivo. Los concentrados C2 (13  $\text{gt}^{-1}$  coagulante y 45  $\text{gt}^{-1}$  floculante) y C4 (45  $\text{gt}^{-1}$  floculante y 40  $\text{gt}^{-1}$  colector), muestran tasas de recuperación por elemento superiores al resto de los otros casos, situación que se condice con las recuperaciones de 37,8 y 42,9% en peso registradas en ambas pruebas de flotación. Caso contrario a lo observado se muestra en el concentrado C1, en el cual se obtuvieron las más bajas recuperaciones al

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

disminuir la dosificación en  $5 \text{ gt}^{-1}$  de coagulante respecto a la dosificación utilizada para la muestra C2.

Con respecto a la situación del elemento de tierra rara liviana, Lantano (La), se obtienen recuperaciones significativas en todas las condiciones óptimas analizadas, en cuyo caso van desde los no menores 22,2% a los 49,1%, precisamente en las muestras C1 y C4 respectivamente.

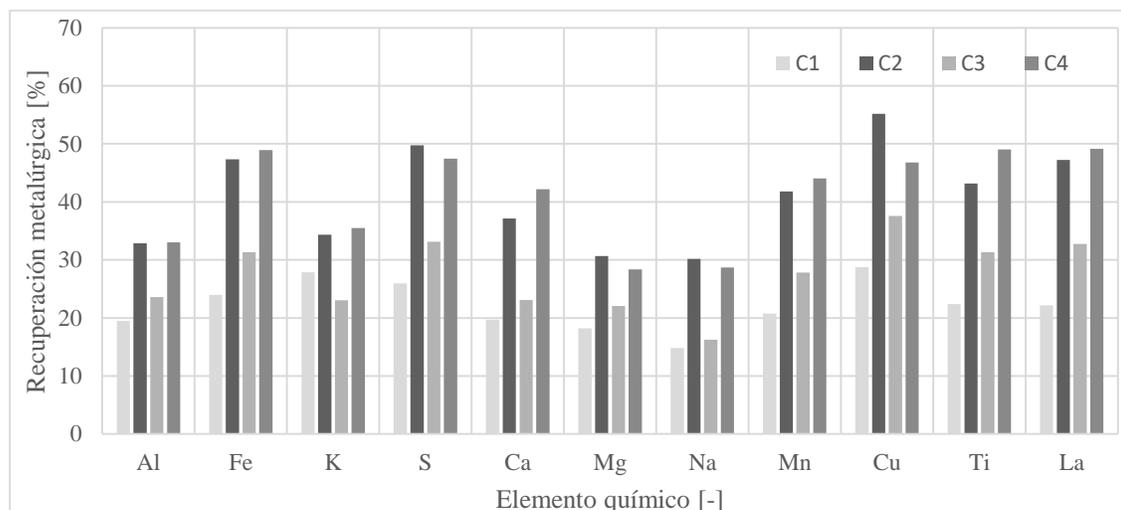


Figura 4.16 Recuperación metalúrgica de los elementos químicos más significativos en los concentrados generados por flotación inversa.

Ahora bien, el grado de concentración por elemento como indicador de evaluación del proceso da cuenta, a partir de la Figura 4.17, qué tan enriquecido están los concentrados respecto a los principales elementos químicos. Se obtienen en los concentrados enriquecimientos variados de las principales especies elementales. Por un lado, en todos los concentrados enriquecimientos por sobre la unidad, se destacan cobre, azufre, hierro, lantano y manganeso, para los cuales resultaría interesante evaluar recuperar la ley obtenida en los concentrados flotados de arcilla. No obstante, pese a que se observan algunas diferencias al utilizar distintas fórmulas de reactivos, evaluar el potencial beneficio económico de recuperar cobre o hierro merece especial atención, considerando las leyes de Cu reportadas (0,16 a 0,25%) en los concentrados y la incidencia de Fe en el aumento de la densidad específica de una pulpa.

En lo que respecta a Lantano (La), único elemento estratégico reportado en las muestras, para que esta tierra rara sea potencialmente tratable y comercializada como óxido se debe reportar con valores superiores a los  $350 \text{ mg kg}^{-1}$ , exigencia que dista mucho de las concentraciones obtenidas en los concentrados pues, en ellos sólo se encuentra la décima parte. (Ref. Profesor J. Ipinza)

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

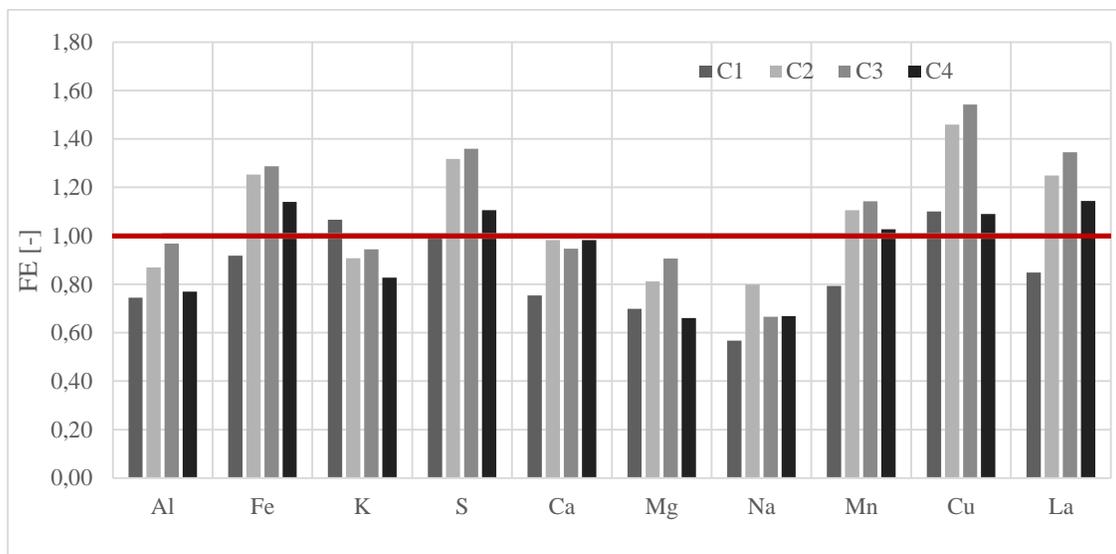


Figura 4.17 Razón de enriquecimiento (RE) de los principales elementos químicos obtenidos en los concentrados por flotación inversa.

- Distribución granulométrica

Considerando que la velocidad de sedimentación con que se mueve una partícula en un fluido en reposo depende del tamaño de estas, es preciso estudiar el espectro de tamaño de las partículas en las colas y concentrados remanentes. La distribución granulométrica de las masas retenidas por tamiz se encuentra en anexos 7.5 Datos de distribución granulométrica por muestra. La Tabla 4.25 presenta los diámetros característicos obtenidos del análisis granulométrico consolidado para las muestras en estudio.

Tabla 4.25 Diámetros característicos de los relaves flotados.

Muestra	Diámetros característicos [ $\mu\text{m}$ ]		
	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>80</sub>
<b>RR</b>	3,1	35,6	172,5
<b>T1</b>	3,0	32,9	131,7
<b>T2</b>	3,2	42,4	136,2
<b>T3</b>	3,7	67,6	221,8
<b>T4</b>	4,5	86,1	243,0

Los diámetros característicos como parámetro físico evidencian la disminución de finos/arcillas en las colas remanentes, ya que aumenta el tamaño de partícula o diámetro aparente tanto D<sub>10</sub> como D<sub>50</sub>. Si bien, en la mayoría de las muestras se observa claramente esta situación, la presencia simultánea de altas dosis de coagulante y floculante (T1 y T2) producen un efecto de interferencia mermando una recuperación selectiva de finos/arcillas y por tanto privilegiando y/o arrastrando la captura de especies asociadas a tamaños intermedio-gruesos. Situación que se corrobora al observar la disminución de todos los diámetros característicos para la cola flotada T1 y sólo el D<sub>80</sub> para la cola T2, en comparación a las registradas por la muestra cabeza.

Ahora bien, si relacionamos estos resultados con la velocidad de sedimentación de las colas flotadas, la situación nuevamente deja de manifiesto una colección de tamaños intermedios-gruesos por sobre finos ya que se logran velocidades 40% más bajas que las registradas en

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

aquellas muestras caracterizadas por diámetros mayores. En este contexto, se observa que operar simultáneamente con dosificaciones de 8 y 13  $gt^{-1}$  de coagulante y 45  $gt^{-1}$  de floculante se favorece una mayor estabilidad a la solución coloidal y por ende un menor retiro de finos.

La Figura 4.18 muestra la distribución granulométrica consolidada, acumulado pasante vs. Tamaño de partículas para las muestras de relave obtenidas. Siguiendo el análisis previo, el retiro parcial de fracciones finas influye positivamente en la velocidad de sedimentación, asegurando una mejor operación en el espesamiento y en consecuencia favoreciendo la recuperación de agua clara (distribuciones a la derecha de la curva de RR).

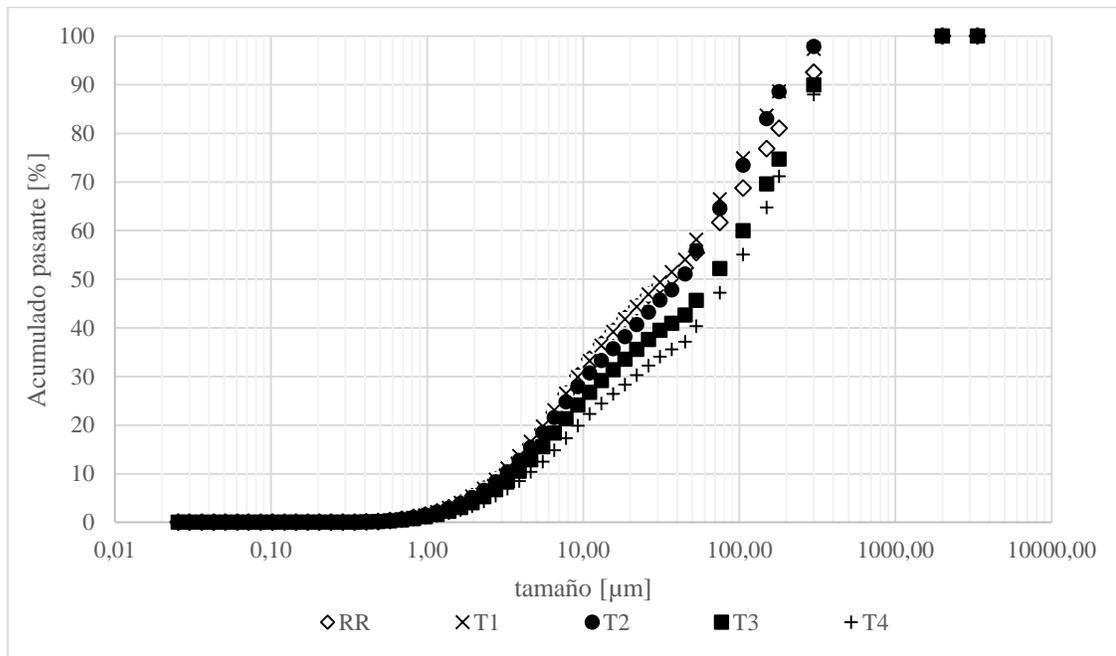


Figura 4.18 Distribución granulométrica de las colas flotadas en los puntos óptimos.

Asimismo, como se muestra en la Figura 4.19, las especies minerales más significativas reportadas en los concentrados se encuentran en aquellas fracciones granulométricas por debajo de los 10  $\mu m$ ; situación que se condice con el aumento del  $D_{10}$  de los relaves flotados. Si bien, se observa una situación favorable en ese aspecto para todo ensayo, existen diferencias en el  $D_{10}$  del orden de 2,3 micras entre una fórmula de reactivo y otra en lo concerniente a Moscovita/illita, principal fase mineral de arcilla presente en la muestra cabeza.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

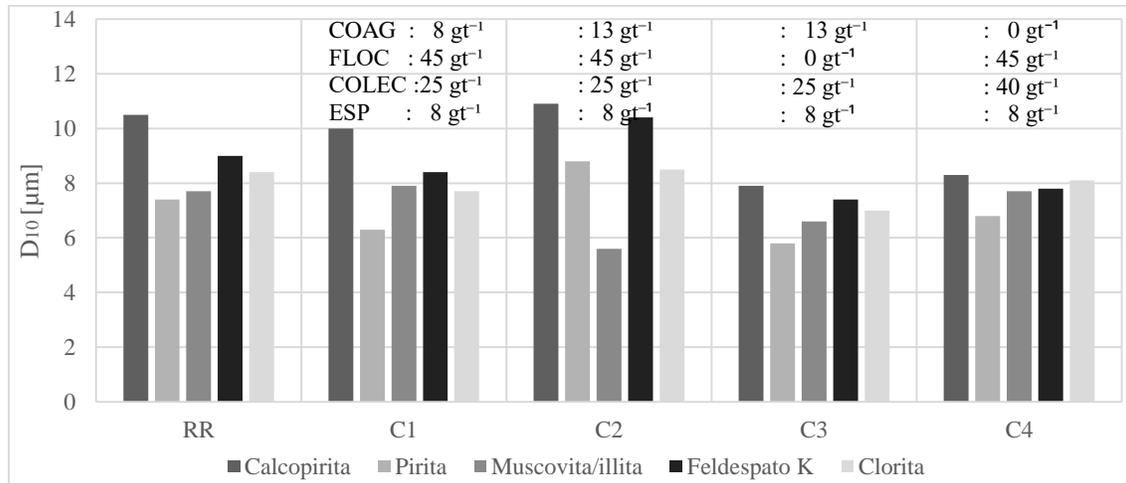


Figura 4.19 D<sub>10</sub> de las especies minerales más significativas en los concentrados generados mediante flotación inversa de los puntos óptimos.

Operando con una dosis de 13 gt<sup>-1</sup> de coagulante y 45 gt<sup>-1</sup> de floculante (C2) se recupera las fracciones más finas de Muscovita/illita y las más gruesas de las otras fases minerales presentes que, aun siendo gruesos son al parecer de complejidad. Si bien, esto último se traduce en una mejoría en la velocidad de sedimentación que registra la cola flotada T2 de 5,38 cm h<sup>-1</sup> (ver Figura 4.20), no es el escenario óptimo pues se obtiene un mejor registro con otras dosis de reactivos. Es así como al operar con 45 gt<sup>-1</sup> de floculante y en ausencia de coagulante (C4), las principales fases minerales reportadas en el concentrado exhiben un D<sub>10</sub> menor a 8 micras y más uniforme, repercutiendo de mejor manera en la velocidad de sedimentación obtenida.

Por otro lado, comparando los diámetros entre los concentrados C2 y C4, la ausencia de coagulante y una alta dosis de colector favorece la colección de partículas de tamaños medio-finos de todos los componentes sin selectividad de uno por sobre otro. Lo anterior explica que la velocidad de sedimentación registrada para este caso sea dos veces mayor a la exhibida por el relave recibido.

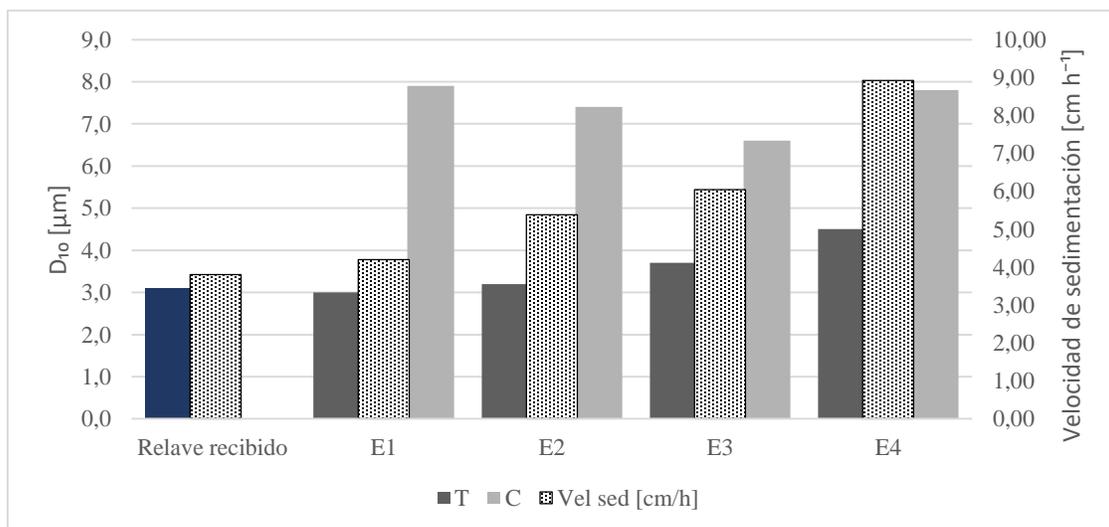


Figura 4.20 Velocidad de sedimentación de las colas remanentes vs D<sub>10</sub> del concentrado obtenido por flotación inversa.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

- Análisis reológico de los relaves flotados

La Tabla 4.26 y Figura 4.21 reúnen los parámetros que caracterizan el comportamiento reológico en los puntos óptimos de las colas remanentes del relave flotado, observándose claramente una mejoría en todos los indicadores respecto al caso base.

La caracterización de los fenómenos de interacción de partículas en estas muestras evidencia que la flotación del relave produce un efecto de cambio significativo en la tensión de fluencia de la cola y su viscosidad. Esta mejoría en las propiedades reológicas concuerda con lo observado en ensayos de sedimentación, y que se condicen por la distribución granulométrica de las muestras, donde la velocidad de asentamiento de las partículas experimentaba una mejoría respecto al relave como recibido.

Tabla 4.26 Propiedades reológicas medidas de los puntos óptimos de los relaves envejecidos.

Muestra	T [°C]	C <sub>p</sub> reconstituido [%]	Tensión de fluencia de Vane [Pa]	Tensión de fluencia de Bingham [Pa]	Viscosidad de Bingham [mPa s]	pH [-]
RR	23,8	60,2%	40,8	81 ± 2	67 ± 2	7,4
T1	24,4	62,2%	20,6	35 ± 1	46 ± 1	7,5
T2	24,7	59,7%	10,7	16 ± 0,5	31 ± 1	7,5
T3	23,7	59,8%	8,55	13 ± 0,6	29 ± 3	7,5
T4	24,1	61,9%	7,16	10 ± 1	24 ± 5	7,5

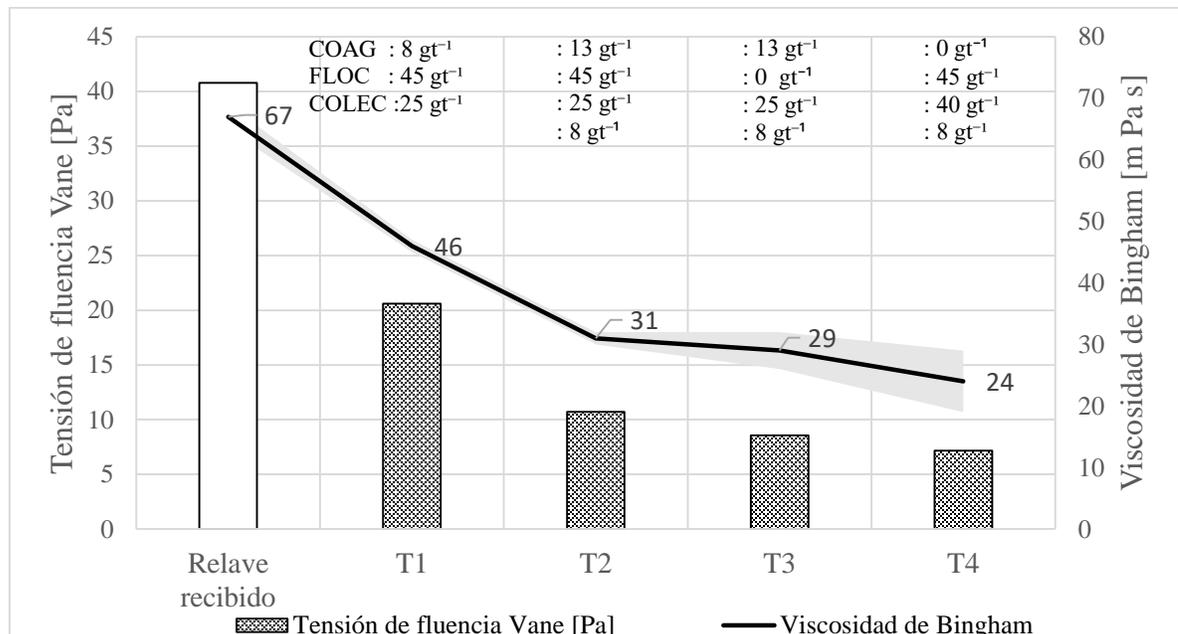


Figura 4.21 Tensión de fluencia y Viscosidad de las colas remanentes.

A raíz de los resultados obtenidos, la mejor condición en términos del esfuerzo mínimo que debe aplicarse al relave para que este fluya, es dosificando en flotación altas dosis de floculante en presencia o ausencia de coagulante (muestras T4 y T2) o bien en presencia de sólo coagulante y

en dosis moderadas (T3). Lo anterior obedece a una extracción preferente de fracciones de tamaño intermedio de los constituyentes minerales y en particular, de arcilla que, si bien no representa aquella fracción más fina con carácter coloidal, permitió recuperar sobre un 37 y 44% aproximadamente de Moscovita/illita y feldespato de potasio; especies que de alguna manera aportaban a la estabilidad coloidal del conjunto en su totalidad.

Por otro lado, el estudio de estas variables que condicionan el transporte de las pulpas considera para efectos de comparación con estudios previos, reconstituir la concentración de sólidos en peso  $C_p$  en torno a 60% ya que la muestra inicialmente contaba con valores en torno a 37% de este parámetro. Asimismo, se registra algunas características del fluido como temperatura y viscosidad; que pueden ser muy determinantes en el comportamiento reológico, no mostrando cambios significativos que permitan un mayor análisis.

#### 4.1.4. Incidencia del componente mineralógico en el comportamiento reológico y sedimentológico de relaves.

Dentro de los desafíos que plantea la gestión de relaves, uno de los temas que ha estado presente en la agenda de la última versión del seminario *Tailings* 2018, ha sido la importancia de contar con una estimación preliminar del comportamiento reológico y sedimentológico de pulpas de relave antes de entrar al circuito de procesamiento de una planta concentradora; esto último con el fin de simular complejos escenarios asociados principalmente a la recuperación de aguas, transporte y disposición final de estos.

El DIMM y CI-JRI conscientes de la importancia del tema, han impulsado estudios previos que marcan la pauta y trazan directrices acerca de la importancia de una identificación temprana de aquellos elementos de ganga que modifican negativamente la conducta de las pulpas minerales, y como éstos son responsables de condicionar el comportamiento que exhibirá el relave a partir de la mineralogía del mineral de cabeza. Dicho esto, las conclusiones que se recojan de este escrito constituyen una continuación de estos trabajos.

De la base de contar con la caracterización inicial del relave recibido, tanto para el utilizado en este estudio (UG2) como en estudios previos (UG1) (Cruz, et al., 2016); ambos de DMH pero provenientes de distintas unidades geológicas del yacimiento (desfase de 5 meses aprox.) y considerando los resultados previamente obtenidos en términos de extracción de arcillas y recuperación de aguas claras, resta ahora contrastar de manera preliminar esos resultados con los obtenidos en el presente estudio. La Tabla 4.27 reúne los parámetros metalúrgicos de interés de aquellos ensayos cuya dosificación obedece al resultado óptimo encontrado para este tipo de mineral y que significó la base en el inicio del diseño de experimentos. Si bien la dosis de floculante no es la misma, de igual modo es posible realizar una comparación válida pues la dosis de los otros reactivos si lo son. La fórmula de reactivos fue la siguiente:

- 8  $gt^{-1}$  de coagulante Magnafloc 7793 LT
- 30  $gt^{-1}$  (UG1) y 45  $gt^{-1}$  (UG2) de floculante SF E 4833 Kemira
- 25  $gt^{-1}$  de colector AERO 845
- 8  $gt^{-1}$  de espumante AEROFROTH 70 MIBC

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

De la respuesta metalúrgica, es posible concluir que existe una cierta correspondencia en los resultados obtenidos, principalmente en lo que respecta a recuperaciones en peso de arcillas y/o filosilicatos en general y recuperación de aguas claras. Esto da a entender que pese a tratarse a minerales de cabeza provenientes de distinto ciclo de extracción, se piensa en una cierta similitud entre los componentes minerales presentes y que condicionan la conducta de las colas flotadas. Sin embargo, llama la atención las diferencias en las velocidades de sedimentación de las colas, que no se conciben con la conducta que se esperaría y que obligan a un análisis más en detalle.

Tabla 4.27 Comparación de resultados metalúrgicos utilizando distintas unidades geológicas.

Muestra	Floculante [g/t]	Rec. Peso [%]	Rec. Agua [%]	Velocidad sed [cm/h]
UG 1	30	24	55	9,78
UG 2	45	26	61	4,19

La Figura 4.22 resume las principales especies mineralógicas identificadas en el mineral de cabeza (relave recibido), donde se aprecia el predominio de especies pertenecientes al grupo de las micas (sericita, moscovita/illita) y en menor medida asociada a esta y con una estructura cristalina similar, se encuentran minerales del grupo de las cloritas. Conformando la ganga, las micas figuran entre los minerales más abundantes del yacimiento encontrándose junto a minerales de cuarzo y feldespatos. Si bien la predominancia se mantiene con el tiempo, existe un cambio a nivel de subgrupo y más aún del contenido de filosilicatos presentes, lo que a simple vista podría explicar eventuales cambios en la conducta de relave por el hecho de estar la planta procesando continuamente mineral.

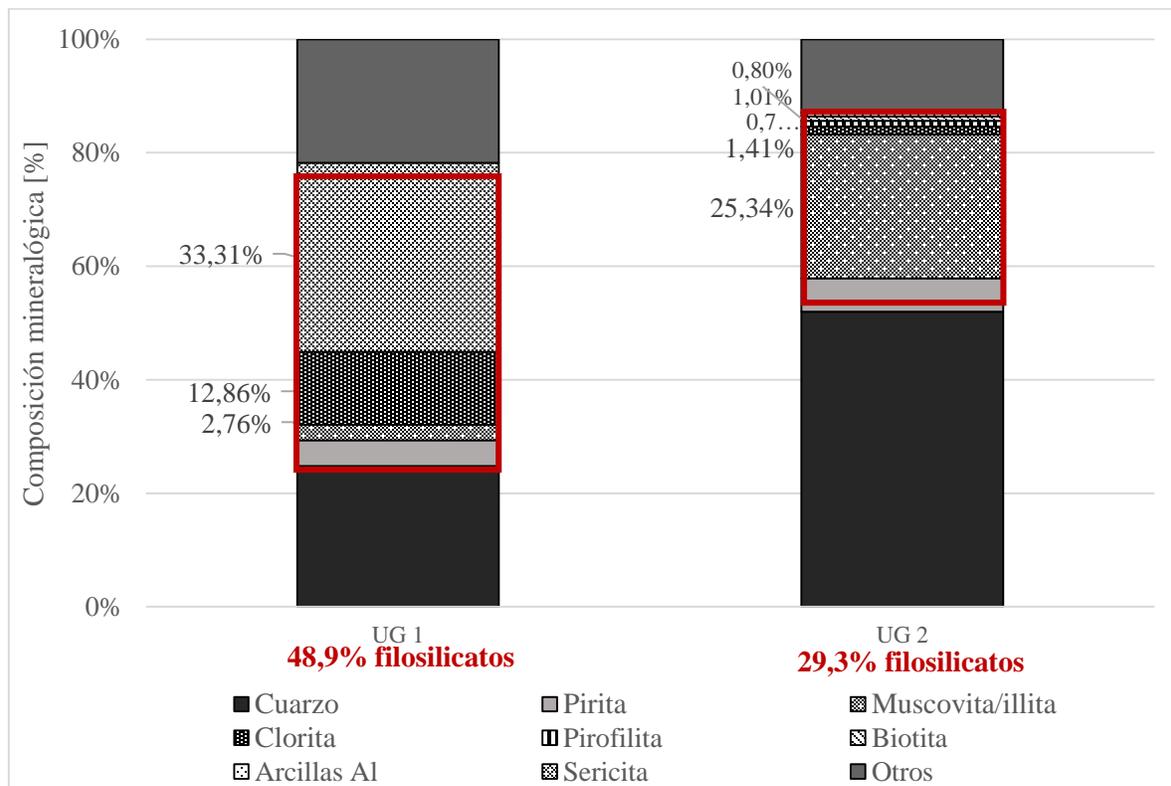


Figura 4.22. Composición mineralógica de relaves provenientes de distintas unidades geológicas de Codelco DMH.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

La Tabla 4.28 reúnen los parámetros físicos que caracterizan ambos minerales de cabeza, observándose claramente algunas diferencias que vale la pena mencionar. Los diámetros característicos como parámetro físico evidencian una mayor presencia de ultrafinos/arcillas en el relave utilizado en este estudio (UG2), pues el tamaño de las partículas o diámetro aparente es menor. Por otra parte, un aspecto no menor yace en la preponderancia que tienen los filosilicatos en ambas muestras, representando un medio y un tercio del contenido total en peso. Esto último es de especial atención por dos razones. La primera de ellas basadas en un estudio previo desarrollado por (Carrasco, 2017) quien sostiene la existencia de un valor crítico por sobre el 30% en el contenido de filosilicatos (caolinita, pirofilitas y moscovita) que generarían un efecto negativo en las propiedades reológicas. Y segundo, por la expresa necesidad en estudios previos (Arismendi, 2018) de abordar el efecto al trabajar con un rango de estudio mayor a un 20% en el contenido de filosilicatos.

Tabla 4.28 Parámetros granulométricos principales y densidad de sólidos de ambos relaves.

Muestra	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	D50 [ $\mu\text{m}$ ]	D80 [ $\mu\text{m}$ ]	Densidad de sólidos [g/cm <sup>3</sup> ]	Contenido de filosilicatos [%]	Contenido de ultra finos (<2,5 $\mu\text{m}$ ) [%]
UG 1	3,5	52,9	191,9	2,56	48,9	7,3
UG 2	3,1	35,6	172,5	2,51	29,3	8,7

La flotación inversa del relave UG1 permitió recuperar aquellas fracciones menos cristalinas (más amorfas) de pirofilita y en menor medida Illita/Sericita, generando una disminución de los finos de arcilla en las colas flotadas. No obstante, junto con el retiro de finos y arcillas, el concentrado también arrastró otras especies asociadas al cobre más gruesas lo que produjo que las colas en su totalidad queden con partículas más finas.

Por otra parte, la flotación inversa del relave UG2 permitió recuperar igualmente aquellas fracciones menos cristalinas con tendencia a ser coloidales, es decir amorfas. En particular se observa una extracción no selectiva en cuanto a especie mineral y un D10 bastante similar respecto al mineral de cabeza, no existiendo una variación composicional significativa entre ambos (delta: 3% de Muscovita/Illita y 0,3% de caolín/clorita)

Una vez dicho esto y con el objeto de analizar todas las aristas del caso, la Tabla 4.29 reúne la información reológica y sedimentológica de ambas muestras de relave junto a sus respectivas colas flotadas. Es importante mencionar las diferencias de tensión de fluencia entre ambas muestras, llegando incluso a triplicar el esfuerzo de corte necesario (efecto torque en espesamiento) para el caso del relave UG2. Probablemente esto último se deba al mayor contenido de ultrafinos presentes de naturaleza coloidal y además por la presencia de aquellos constituyentes de naturaleza amorfa, responsables de aumentar la viscosidad del relave. (Carrasco, 2017) en su estudio sostiene que esto se debe a la presencia preponderante de Muscovita (25,34%) en la muestra UG2.

Tabla 4.29 Contraste de la conducta reológica y sedimentológica de los puntos óptimos encontrados en ambos estudios.

Muestra	Tensión de fluencia de Vane [Pa]	Tensión de fluencia de Bingham [Pa]	Viscosidad de Bingham [mPa s]	pH [-]
UG 1	14,4	22,2 $\pm$ 0,7	46 $\pm$ 1	8,60
T	16,0	22,0 $\pm$ 1,0	42 $\pm$ 1	7,90
UG 2	40,8	81,0 $\pm$ 2,0	67 $\pm$ 2	7,40
T1	20,6	35 $\pm$ 1	46 $\pm$ 1	7,50

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

En el primer caso se observa que la flotación inversa no produce un efecto de cambio significativo de la tensión de fluencia de la cola, probablemente por el alto contenido de filosilicatos, no obstante, se observa una leve disminución de la viscosidad, siendo esto el responsable de la mejoría en la velocidad de sedimentación. Caso contrario se evidencia en la flotación inversa del relave UG2, donde se produce un efecto de cambio significativo en la tensión de fluencia de la cola y su viscosidad. Esta mejoría en las propiedades reológicas concuerda con lo observado en ensayos de sedimentación, y que se condicen por la distribución granulométrica de las muestras, donde la velocidad de asentamiento de las partículas experimentaba una mejoría respecto al relave como recibido. Respecto a la incidencia del pH como agente de cambio en el medio, se considera que las diferencias de pH entre muestras no inciden mayormente en los parámetros de estudio (Cruz, et al., 2016).

Una vez dicho esto, podemos concluir preliminarmente, lo siguiente:

- Existe concordancia en los resultados experimentales obtenidos principalmente en lo que respecta al retiro de arcillas y recuperación de aguas de proceso. El efecto de incorporar  $15 \text{ gt}^{-1}$  adicionales de floculante se refleja en leves incrementos en las recuperaciones. Esto se debe a que en ambos relaves existe un predominio de especies de arcillas y/o filosilicatos pertenecientes a un mismo grupo, caracterizadas por no ser higroscópicas.
- La flotación inversa del relave UG2 produce un cambio significativo en la conducta reológica de la cola flotada debido al retiro preferencial de fracciones de Muscovita/Illita de naturaleza amorfa que interactúan con el medio y no pirofilitas como en el caso de la flotación inversa del relave UG1.
- Pese a que sigue llamando la atención el notorio contraste respecto a las velocidades de sedimentación de las colas flotadas, ésta diferencia puede ser explicada por la presencia de un mayor contenido de ultrafinos presentes en el relave UG2 junto a un tamaño D10 menor que acentúa una conducta coloidal más activa e interactiva con el fluido, condicionando de esa manera una mejoría de la velocidad de sedimentación. Otro aspecto que reafirma esto, se debe a la extracción preferencial de aquellas fracciones ultrafinas recuperadas en la flotación inversa del relave UG1 frente a una remoción no selectiva en cuanto a tamaños para el caso del relave UG2. Esa extracción no preferencial de las fracciones ultrafinas de Muscovita probablemente se deba al perjuicio que representaría en el sistema, en términos de estabilidad coloidal, el utilizar  $15 \text{ gt}^{-1}$  adicionales de floculante. Esta conclusión da pie a pensar en optimizar la dosis de floculante. Además, se valida una de las conclusiones reportadas por (Arismendi, 2018) en su estudio que afirma que un buen indicador de la facilidad de la sedimentación de un relave se relaciona con el D10 y su interacción con el fluido. Por otro lado, se parte de la base que la mejoría de la conducta sedimentológica del relave queda sujeta al contenido de filosilicatos presentes desde un inicio en cada UG. A raíz de esto, el contenido de filosilicatos presentes en el relave UG1 sobrepasa al exhibido en el relave UG2, incluso llegando a sobrepasar una concentración crítica que según estudios previos realizados por (Carrasco, 2017) afirman condicionar el comportamiento de reología y sedimentación. Eso explica, la leve diferencia de la velocidad de sedimentación inicial en ambas muestras ( $3,7 \text{ cmh}^{-1}$  y  $3,8 \text{ cmh}^{-1}$  en el relave UG1 y UG2 respectivamente).
- Pese a la mejoría de la conducta de las colas flotadas producto de la flotación inversa de arcillas, la variabilidad de la mineralogía y el D10/D50 de las partículas son determinantes en el comportamiento reológico y sedimentológico respectivamente.

### 4.1.5. Estudio técnico.

#### 4.1.5.1. Impacto de la innovación tecnológica en el OPEX.

Considerando los parámetros metalúrgicos obtenidos de las pruebas y los análisis complementarios realizados a los productos obtenidos de los ensayos de flotación y sedimentación con diferentes dosificaciones de reactivos, se considera que la fórmula de reactivos que tiene una mejor respuesta frente a la recuperación de arcillas iónicas y consecuentemente con la velocidad de sedimentación y recuperación de agua clara es utilizando una alta dosis de floculante y colector en ausencia de coagulante (E4). Se trata de una fórmula que responde a dosis comerciales factibles de emplear y que permitiría que los experimentos tengan buena reproducibilidad.

Bajo ese escenario, y con el propósito de evaluar la eficiencia del proyecto, a continuación, se analiza el impacto que traería la implementación de un proceso de flotación inversa de relaves antes de su espesamiento, en aquellos insumos críticos preponderantes en la estructura de costos del OPEX de una planta concentradora.

- Análisis del recurso hídrico

Como bien sabemos, el agua en minería constituye un insumo crítico cuya situación de abastecimiento e importancia en la estructura de costos podría resultar ser crítica para un proyecto/operación. Atendiendo a esto, y considerando que representa el segundo insumo de mayor relevancia en el OPEX de una planta concentradora (21% de participación) se presenta a continuación una comparación de la gestión del recurso hídrico considerando para tal efecto, la condición de diseño de la planta DMH, su situación actual y la propuesta planteada en este estudio.

El balance hídrico que se obtuvo a nivel experimental (batch) considera para efectos de cálculo de recuperación global de agua, que las colas provenientes de la flotación convencional de cobre sean enviadas a celdas de flotación inversa de arcillas con filtración de concentrado de arcilla y espesamiento de relaves flotados. Por otro lado, tanto en las condiciones de diseño y actuales de la planta, se tiene que las colas provenientes de la flotación de cobre son enviadas a un espesador convencional. Los esquemas del proceso y su respectivo balance para los tres escenarios descritos se presentan en Anexos, *7.7 Balance hídrico condición de diseño área concentración – espesamiento de planta Codelco – DMH*, y *7.8 Balance hídrico condición experimental de flotación inversa de arcillas*

Cabe destacar que la fracción de agua recuperada en el espesamiento de colas flotadas se considera como aquel volumen de agua clara obtenido en la zona de clarificación del ensayo de sedimentación, en el tiempo en que se produce la velocidad máxima y no el volumen de agua final en la zona de compactación debido a que esta última no representa el nivel de agua que se espera recircular de forma inmediata en el proceso industrial. En este contexto, tanto el balance hídrico de la situación actual como de diseño considera que el volumen de agua recuperada del espesamiento de las colas corresponde al mismo instante en el que se obtuvo la máxima velocidad de sedimentación de la condición óptima de reactivos vista anteriormente. La Tabla 4.30 muestra los resultados más importantes de estos balances descritos.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 4.30 Análisis comparativo del balance hídrico en estudio.

	<b>Condición de diseño planta DMH</b>	<b>Condición actual planta DMH*</b>	<b>Retiro de arcillas con descarga a disposición en tranque de relave</b>
Total agua ingresada al circuito (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	6133	6252	2184
Agua recuperada con espesador convencional (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	4662	4060	502
Agua recuperada por filtración de concentrado (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	312	273	1112
Total de agua recuperada (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	4974	4333	1615
Recuperación de agua total (%)	<b>81,1</b>	<b>69,3</b>	<b>73,9</b>

A raíz de los resultados obtenidos en materia de recirculación de aguas, el retiro temprano de fracciones de arcilla que revisten cierta complejidad en el proceso permitiría recuperar aguas claras con tasas de retorno significativas y levemente inferiores a lo presupuestado por diseño. Si bien, los esfuerzos actuales por parte de DMH en la optimización del agua (por ejemplo, a través de campañas de concientización y manejo responsable de este bien escaso: ver Afiche de campaña: “Comprometidos con la sustentabilidad y ahorro de agua”, impulsada por Codelco DMH, 2018.), han permitido incrementar la recuperación de aguas, pasando de recuperar un 6% en 2016-2017 a 69,3% en 2017-2018, esto no ha sido suficiente y hace imperioso profundizar en el análisis que reviste esta propuesta, pues cumple con entregar una mejor recirculación del recurso hídrico que la exhibida en la actualidad.

Los valores detallados de la situación actual de la planta DMH constituyen meramente un caso base, pues sus tasas fueron obtenidas considerando su capacidad de tratamiento actual y tasas de captación y recirculación de agua que exhibe la planta completa en 2017, de acuerdo con un informe de indicadores de sustentabilidad publicados recientemente. Es decir, se trabaja con el supuesto que, si la división en su totalidad opera con un porcentaje de recirculación de 69,3% de agua, el circuito de espesamiento y filtrado también permiten recuperar aguas a ese mismo porcentaje.

En línea a los esfuerzos que se han impulsado y que se han materializado en mejoras en la eficiencia en la gestión del agua por proceso minero, se hace necesario evaluar el impacto económico que implicaría implementar esta alternativa en el ahorro incurrido por concepto de reutilización de aguas versus demanda de agua fresca. La Tabla 4.31 estima el ahorro que significaría su instalación frente al escenario actual de demanda de agua fresca. Para efectos comparativos y de simplicidad, los flujos de agua en el escenario de retiro de arcillas fueron

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

escalados considerando la capacidad de tratamiento actual de la planta concentradora (56 ktpd, un 1,9% mayor a lo presupuestado por diseño).

Tabla 4.31. Previsión de ahorros por concepto de recuperación y recirculación de aguas de proceso al instalar unidad de flotación inversa.

	<b>Condición de diseño planta DMH</b>	<b>Condición actual planta DMH</b>	<b>Retiro de arcillas con descarga a disposición en tranques de relave</b>
Total agua ingresada al circuito (m3/h)	6133	6252	6252
Total de agua recuperada (m3/h)	4974	4333	4734
Delta de agua recuperada respecto a parámetros de diseño (m3/h)	-	-641	-240
<b>Ahorro de agua tras implementación de propuesta (m3/h)</b>	-	-	<b>401</b>

Ahora bien, de acuerdo a un análisis hecho por el consejo minero en base a datos proporcionados por Wood Mckenzie en 2013, se indicó que en promedio las un firmas chilenas pagan US\$2,3 por m<sup>3</sup> de agua de mar desalada puesta en la mina (a través de proceso de ósmosis inversa), mientras que la misma unidad de agua fresca (continental) cuesta US\$1,6 (García, 2017). Por lo tanto, a modo de contextualización, el retiro temprano de arcillas implicaría a las faenas un margen de ahorro que va desde los US\$4,6 a US\$5,6 millones anuales, en caso de acceder a agua de mar desalada o agua continental, respectivamente.

La tecnología propuesta responde a la necesidad de abastecer un mayor consumo de agua frente a aumentos en la producción de concentrados y eso, junto con una gestión adecuada de las fuentes de suministro, por ejemplo reflejados en coeficientes unitarios con tendencia a la baja (0,45m<sup>3</sup>/t min procesado en plantas concentradoras a 2017) (Cochilco, 2018), permitiría posicionarse como una real alternativa respecto a este importante insumo.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

### 4.1.5.2. Estudio de ingeniería.

Sabiendo el potencial impacto que brindaría implementar un circuito de flotación inversa de relaves antes de la etapa de espesamiento en la recuperación de aguas claras, resta ahora evaluar y definir de manera preliminar una vez planteada la necesidad, aspectos tales como capacidades requeridas para las instalaciones y número de celdas, emplazamientos y disposiciones generales. Para estos efectos se considera un estudio de ingeniería de clase 5 (+/- 40%).

Tomando como base los resultados metalúrgicos y parámetros obtenidos de las pruebas efectuadas en laboratorio se proyecta el diseño de las celdas industriales a requerir, considerando para tal efecto celdas de flotación mecánica/convencionales con inyección de aire forzado.

Una vía simple de solución al problema de escalamiento enfocado al diseño de circuitos industriales es considerar la flotación como un proceso cinético a través del desarrollo de pruebas a pequeña escala. Sin embargo, esta alternativa queda descartada pues no fue posible realizar dada la poca cantidad de muestra estudios de cinética batch. Ahora bien, la determinación del tamaño y número de celdas se ajustará de acuerdo con las características de los flujos de alimentación que ingresarán al circuito de flotación inversa. La Figura 4.23 muestra un diagrama simplificado de los flujos de entrada y salida.

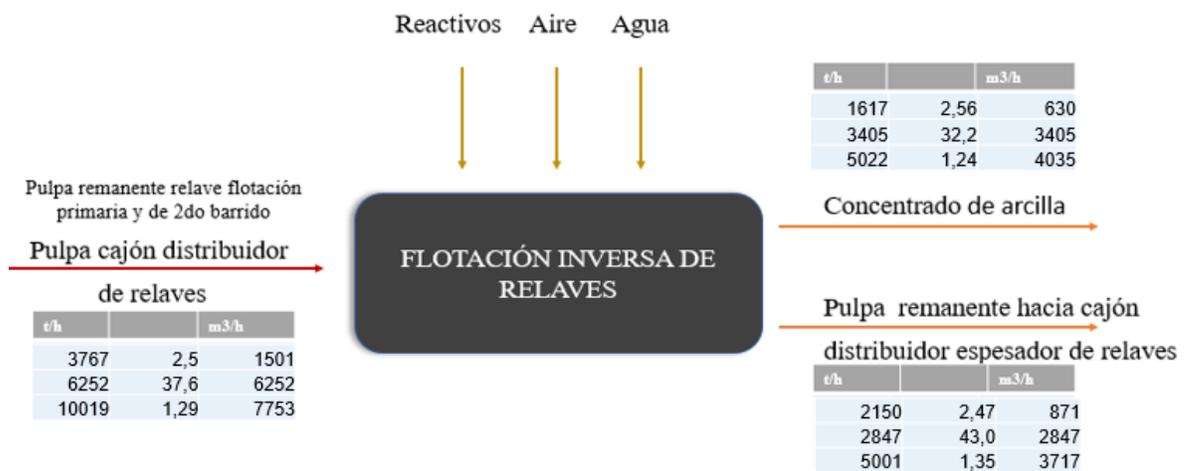


Figura 4.23. Diagrama de flujos de entrada y salida de la etapa de flotación inversa de relaves.

Tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Especificaciones técnicas generales de las celdas de flotación inversa  
Las celdas de flotación inversa son equipos que tienen la función de separar de forma eficiente la pulpa proveniente del cajón distribuidor de relaves en dos productos, el primero es una pulpa concentrada en arcillas y el segundo es una pulpa de relave o cola con características reológicas mejoradas. Considerando los equipos utilizados en la concentradora de DMH, se hará uso de celdas de flotación con una capacidad de 300 m<sup>3</sup> por celda. La Tabla 4.32 muestra las especificaciones técnicas generales de estas celdas de flotación.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 4.32. Especificaciones técnicas generales de las celdas de flotación, Flotación inversa.

Proveedor	OUTOTEC
Modelo	TANKCELL 300e
<b>Capacidad máxima (Diseño)</b>	<b>300 m<sup>3</sup></b>
Dimensiones del tanque:	
- Alto	7 m
- Ancho	8 m
- Largo	8 m
Material de revestimiento	Neopreno/Corcote

- Razón volumen efectivo/volumen nominal (Capacidad)  
 Al interior de la celda, además de la pulpa, se tiene un volumen ocupado por el mecanismo de agitación, otro volumen ocupado por el aire y otro volumen ocupado por la espuma; por esta razón es necesario estimar cuidadosamente cada uno de estos factores para determinar el volumen efectivo de la celda. Según mediciones realizadas por CIMM (División Mineralurgia CIMM, 1986), en bancos industriales el volumen ocupado por la pulpa en una celda industrial puede llegar a ser tan bajo como 60% del volumen nominal. Por esta razón se estimará la cantidad de celdas considerando dos escenarios:

Baja capacidad	75%
Alta capacidad	90%

Una vez aclarado estos puntos, el tiempo de residencia medio de las partículas quedará determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$\tau[\text{min}] = \frac{V_{\text{útil celda}} [\text{m}^3] * 60 [\text{min}/\text{h}]}{Q_{\text{de pulpa a tratar}} [\text{m}^3/\text{h}]}$$

Capacidad	0,75	0,9
Tiempo de flotación min	10	11

El hecho experimental que los tiempos de flotación aumenten al pasar de laboratorio a planta continua (de 5 a 10 min), se debe a que en la prueba batch cada porción del sólido tiene el mismo tiempo de residencia y por lo tanto la misma probabilidad de flotar; en cambio en la celda en flujo continuo, hay una variedad de tiempos de residencia por cada unidad de sólido.

A partir de la siguiente ecuación, el número de celdas a requerir de acuerdo con los flujos netos tratados, son las siguientes:

$$n^{\circ}_{\text{celdas}} = \frac{\tau[\text{min}] * Q_{\text{pulpa a tratar}} [\text{m}^3/\text{h}]}{60[\text{min}/\text{h}] * V_{\text{útil celda}} [\text{m}^3]}$$

Capacidad	0,75	0,9
Número de celdas	6	5

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Por lo tanto, se estiman 6 celdas que estarían operando en serie, con la pulpa fluyendo continuamente de una celda a la siguiente a través de traspasos. De esta manera el emplazamiento de las celdas en serie permitiría asegurarnos que parte de la pulpa (o sólidos) no pase a través de la celda más rápido que el promedio o tiempo de residencia medio estimado. La Figura 4.24 muestra en detalle el diagrama de flujo de la unidad del proceso de flotación inversa a incorporar en planta.

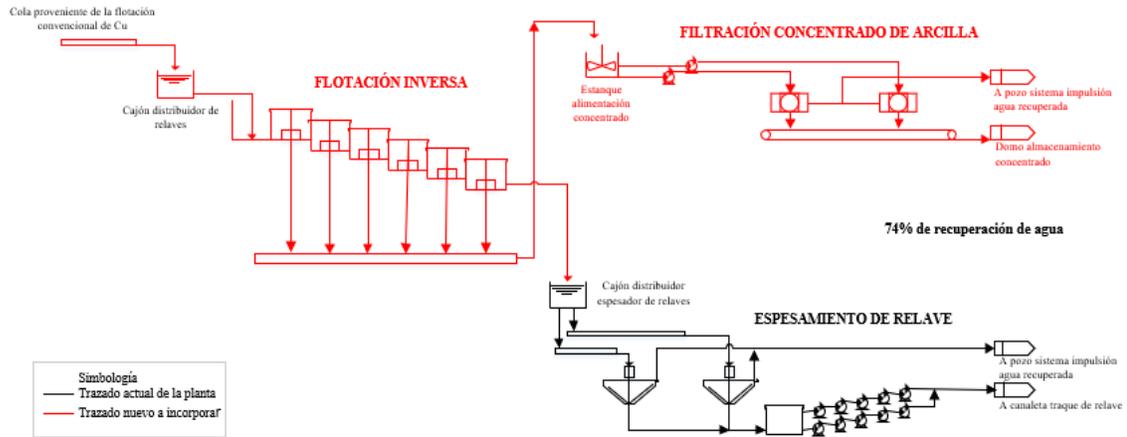


Figura 4.24. Flowsheet de unidad de Flotación inversa.

Evidentemente incorporar este proceso tiene una inversión relevante, sin embargo, se debe tener presente que el costo de propiedad de estos equipos no es significativo respecto al valor del producto originado de la cadena de valor de la que forman parte, sino en cómo contribuyen a la continuidad operacional cumpliendo con entregar una mejor recirculación del recurso hídrico.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En relación con los objetivos planteados se ha establecido el positivo impacto que brindaría la implementación de un circuito de flotación inversa de relaves, antes de la etapa de espesamiento, como una alternativa tecnológica factible y económicamente viable para resolver operacionalmente el problema que implica operar con altas contenidos de finos y/o arcillas.

Respondiendo al objetivo general, las principales conclusiones que resultan del análisis de los resultados son los siguientes:

- El retiro de una fracción de finos/arcillas de la pulpa de relave del orden de 40% proveniente de un circuito de flotación, mejora la conducta reológica y sedimentológica de las colas remanentes del ensayo de flotación favoreciendo la recuperación de agua clara en la etapa de espesamiento. Esto permite confirmar la validez de la hipótesis planteada inicialmente en este estudio.
- La fórmula de reactivos que permite obtener una mejor respuesta metalúrgica es una mezcla con una alta dosis de floculante (SF E 4833 Kemira) y colector (Aero 845 Cytec), en ausencia de coagulante. Se trata de una fórmula que permite que las principales fases minerales de arcillas y filosilicatos puedan flotar selectivamente y reportar en el concentrado.
- El concentrado de la flotación inversa corresponde a aquellas partículas ultrafinas, menos cristalinas (amorphas) y que en general muestran valores similares de D10, menores a 8  $\mu\text{m}$ , permitiendo que su correspondiente cola o relave, presente un aumento de la velocidad de sedimentación, modificando positivamente los parámetros reológicos.
- Se ha determinado que la separación preferencial de especies de moscovita/illita y feldespato de potasio en el concentrado de la flotación inversa, permiten disminuir significativamente la tensión de fluencia de Vane desde 41 Pa a 7 Pa y la viscosidad dinámica desde  $67 \pm 2$ , hasta valores de  $24 \pm 5$  mPas. Esta conducta se ha asociado a la disminución de las fracciones ultrafinas de arcillas en la cola de flotación, que normalmente exhiben una conducta coloidal.
- La cola flotada con la fórmula óptima de reactivos, muestra un aumento significativo del valor del D10, variando desde 3,1 a 4,5  $\mu\text{m}$ . Esta condición permite aumentar la velocidad de sedimentación de la cola flotada, desde 3,8  $\text{cmh}^{-1}$  a 8,9  $\text{cmh}^{-1}$ . Consecuentemente, se obtiene una recuperación de agua clara del orden de 74% en peso.
- El retiro temprano de fracciones de arcilla en la alimentación al espesador de relaves permite recuperar un 74% del agua alimentada al circuito de espesamiento de relaves, que representa un flujo de agua recuperada de 293  $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ , permitiendo una disminución del OPEX en el rango de US\$4,6 a US\$5,6 millones anuales, dependiendo del tipo de agua que abastece a la planta.
- En base a los resultados metalúrgicos de flotación se determinó para las condiciones actuales de DHM, la necesidad de incorporar 6 celdas con un sistema de micro-burbujas con una capacidad de 300  $\text{m}^3$  cada una, junto con equipos periféricos.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

### RECOMENDACIONES

Una vez finalizado este estudio, las principales recomendaciones que surgen del análisis de los resultados de esta memoria de título son los siguientes:

- Se recomienda realizar un estudio de ingeniería de perfil que permita estimar con mayor precisión (+/- 30%), los valores de CAPEX y OPEX asociados a la recuperación temprana de arcillas.
- En relación con el agua recuperada, que puede contener altos contenidos de sólidos en suspensión (mayores a 700 ppm) y su impacto negativo en la reología de la pulpa, se hace necesario un estudio que relacione la calidad del agua con los kpi del espesamiento de relaves.
- Considerando la gran área superficial específica de las arcillas, que acentúa la influencia de las cargas superficiales, se considera de gran relevancia realizar estudios orientados a determinar el punto isoeléctrico que permita lograr una mayor recuperación en peso de arcillas durante la flotación temprana.
- Otro aspecto que requiere un mayor estudio, es la aplicación de la flotación inversa al retiro temprano de materiales ultrafinos, desde la descarga del chancado primario, permitiendo un impacto aún mayor en el valor de OPEX. Asimismo, evaluar su aplicación en la limpieza de concentrados finales sucios, que deben descartarse por no cumplir con los requerimientos del mercado.

## CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

A. Hazzab, A. T. A. G., 2008. "Measurement and modeling of the settling velocity of isometric particles". En: *Powder Technology*. s.l.:s.n., pp. 105-113.

Alty, T., 1926. "The origin of the electrical charge on small particles in water". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, pp. 235-251.

Anon., 2012. *Scribd*. [En línea]  
Available at: <https://www.scribd.com/doc/77048460/CLASIFICACION-DE-LOS-COLECTORES>

Arisмениdi, N., 2018. *Identificación de los elementos de ganga que modifican las propiedades reológicas y sedimentológicas de los relaves complejos*, Santiago de Chile: s.n.

Bhambhani, T., Patra, P. & Nagaraj, D. R. a. S. P., 2014. *Plate type gangue minerals and their impact on flotation performance*. Santiago de Chile, s.n.

Boger, D., 2009. Rheology and the resource industries. *Chemical Engineering Science*, 64(22), pp. 4525-4536.

Boggs, S., 2006. *Principles of sedimentology and stratigraphy*. s.l.:Pearson Prentice Hall.

Bulatovic, S. & Wyslouzil, D. a. K. C., 1999. *Effect of clay slimes on copper, molybdenum flotation from porphyry ores*. Lakefield, s.n.

Bulatovic, S., Wyslouzil, D. & Kant, C., 1999. Effect of clay slimes on copper, molybdenum flotation from porphyry ores. *The Minerals, Metals and Materials Society*, p. 17.

Cano, C., 2015. *Evaluación de un tratamiento de floculación-flotación para el agua residual generada en el procesamiento de subproductos avícolas.*, Bogotá: Departamento de Ingeniería Ambiental - Universidad Libre.

Cárdenas, Y., 2000. *Servicio de agua potable y alcantarillado de Lima*. [En línea]  
Available at: [http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)  
[Último acceso: 24 08 2017].

Carrasco, R., 2017. *Evaluación del comportamiento reológico y sedimentológico de mineral de cabeza y relaves de cobre*, Santiago de Chile: s.n.

Cochilco, 2018. *Cochilco*. [En línea]  
Available at: <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%20al%202017.pdf>

Connelly, D. 2. T. M. C. p. v. c. i. p. p. s. A. c., 2011. *The Merrill Crowe process vs carbon in pulp process selection*. s.l., s.n.

Crawford, R. J., 1988. The Influence of Particle Size and Contact Angle in Mineral Flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 23(1), pp. 1-24.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Cruz, M. S. K. I. J., 2016. *Estudio de separación de arcillas del circuito de espesamiento de relaves DMH*, Santiago de Chile: s.n.

Cruz, M., Sonnleitner, K. & Ipinza, J., 2016. *Estudio de separación de arcillas del circuito de espesamiento de relaves DMH*, Santiago de Chile: s.n.

De Kretser, R. G. a. B. D. V., 1992. The Compression Dewatering and Rheology of Slurried Coal Mine Tailings. *Proceedings of the 5th Australian coal science conference*, pp. 422-429.

Deer, W. A., Howie, R. A. & Zussman, J., 1992. *An introduction to the rock forming minerals*. London: Prentice Hall.

E. Forbes, K. D. L. S., 2013. "Decoupling rheology and slime coating effect on the natural flotability of chalcopyrite in a clay-rich floatation pulp". En: *Minerals Engineering*. Clayton: Elsevier, pp. 136-144.

E. Jorjani, H. B. M. T. A. F., 2011. "Effects of aluminosilicate minerals on copper molybdenum flotation from Sarcheshmeh porphyry ores". *Minerals Engineering*, Volumen 24, pp. 754-759.

Elmahdy, A. & Mirnezami, M. a. F. J., 2008. Zeta potential of air bubbles in presence of frothers. *International Journal of Mineral Processing*, Volumen 89, pp. 40-43.

Elmahdy, A. M., Mirnezami, M. & Finch, J. A., 2008. Zeta potential of air bubbles in presence of frothers. *International Journal of Mineral Processing*, Volumen 89, pp. 40-43.

Farrokhpay, S., 2011. The significance of froth stability in mineral flotation—a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 166(1), pp. 1-7.

Farrokhpay, S., 2012. The importance of rheology in mineral flotation: A review. *Minerals Engineering*, Volumen 36-38, pp. 272-278.

Farrokhpay, S., 2012. The importance of rheology in mineral flotation: A review. *Minerals Engineering*, 38(36), pp. 272-278.

Farrokhpay, S. a. Z. M., 2012. An investigation into the effect of water quality on froth stability. *Advanced Powder Technology*, 23(4), pp. 493-497.

Finch, J. A. y otros, 1997. Role of hydrodynamic cavitation in fine particles flotation. *International Journal of Mineral Processing*, Volumen 51, pp. 139-149.

Fourie, A. B., 2002. *Material Characteristic: High density and paste Seminar*. Santiago de Chile, s.n.

García, N., 2017. *Análisis económico de aspectos asociados a desalinización del agua en la minería*, Santiago de Chile: Asesoría técnica parlamentaria BCN.

H. Dibbs, L. S. R. B., 1974. "Some electrical properties of bubbles and their role in the flotation of quartz". *Canadian Metallurgical Quarterly*, 13(2), pp. 395-404.

Hea, M. W. Y. & F. E., 2004. Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review. *Powder Technology*, Issue 147, pp. 94-112.

Ibarra, V., Corona, M., López, A. & González, J. a. I. V., 2010. *Floc - Flotación de Malaquita*, Colima: Instituto de Metalurgia, Depto. de Procesamiento de Minerales, Universidad Autónoma de San Luís Potosí.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

- Ipinza, J., 2013. *Efecto de las arcillas en la flotación de minerales de cobre*. Valparaíso, s.n.
- Ipinza, J., 2013. *Impacto de las arcillas en la flotación de minerales*. Santiago de Chile: s.n.
- Jeldrez V., H., 2017. *Uso de Goma Guar como agente floculante de arcillas en flotación de calcopirita*, Concepción: s.n.
- Jorjani, E., Barkhordari, H., Tayebi Khorami, M. & Fazeli, A., 2011. H. BEffects of aluminosilicate minerals on copper molybdenum flotation from Sarcheshmeh porphyry ores. *Minerals Engineering*, Volumen 24, pp. 754-759.
- JRI Ingeniería, 2017. *Programa Alta ley*. [En línea] Available at: <http://programaaltaley.cl/wp-content/uploads/2017/08/Juan-Rayo.pdf> [Último acceso: Abril 2018].
- JRI, 2010. *Aplicación industrial de la tecnología de espesamiento extremo en proyectos mineros*, Santiago de Chile: s.n.
- K. Okada, Y. A. M. K. N. Y., 1990. "Effect on surface charges of bubbles and fine particles on air flotation process". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 68(3), pp. 393-399.
- Klein, C. D. B., 2007. *Manual of mineral science, 23rd Edition*. s.l.:John Wiley & Sons.
- Laskowski, J., 1998. *Frothing in flotation*. Amsterdam: Gordon & Breach.
- Napier-Munn, T. J. S. F., 1996. A model for slurry rheology. *International Journal of Mineral Processing*, Volumen 47, pp. 103-123.
- Ndlovu, B. y otros, 2011. The influence of phyllosilicate mineralogy on the rheology of mineral slurries. *Minerals Engineering*, Issue 24, pp. 1314-1322.
- Ndlovu, B., Farrokhpay, S. & Bradshaw, D., 2013. The effect of phyllosilicate minerals on mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, Volumen 125, pp. 149-156.
- Ndlovu, B. y otros, 2014. A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals. *Minerals Engineering*, Volumen 55, pp. 190-200.
- Neethling, S. a. C. J., 2009. The entrainment factor in froth flotation: Model for particle size and other operating parameter effects. *International Journal of Mineral Processing*, Volumen 93, pp. 141-148.
- Orozco, Y., 2012. *Estudio del efecto del tipo y concentración de espumante en la selectividad del proceso de flotación a escala laboratorio.*, Santiago de Chile: Departamento de Ingeniería química y Biotecnología Universidad de Chile.
- Patra, P., Bhambhani, T., Vasudevan, M. & Nagaraj, D. a. S. P., 2012. Transport of fibrous gangue mineral networks to froth by bubbles in flotation separation. *International Journal of Mineral Processing*, Volumen 104-105, pp. 45-48.
- Ravanal, J., 2017. *Estudio del efecto de la arcilla caolinita en la velocidad de sedimentación y esfuerzo de fluencia empleando floculante aniónico y catiónico en pulpas de cuarzo*, Concepción: s.n.
- Read, A. D., 1972. The Use of High Molecular Weight Polyacrylamides in the Selective Flocculation Separation of a Mineral Mixture.. *British Polymer Journal*, 4(3), pp. 253-264.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Runge, K., 2010. Laboratory flotation testing - An essential tool for ore characterisation. En: C. J. Greet, ed. *Flotation plant optimisation - A metallurgical guide to identifying and solving problems in flotation plants*. Melbourne: AusIMM: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 155-173.

S. Farrokhpay, B. N. D. B., 2014. "Characterising the deleterious effect of phyllosilicate minerals on the copper flotation via froth stability analysis". Santiago de Chile, s.n.

S. Farrokhpay, E. F. B. N., 2014. "A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals". En: *Minerals Engineering*. s.l.:Elsevier, pp. 190-200.

S. Guggenheim, R. T. M., 1995. "Definition of Clay and Clay Mineral: Joint Report of the aipea nomenclature and cms nomenclature committees". En: *Clay and Clay Minerals*. Florida: s.n., pp. 255-256.

Servicio Nacional de Geología y Minería, 2017. *Anuario de la minería de Chile 2016*. [En línea] Available at: <http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/Anuario-2016-sernageomin.pdf>

Servicio Nacional de Geología y Minería, 2016. *Geoquímica de superficie de depósito de relaves de Chile*, Santiago de Chile: s.n.

Shi, F. a. N.-M. T., 2002. Effects of slurry rheology on industrial grinding performance. *International Journal of Mineral Processing*, Volumen 65, pp. 125-140.

Song, S. a. L. V. A., 1998. Hydrophobic Flocculation Flotation for Beneficiating Fine Coal and Minerals. *Separation Science and Technology*, 33(8), pp. 1195 - 1212.

Sutherland, K. L., 1948. Kinetics of the flotation processes. *Journal of Physical Chemistry*, pp. 394-425.

Svarovsky, L., 2000. *Solid Liquid separations*. Pardubice, República Checa: Butterworth Heinemann.

Tangsathitkulchai, C., 2003. The effect of slurry rheology on fine grinding in a laboratory ball mill. *International Journal of Mineral Processing*, Volumen 69, pp. 29-47.

W. A. Deer, R. H. J. Z., 1992. *An introduction to the Rock Forming Minerals*. London: Prentice Hall.

W. Trahar, L. W., 1976. "The flotability very fine particles-a review". *International Journal of Minerals Processing*, Volumen 3, pp. 103-131.

Wen, W. & Sun, S., 1977. Electrokinetic study on the amine flotation of oxidized coal. [For separation from ash and pyrites]. *Trans. Soc. Min. Eng. AIME*, 262(2).

Wills, B. A. , F. J. A., 2016. *Wills' Mineral Processing Technology*. Octava ed. Kidlington: Elsevier.

Xu, D. & Ametov, I. a. G. S., 2011. Detachment of coarse particles from oscillating bubbles—The effect of particle contact angle, shape and medium viscosity. *International Journal of Mineral Processing*, 101(1), pp. 50-57.

Yianatos Bernardino, J. & Vinnett Peralta, L., 2015. *Flotación de minerales*. Valparaíso: USM.

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

### 7.1. Procedimiento para medición de densidad específica a partir del método de picnometría

Para cada muestra de mineral sea cabeza, concentrado o relave se debe realizar el siguiente procedimiento al menos 3 veces para minimizar el error de medición:

- Registrar el número del picnómetro a usar, asegurar que esté limpio y seco
- Tarar en una balanza analítica el picnómetro y registrar su peso ( $P_v$ )
- Agregar un poco de sólido de la muestra correspondiente y tarar ( $P_{v+s}$ )
- Enrasar con agua destilada el picnómetro con sólido hasta su tope, colocar el tapón respectivo del picnómetro, secar y tarar ( $P_{v+s+agua}$ )
- Lavar el picnómetro con detergente y agua destilada. Secar por fuera
- Llenar el picnómetro con agua destilada hasta su tope, colocar el tapón respectivo y secar picnómetro
- Pesar picnómetro con agua ( $P_{v+agua}$ )
- Tomar la temperatura del agua destilada y luego buscar la densidad del agua a la temperatura medida ( $\delta_{H_2O}$ ).

La ecuación para calcular la densidad específica está dada por la siguiente ecuación:

$$s. g_{\text{mineral}} = \frac{P_{v+s} - P_v}{(P_{v+agua} - P_v) - (P_{v+s+agua} - P_{v+s})} * \delta_{H_2O} \quad (1)$$

### 7.2. Procedimiento estándar de sedimentación

Para llevar a cabo las pruebas de sedimentación tanto para el relave recibido, como para los relaves flotados en las pruebas pertinentes, se debe proceder a realizar las actividades descritas a continuación:

- Limpiar y secar una probeta de 1 L, pegar una huincha graduada de papel milimetrado del largo total de ésta. Luego pesarla.
- Agitar la pulpa durante 20 minutos a 1200 rpm y luego vaciar su contenido en la probeta.
- Tapar la probeta con ayuda de papel Parafilm y agitar mediante 10 inmersiones sucesivas, evitando derramar líquido.
- Colocar la probeta en una mesa que no esté sujeta a vibraciones y, hacer funcionar el cronómetro.
- Iluminar el nivel superior y medir en la huincha milimetrada la altura de la interfase líquido claro-pulpa en función del tiempo.
- Medir la altura de la interfase en los siguientes tiempos: 0'', 1', 2', 3', 4', 5', 6', 7', 8', 9', 10', 15', 20', 25', 30', 40', 50', 60', 90', 120', 150', 180', 240', 300', 360', 1440' y 1560'. El término de cada prueba será a las 26 horas de haber comenzado el experimento (i. e.,  $H_\infty$ ). Al menos dos puntos deben encontrarse en esta región de la curva para determinar la velocidad de sedimentación buscada.
- Determinar en cada prueba el porcentaje de sólidos de descarga, considere para esto el volumen compactado de mineral al final de la prueba.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

### 7.3. Base de cálculo para dosificación de reactivos según masa de mineral alimentado

Considerando los siguientes valores de entrada y propiedades físicas, en término de densidad específica de reactivos:

Tabla 7.1 Parámetros de entrada requeridos para cálculos de masa de pulpa y mineral y dosificación de reactivos requeridos.

<b>Parámetro de entrada</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Volumen de pulpa	ml	2700
Porcentaje en peso (Cp)	%	36,4
Densidad específica mineral (s.g)	g ml <sup>-1</sup>	2,5
Densidad de pulpa	g ml <sup>-1</sup>	1,28
<b>Datos</b>		
Velocidad de sedimentación (Vs0)	cm h <sup>-1</sup>	3,80
pH natural	-	7,6
<b>Parámetros calculados</b>		
masa de pulpa	g	3210
masa de mineral	g	1168

Reactivo	<b>Coagulante</b>	<b>Colector</b>	<b>Espumante</b>
	Magnafloc 7793	Aero 845 Cytec	Aerofroth 70 MIBC
<b>s.g (g ml<sup>-1</sup>)</b>	1,51	1,12	0,81

Utilizar la siguiente ecuación que muestra la fórmula para obtener la dosificación de reactivos con su densidad específica correspondiente:

$$Dosificación \mu L = \frac{(masa mineral_{(g)} \cdot dosis reactivo_{g ton mineral^{-1}}) \cdot 10^{-3}}{S \cdot \rho_{reactivo} g ml^{-1}} \quad (2)$$

La adición a la celda se realiza usando una micropipeta. En el caso de coagulante y floculante, su dosificación es preparada calculando la masa requerida según la dosis indicada por tonelada de mineral para ser diluida en 80 ml de agua destilada. Esto último dado que se trata de reactivos muy densos que precisan ser diluidos y agitados para ser alimentados directamente a la celda de flotación durante el acondicionamiento.

# CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

## 7.4. Datos experimentales y resultados de pruebas de flotación y sedimentación

Tabla 7.2 Dosificación en [g] y [ $\mu\text{L}$ ] calculadas para los reactivos a utilizar en presencia de coagulante y variando dosis de floculante.

n° Prueba	Masa de mineral g	Dosis							
		Coagulante		Floculante		Colector		Espumante	
		gt <sup>-1</sup>	g	gt <sup>-1</sup>	g	gt <sup>-1</sup>	$\mu\text{L}$	gt <sup>-1</sup>	$\mu\text{L}$
<b>1</b>	1150,2	8	0,0092	15	0,0173	25	26	8	11
<b>2</b>	1128,3	8	0,0090	30	0,0338	25	25	8	11
<b>3</b>	1118,7	8	0,0089	45	0,0503	25	25	8	11

Tabla 7.3 Resultados de recuperación en peso de pruebas en presencia de coagulante y variando dosis de floculante.

Pruebas con 25 gt <sup>-1</sup> de colector AERO 845				
<b>F 15-5M: 15 gt<sup>-1</sup> floculante + 8 gt<sup>-1</sup> coagulante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	427,6	427,6	37,2%	37,2%
Colas	722,6	1150,2	62,8%	100,0%
Alimentación	1150,2			
<b>F 30-5M: 30 gt<sup>-1</sup> floculante + 8 gt<sup>-1</sup> coagulante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	287,3	287,3	25,5 %	25,5%
Colas	841,0	1128,3	74,5%	100,0%
Alimentación	1128,3			
<b>F 45-5M: 45 gt<sup>-1</sup> floculante + 8 gt<sup>-1</sup> coagulante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	292,3	292,3	26,1%	26,1%
Colas	826,4	1118,7	73,9%	100,0%
Alimentación	1118,7			

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 7.4 Datos obtenidos de ensayos de sedimentación discontinua en condición (Izquierda; derecha): como Relave recibido; Cola flotada con dosificación de 45 gt<sup>-1</sup> floculante + 8 gt<sup>-1</sup> coagulante; relave recibido sin flotar con dosis óptima: 45 gt<sup>-1</sup> floc + 8 gt<sup>-1</sup> coag.

Relave recibido				Relave flotado F45-5M				RR sin flotar con dosis óptima			
Tiempo (min)	Altura lecho (mm)	Volumen lecho (ml)	Volumen agua (ml)	Tiempo (min)	Altura lecho (mm)	Volumen lecho (ml)	Volumen agua (ml)	Tiempo (min)	Altura lecho (mm)	Volumen lecho (ml)	Volumen agua (ml)
<b>0</b>	340,0	1000,0	0,0	<b>0</b>	340,0	1000,0	0,0	<b>0</b>	340,0	1000,0	0,0
<b>1</b>	340,0	1000,0	0,0	<b>1</b>	339,5	998,5	1,5	<b>1</b>	339,5	998,5	1,5
<b>2</b>	340,0	1000,0	0,0	<b>2</b>	338,5	995,6	4,4	<b>2</b>	339,0	997,1	2,9
<b>3</b>	339,5	998,5	1,5	<b>3</b>	337,0	991,2	8,8	<b>3</b>	339,0	997,1	2,9
<b>4</b>	339,0	997,1	2,9	<b>4</b>	336,0	988,2	11,8	<b>4</b>	338,5	995,6	4,4
<b>5</b>	337,5	992,6	7,4	<b>5</b>	335,5	986,8	13,2	<b>5</b>	338,0	994,1	5,9
<b>6</b>	337,0	991,2	8,8	<b>6</b>	335,0	985,3	14,7	<b>6</b>	337,5	992,6	7,4
<b>7</b>	337,0	991,2	8,8	<b>7</b>	334,5	983,8	16,2	<b>7</b>	337,0	991,2	8,8
<b>8</b>	336,5	989,7	10,3	<b>8</b>	334,0	982,4	17,6	<b>8</b>	337,0	991,2	8,8
<b>9</b>	336,0	988,2	11,8	<b>9</b>	333,5	980,9	19,1	<b>9</b>	336,5	989,7	10,3
<b>10</b>	335,5	986,8	13,2	<b>10</b>	333,0	979,4	20,6	<b>10</b>	335,5	986,8	13,2
<b>15</b>	334,0	982,4	17,6	<b>15</b>	330,0	970,6	29,4	<b>15</b>	331,5	975,0	25,0
<b>20</b>	331,0	973,5	26,5	<b>20</b>	326,5	960,3	39,7	<b>20</b>	328,0	964,7	35,3
<b>25</b>	328,0	964,7	35,3	<b>25</b>	323,0	950,0	50,0	<b>25</b>	326,0	958,8	41,2
<b>30</b>	325,0	955,9	44,1	<b>30</b>	319,5	939,7	60,3	<b>30</b>	324,0	952,9	47,1
<b>40</b>	319,0	938,2	61,8	<b>40</b>	313,5	922,1	77,9	<b>40</b>	321,0	944,1	55,9
<b>50</b>	313,0	920,6	79,4	<b>50</b>	306,5	901,5	98,5	<b>50</b>	319,0	938,2	61,8
<b>60</b>	306,0	900,0	100,0	<b>60</b>	300,0	882,4	117,6	<b>60</b>	317,0	932,4	67,6
<b>90</b>	286,0	841,2	158,8	<b>90</b>	280,0	823,5	176,5	<b>90</b>	312,0	917,6	82,4
<b>120</b>	261,5	769,1	230,9	<b>120</b>	258,0	758,8	241,2	<b>120</b>	308,0	905,9	94,1
<b>150</b>	253,0	744,1	255,9	<b>150</b>	230,5	677,9	322,1	<b>150</b>	304,0	894,1	105,9
<b>180</b>	248,0	729,4	270,6	<b>180</b>	223,5	657,4	342,6	<b>180</b>	301,0	885,3	114,7
<b>240</b>	241,0	708,8	291,2	<b>240</b>	213,5	627,9	372,1	<b>240</b>	295,5	869,1	130,9
<b>300</b>	235,0	691,2	308,8	<b>300</b>	206,5	607,4	392,6	<b>300</b>	290,0	852,9	147,1
<b>360</b>	230,0	676,5	323,5	<b>360</b>	202,0	594,1	405,9	<b>360</b>	286,0	841,2	158,8
<b>1440</b>	193,0	567,6	432,4	<b>1440</b>	157,5	463,2	536,8	<b>1440</b>	240,0	705,9	294,1
<b>1560</b>	191,0	561,8	438,2	<b>1560</b>	156,0	458,8	541,2	<b>1560</b>	238,0	700,0	300,0

CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

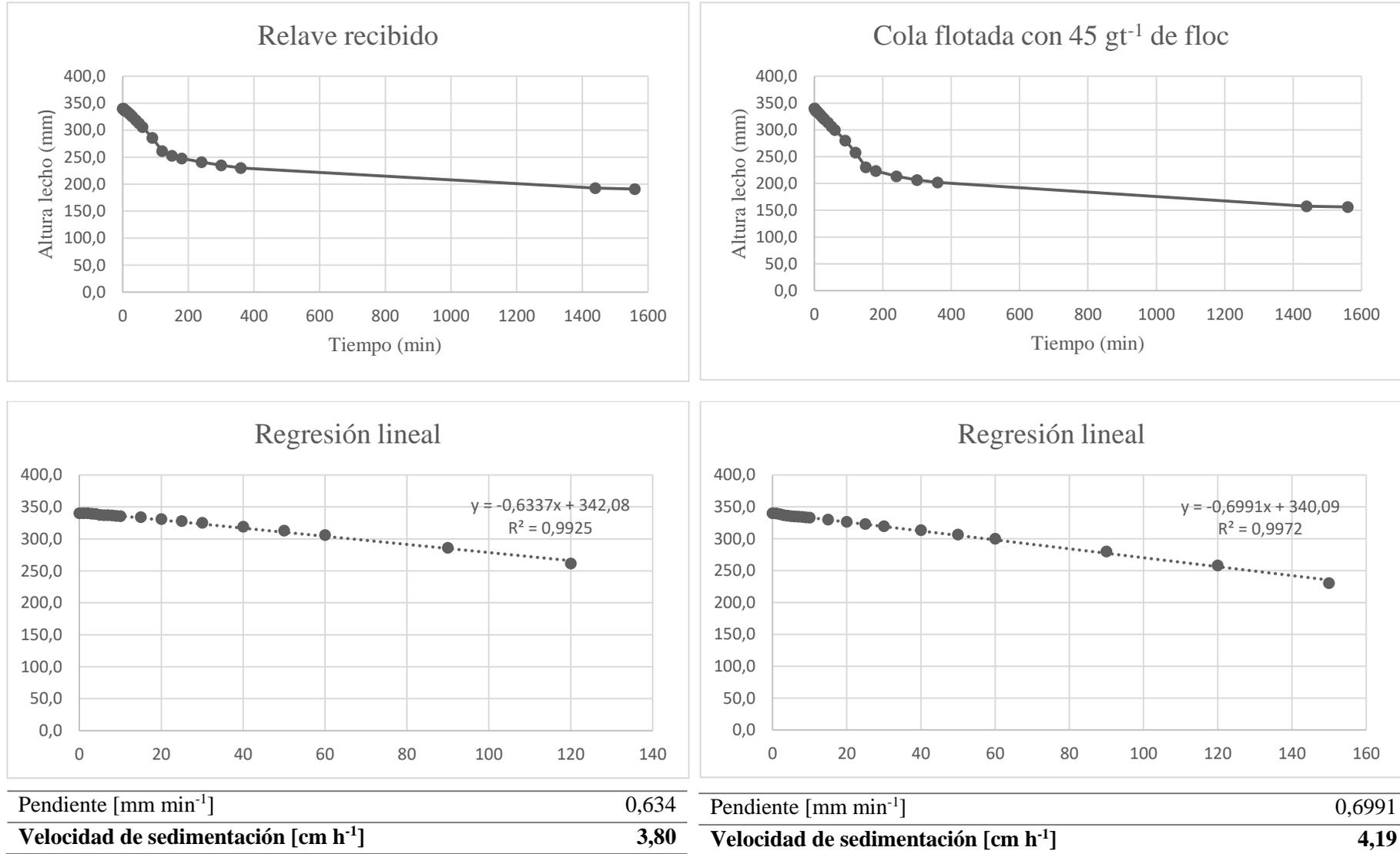
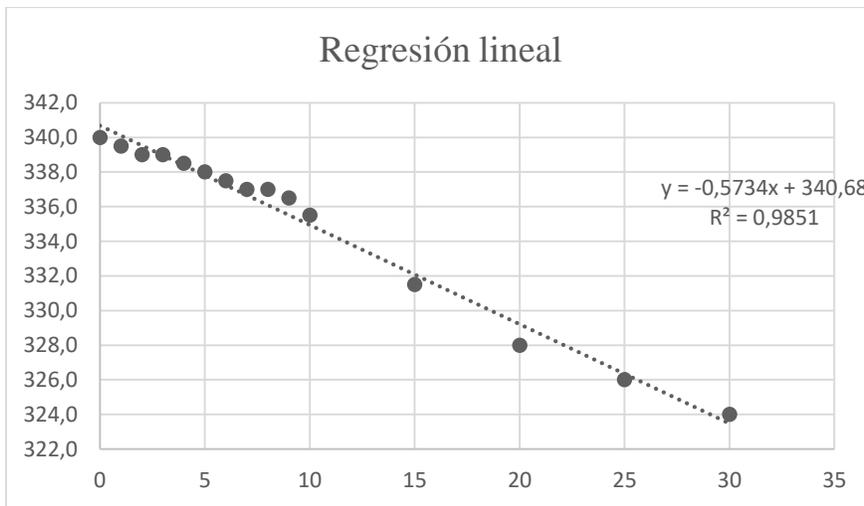
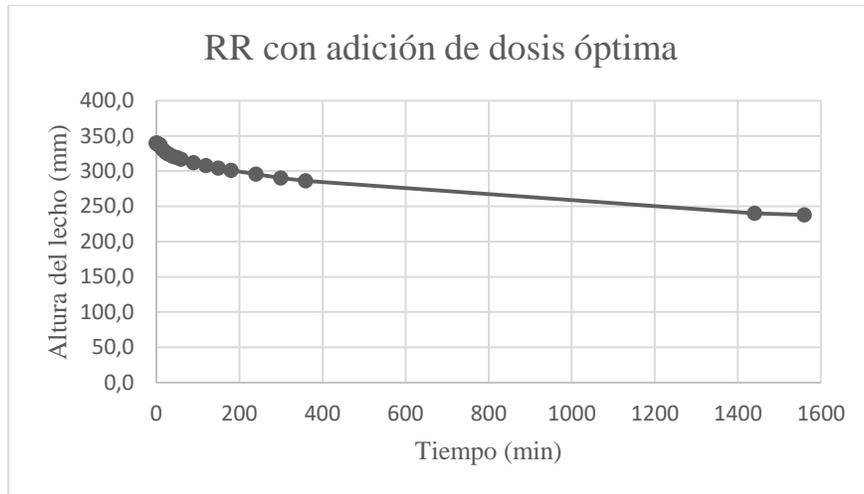


Figura 7.1 Curva de ensayo de sedimentación y regresión lineal obtenida en condición (Izquierda; Derecha): relave recibido; cola flotada con condición: 8 g t<sup>-1</sup> coagulante + 45 g t<sup>-1</sup> floculante.

CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA



Pendiente [ $\text{mm min}^{-1}$ ]	0,5734
<b>Velocidad de sedimentación [<math>\text{cm h}^{-1}</math>]</b>	<b>3,44</b>

Figura 7.2 Curva de ensayo de sedimentación y regresión lineal obtenida del relave recibido sin flotar en condición óptima:  $8 \text{ gt}^{-1}$  coagulante +  $45 \text{ gt}^{-1}$  floculante.

Tabla 7.5 Dosificación en [g] y [L] calculados para los reactivos a utilizar en presencia de floculante y variando dosis de coagulante.

N° Prueba	Masa de mineral g	Dosis							
		Coagulante		Floculante		Colector		Espumante	
		g ton <sup>-1</sup>	g	g ton <sup>-1</sup>	g	g ton <sup>-1</sup>	μL	g ton <sup>-1</sup>	μL
<b>4</b>	1248,0	3	0,0037	45	0,0562	25	28	8	12,3
<b>5</b>	1118,7	8	0,0089	45	0,0503	25	25	8	11,0
<b>6</b>	1272,7	13	0,0165	45	0,0573	25	28	8	12,6

Tabla 7.6 Resultados de recuperación en peso de pruebas en presencia de floculante y variando dosis de coagulante.

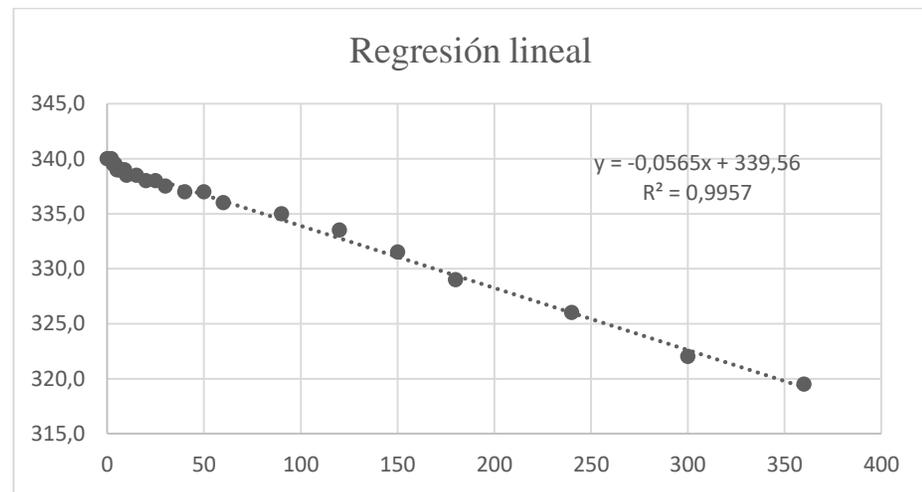
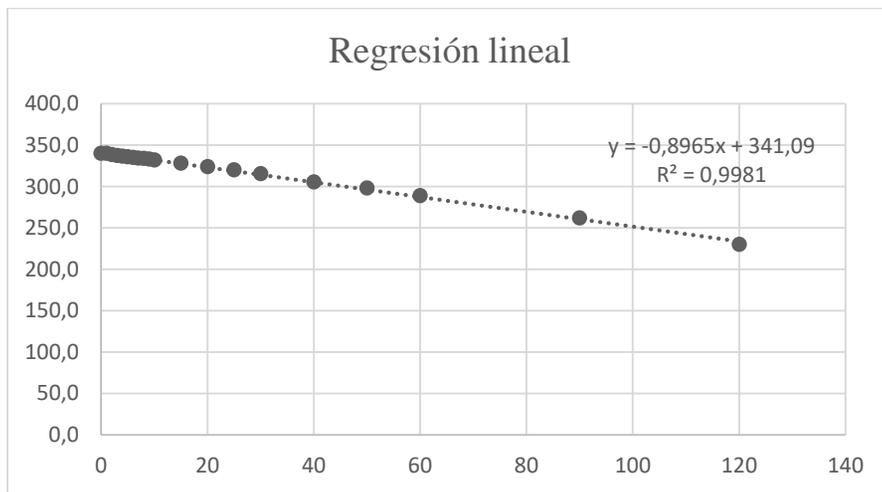
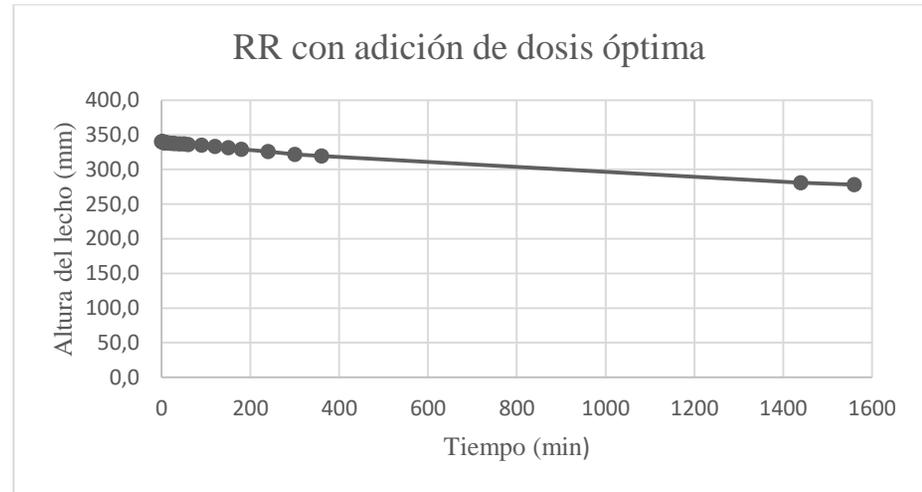
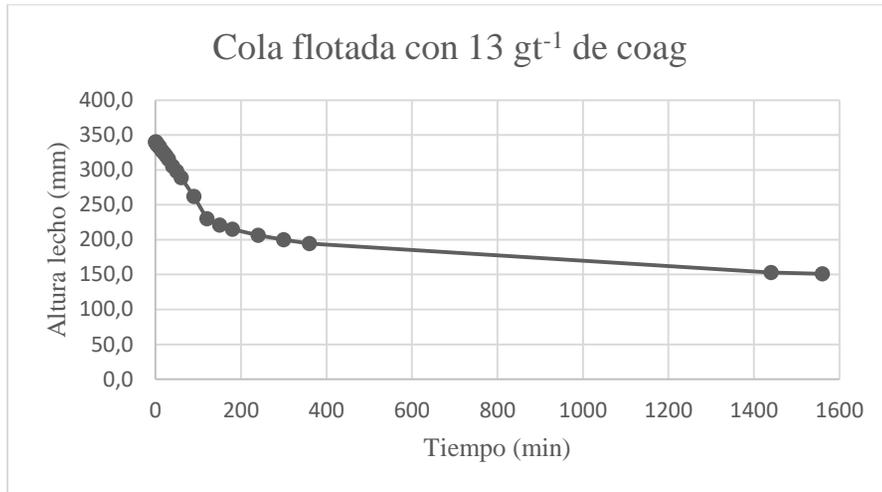
Pruebas con 25 gt <sup>-1</sup> de colector AERO 845				
<b>CF 3-5M: 3 gt<sup>-1</sup> coagulante + 45 gt<sup>-1</sup> floculante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	397,5	397,5	31,9%	31,9%
Colas	850,5	1248,0	68,1%	100,0%
Alimentación	1248,0			
<b>CF 8-5M: 8 gt<sup>-1</sup> coagulante + 45 gt<sup>-1</sup> floculante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	292,3	292,3	26,1%	26,1%
Colas	826,4	826,4	73,9%	100,0%
Alimentación	1118,7			
<b>CF 13-5M: 13 gt<sup>-1</sup> coagulante + 45 gt<sup>-1</sup> floculante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	481,0	481,0	37,8%	37,8%
Colas	791,7	1272,7	62,2%	100,0%
Alimentación	1272,7			

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 7.7 Datos obtenidos en ensayos de sedimentación discontinua efectuados en presencia de floculante y variando dosis de coagulante.

<b>Relave flotado CF13-5M</b>				<b>RR sin flotar con dosis óptima</b>			
Tiempo (min)	Altura lecho (mm)	Volumen lecho (ml)	Volumen agua (ml)	Tiempo (min)	Altura lecho (mm)	Volumen lecho (ml)	Volumen agua (ml)
<b>0</b>	340,0	1000,0	0,0	<b>0</b>	340,0	1000,0	0,0
<b>1</b>	340,0	1000,0	0,0	<b>1</b>	340,0	1000,0	0,0
<b>2</b>	338,5	995,6	4,4	<b>2</b>	340,0	1000,0	0,0
<b>3</b>	337,5	992,6	7,4	<b>3</b>	339,5	998,5	1,5
<b>4</b>	336,5	989,7	10,3	<b>4</b>	339,5	998,5	1,5
<b>5</b>	336,0	988,2	11,8	<b>5</b>	339,0	997,1	2,9
<b>6</b>	335,0	985,3	14,7	<b>6</b>	339,0	997,1	2,9
<b>7</b>	334,5	983,8	16,2	<b>7</b>	339,0	997,1	2,9
<b>8</b>	334,0	982,4	17,6	<b>8</b>	339,0	997,1	2,9
<b>9</b>	333,0	979,4	20,6	<b>9</b>	339,0	997,1	2,9
<b>10</b>	332,0	976,5	23,5	<b>10</b>	338,5	995,6	4,4
<b>15</b>	328,0	964,7	35,3	<b>15</b>	338,5	995,6	4,4
<b>20</b>	324,0	952,9	47,1	<b>20</b>	338,0	994,1	5,9
<b>25</b>	320,0	941,2	58,8	<b>25</b>	338,0	994,1	5,9
<b>30</b>	315,5	927,9	72,1	<b>30</b>	337,5	992,6	7,4
<b>40</b>	305,5	898,5	101,5	<b>40</b>	337,0	991,2	8,8
<b>50</b>	298,0	876,5	123,5	<b>50</b>	337,0	991,2	8,8
<b>60</b>	289,0	850,0	150,0	<b>60</b>	336,0	988,2	11,8
<b>90</b>	262,0	770,6	229,4	<b>90</b>	335,0	985,3	14,7
<b>120</b>	230,0	676,5	323,5	<b>120</b>	333,5	980,9	19,1
<b>150</b>	221,0	650,0	350,0	<b>150</b>	331,5	975,0	25,0
<b>180</b>	215,0	632,4	367,6	<b>180</b>	329,0	967,6	32,4
<b>240</b>	206,5	607,4	392,6	<b>240</b>	326,0	958,8	41,2
<b>300</b>	200,0	588,2	411,8	<b>300</b>	322,0	947,1	52,9
<b>360</b>	194,5	572,1	427,9	<b>360</b>	319,5	939,7	60,3
<b>1440</b>	153,0	450,0	550,0	<b>1440</b>	281,0	826,5	173,5
<b>1560</b>	151,0	444,1	555,9	<b>1560</b>	278,0	817,6	182,4

CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA



Pendiente [ $\text{mm min}^{-1}$ ]	0,896
<b>Velocidad de sedimentación [<math>\text{cm h}^{-1}</math>]</b>	<b>5,38</b>

Pendiente [ $\text{mm min}^{-1}$ ]	0,056
<b>Velocidad de sedimentación [<math>\text{cm h}^{-1}</math>]</b>	<b>0,34</b>

Figura 7.3 Curva de ensayo de sedimentación y regresión lineal obtenida en condición (Izquierda; Derecha): Cola flotada con condición óptima  $13 \text{ gt}^{-1}$  coagulante y en presencia de floculante; Relave recibido sin flotar con condición óptima.

Tabla 7.8 Dosificación en [g] y [L] calculados para los reactivos a utilizar en ausencia de floculante y variando dosis de colector.

N° Prueba	Masa de mineral g	Dosis							
		Coagulante		Floculante		Colector		Espumante	
		gt <sup>-1</sup>	g	gt <sup>-1</sup>	g	gt <sup>-1</sup>	μL	gt <sup>-1</sup>	μL
7	1366,1	13	0,0178	0	0,0000	15	18	8	13
8	1316,6	13	0,0171	0	0,0000	25	29	8	13
9	1323,2	13	0,0172	0	0,0000	40	47	8	13

Tabla 7.9 Resultados de recuperación en peso de pruebas en ausencia de floculante y variando dosis de colector.

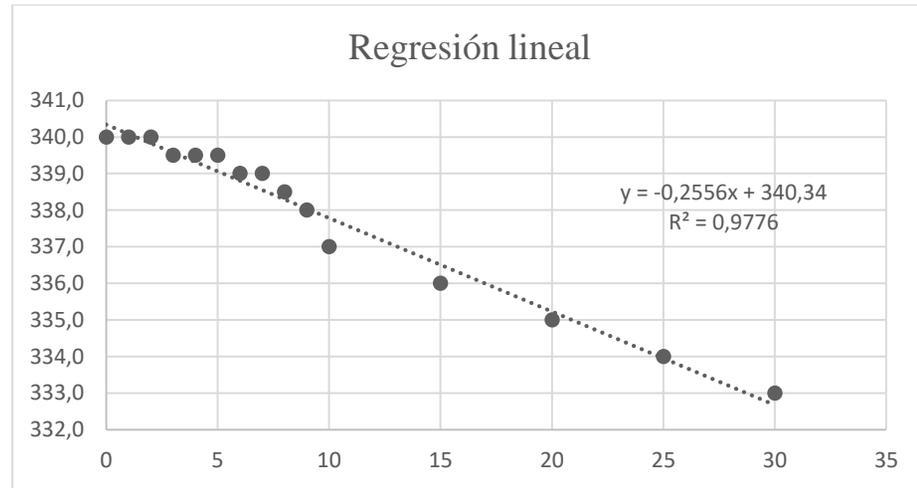
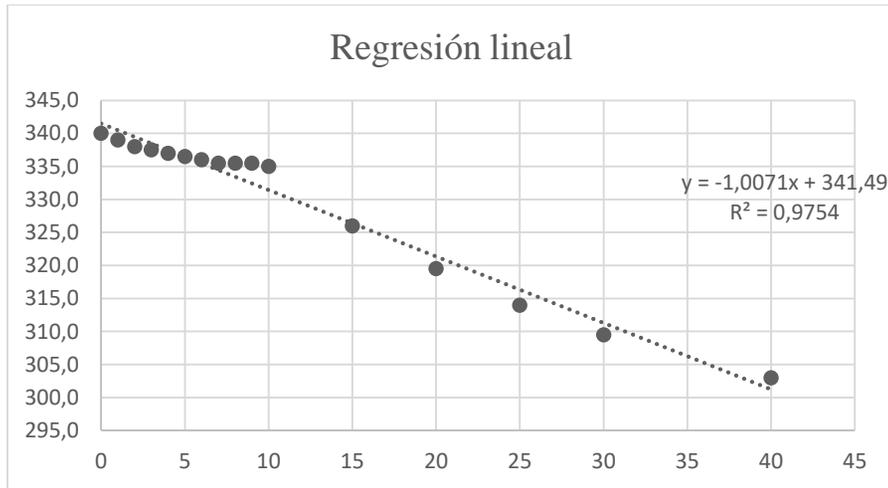
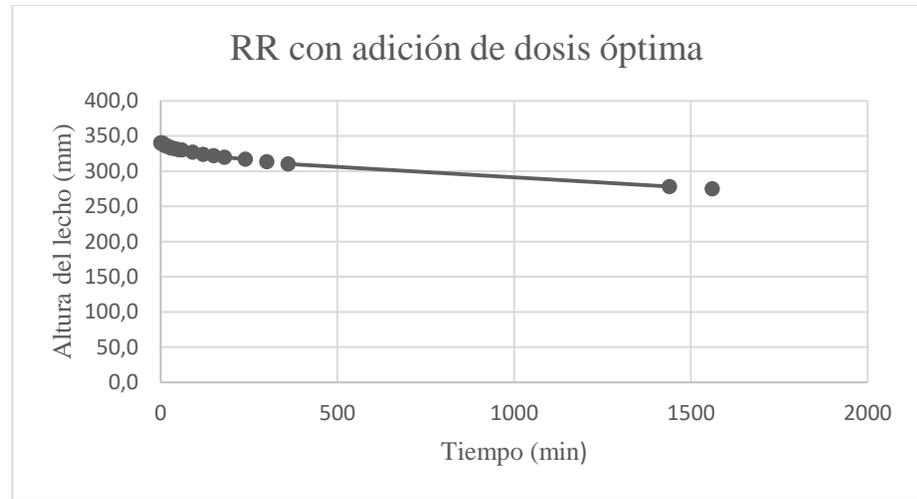
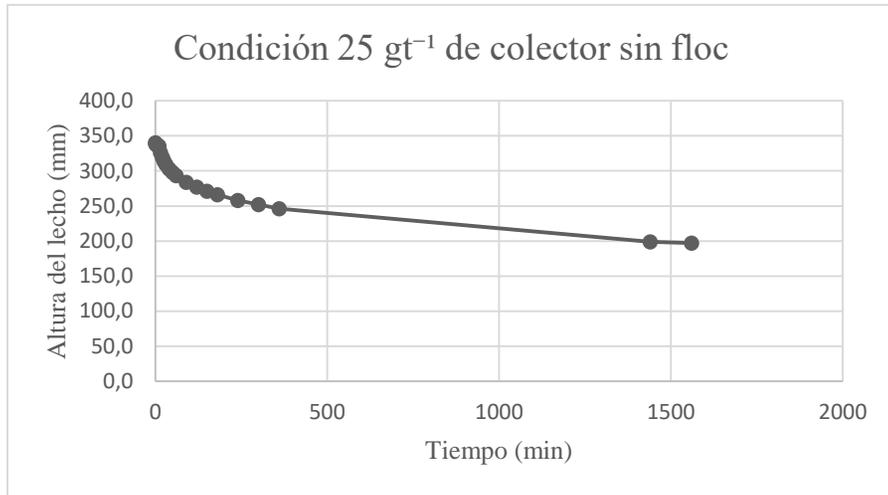
Pruebas en ausencia de floculante				
<b>CO 15-5M: 15 gt<sup>-1</sup> colector + 13 gt<sup>-1</sup> coagulante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	342,8	342,8	25,1%	25,1%
Colas	1023,3	1366,1	74,9%	100,0%
Alimentación	1366,1			
<b>CO 25-5M/C 13-5M: 25 gt<sup>-1</sup> colector + 13 gt<sup>-1</sup> coagulante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	320,8	320,8	24,4%	24,4%
Colas	995,8	995,8	75,6%	100,0%
Alimentación	1316,6			
<b>CO 40-5M: 40 gt<sup>-1</sup> colector + 13 gt<sup>-1</sup> coagulante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	297,5	297,5	22,5%	22,5%
Colas	1025,7	1323,2	77,5%	100,0%
Alimentación	1323,2			

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 7.10 Datos obtenidos en ensayos de sedimentación discontinua efectuados en ausencia de floculante y con distintas dosis de colector.

<b>Relave flotado CO25-5M</b>				<b>RR sin flotar con dosis óptima</b>			
Tiempo (min)	Altura lecho (mm)	Volumen lecho (ml)	Volumen agua (ml)	Tiempo (min)	Altura lecho (mm)	Volumen lecho (ml)	Volumen agua (ml)
<b>0</b>	340,0	1000,0	0,0	<b>0</b>	340,0	1000,0	0,0
<b>1</b>	339,0	997,1	2,9	<b>1</b>	340,0	1000,0	0,0
<b>2</b>	338,0	994,1	5,9	<b>2</b>	340,0	1000,0	0,0
<b>3</b>	337,5	992,6	7,4	<b>3</b>	339,5	998,5	1,5
<b>4</b>	337,0	991,2	8,8	<b>4</b>	339,5	998,5	1,5
<b>5</b>	336,5	989,7	10,3	<b>5</b>	339,5	998,5	1,5
<b>6</b>	336,0	988,2	11,8	<b>6</b>	339,0	997,1	2,9
<b>7</b>	335,5	986,8	13,2	<b>7</b>	339,0	997,1	2,9
<b>8</b>	335,5	986,8	13,2	<b>8</b>	338,5	995,6	4,4
<b>9</b>	335,5	986,8	13,2	<b>9</b>	338,0	994,1	5,9
<b>10</b>	335,0	985,3	14,7	<b>10</b>	337,0	991,2	8,8
<b>15</b>	326,0	958,8	41,2	<b>15</b>	336,0	988,2	11,8
<b>20</b>	319,5	939,7	60,3	<b>20</b>	335,0	985,3	14,7
<b>25</b>	314,0	923,5	76,5	<b>25</b>	334,0	982,4	17,6
<b>30</b>	309,5	910,3	89,7	<b>30</b>	333,0	979,4	20,6
<b>40</b>	303,0	891,2	108,8	<b>40</b>	332,0	976,5	23,5
<b>50</b>	298,0	876,5	123,5	<b>50</b>	330,5	972,1	27,9
<b>60</b>	293,5	863,2	136,8	<b>60</b>	330,0	970,6	29,4
<b>90</b>	284,0	835,3	164,7	<b>90</b>	327,0	961,8	38,2
<b>120</b>	277,0	814,7	185,3	<b>120</b>	324,0	952,9	47,1
<b>150</b>	271,0	797,1	202,9	<b>150</b>	322,0	947,1	52,9
<b>180</b>	266,0	782,4	217,6	<b>180</b>	320,0	941,2	58,8
<b>240</b>	258,0	758,8	241,2	<b>240</b>	317,0	932,4	67,6
<b>300</b>	252,0	741,2	258,8	<b>300</b>	313,5	922,1	77,9
<b>360</b>	246,0	723,5	276,5	<b>360</b>	310,5	913,2	86,8
<b>1440</b>	199,0	585,3	414,7	<b>1440</b>	278,0	817,6	182,4
<b>1560</b>	197,0	579,4	420,6	<b>1560</b>	275,0	808,8	191,2

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA



Pendiente [mm min<sup>-1</sup>] 1,007

**Velocidad de sedimentación [cm h<sup>-1</sup>]** **6,04**

Pendiente [mm min<sup>-1</sup>] 0,256

**Velocidad de sedimentación [cm h<sup>-1</sup>]** **1,53**

Figura 7.4 Curva de ensayo de sedimentación y regresión lineal obtenida en condición (Izquierda; Derecha): Cola flotada con condición óptima 25 gt<sup>-1</sup> colector y en ausencia de floculante; Relave recibido sin flotar con condición óptima.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 7.11 Dosificación en [g] y [L] calculados para los reactivos a utilizar en ausencia de coagulante y variando dosis de colector.

N° Prueba	Masa de mineral g	Dosis							
		Coagulante		Floculante		Colector		Espumante	
		gt <sup>-1</sup>	g	gt <sup>-1</sup>	g	gt <sup>-1</sup>	μL	gt <sup>-1</sup>	μL
<b>10</b>	1339,6	0	0,0000	45	0,0603	15	18	8	13
<b>11</b>	1333,5	0	0,0000	45	0,0600	25	30	8	13
<b>12</b>	1316,2	0	0,0000	45	0,0592	40	47	8	13

Tabla 7.12 Resultados de recuperación en peso de pruebas en ausencia de coagulante y variando dosis de colector.

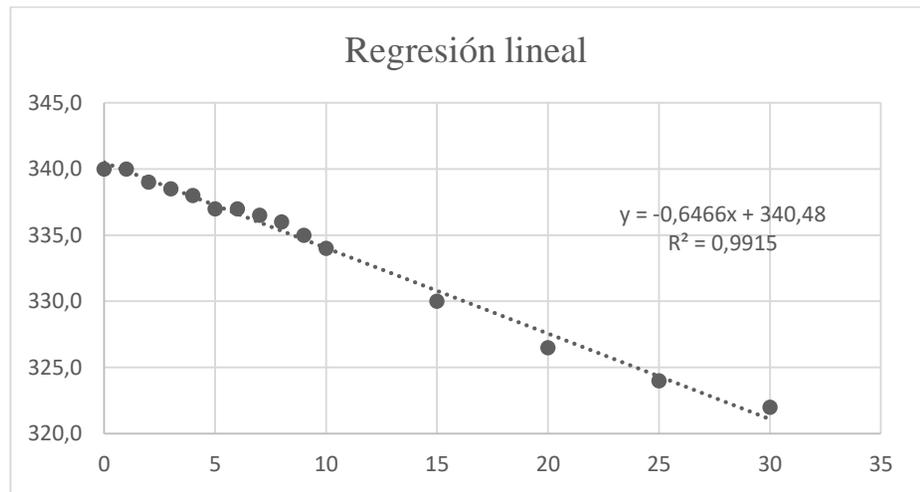
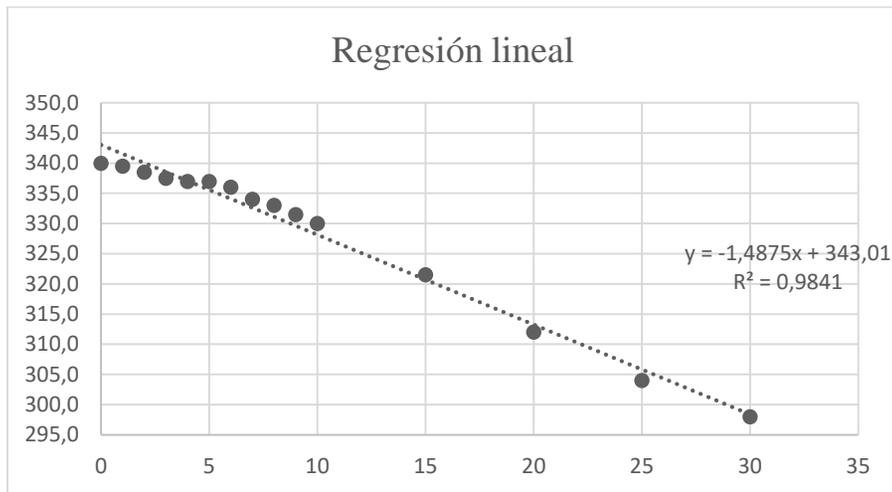
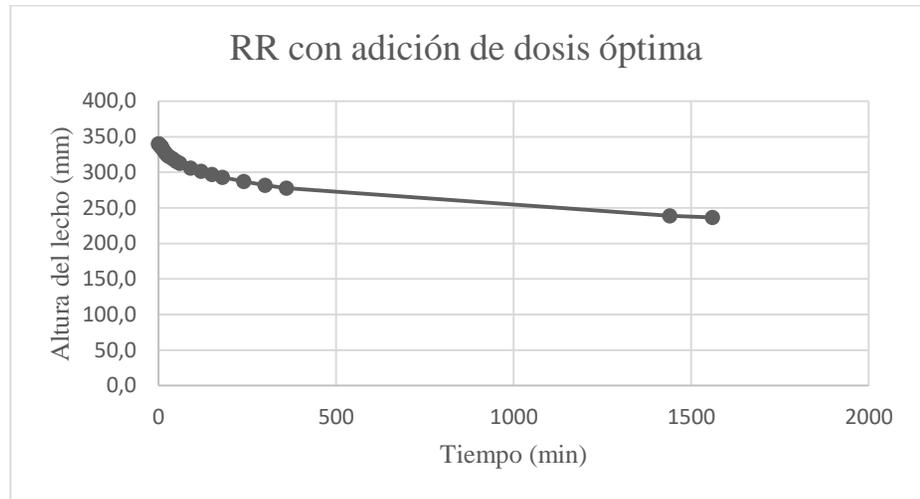
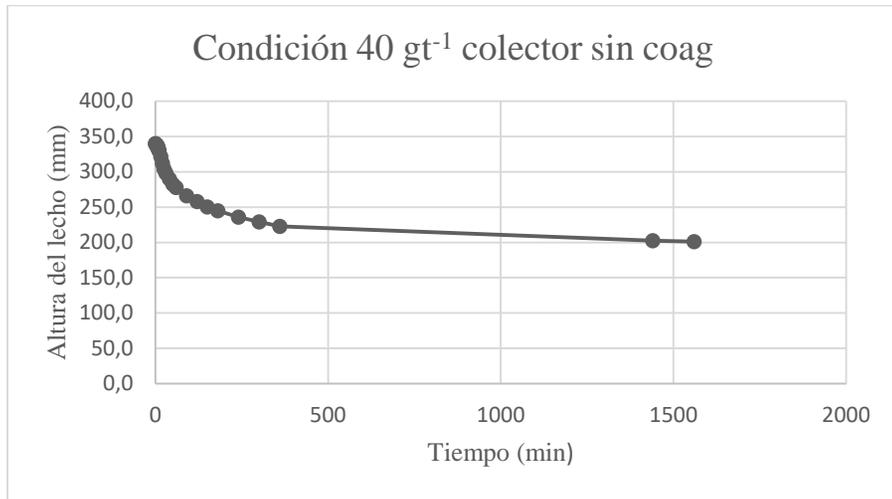
<b>Pruebas en ausencia de coagulante</b>				
<b>COF 15-5M: 15 gt<sup>-1</sup> colector + 45 gt<sup>-1</sup> floculante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	320,1	320,1	23,9%	23,9%
Colas	1019,5	1339,6	76,1%	100,0%
Alimentación	1339,6			
<b>COF 25-5M: 25 gt<sup>-1</sup> colector + 45 gt<sup>-1</sup> floculante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	307,9	307,9	23,1%	23,1%
Colas	1025,6	1025,6	76,9%	100,0%
Alimentación	1333,5			
<b>COF 40-5M: 40 gt<sup>-1</sup> colector + 45 gt<sup>-1</sup> floculante</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	564,9	564,9	42,9%	42,9%
Colas	751,3	1316,2	57,1%	100,0%
Alimentación	1316,2			

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 7.13 Datos obtenidos en ensayos de sedimentación discontinua efectuados en ausencia de coagulante y distintas dosificaciones de colector.

<b>Relave flotado COF40-5M</b>				<b>RR sin flotar con dosis óptima</b>			
Tiempo (min)	Altura lecho (mm)	Volumen lecho (ml)	Volumen agua (ml)	Tiempo (min)	Altura lecho (mm)	Volumen lecho (ml)	Volumen agua (ml)
<b>0</b>	340,0	1000,0	0,0	<b>0</b>	340,0	1000,0	0,0
<b>1</b>	339,5	998,5	1,5	<b>1</b>	340,0	1000,0	0,0
<b>2</b>	338,5	995,6	4,4	<b>2</b>	339,0	997,1	2,9
<b>3</b>	337,5	992,6	7,4	<b>3</b>	338,5	995,6	4,4
<b>4</b>	337,0	991,2	8,8	<b>4</b>	338,0	994,1	5,9
<b>5</b>	337,0	991,2	8,8	<b>5</b>	337,0	991,2	8,8
<b>6</b>	336,0	988,2	11,8	<b>6</b>	337,0	991,2	8,8
<b>7</b>	334,0	982,4	17,6	<b>7</b>	336,5	989,7	10,3
<b>8</b>	333,0	979,4	20,6	<b>8</b>	336,0	988,2	11,8
<b>9</b>	331,5	975,0	25,0	<b>9</b>	335,0	985,3	14,7
<b>10</b>	330,0	970,6	29,4	<b>10</b>	334,0	982,4	17,6
<b>15</b>	321,5	945,6	54,4	<b>15</b>	330,0	970,6	29,4
<b>20</b>	312,0	917,6	82,4	<b>20</b>	326,5	960,3	39,7
<b>25</b>	304,0	894,1	105,9	<b>25</b>	324,0	952,9	47,1
<b>30</b>	298,0	876,5	123,5	<b>30</b>	322,0	947,1	52,9
<b>40</b>	290,0	852,9	147,1	<b>40</b>	319,0	938,2	61,8
<b>50</b>	282,5	830,9	169,1	<b>50</b>	315,5	927,9	72,1
<b>60</b>	278,0	817,6	182,4	<b>60</b>	312,5	919,1	80,9
<b>90</b>	266,0	782,4	217,6	<b>90</b>	306,0	900,0	100,0
<b>120</b>	258,0	758,8	241,2	<b>120</b>	301,5	886,6	113,2
<b>150</b>	250,5	736,8	263,2	<b>150</b>	297,0	873,5	126,5
<b>180</b>	245,0	720,6	279,4	<b>180</b>	293,0	861,8	138,2
<b>240</b>	236,0	694,1	305,9	<b>240</b>	287,0	844,1	155,9
<b>300</b>	229,0	673,5	326,5	<b>300</b>	282,0	829,4	170,6
<b>360</b>	223,0	655,9	344,1	<b>360</b>	278,0	817,6	182,4
<b>1440</b>	202,5	595,6	404,4	<b>1440</b>	239,0	702,9	297,1
<b>1560</b>	201,0	591,2	408,8	<b>1560</b>	236,5	695,6	304,4

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA



Pendiente [mm min<sup>-1</sup>] 1,4875

**Velocidad de sedimentación [cm h<sup>-1</sup>] 8,93**

Pendiente [mm min<sup>-1</sup>] 0,6466

**Velocidad de sedimentación [cm h<sup>-1</sup>] 3,88**

Figura 7.5 Curva de ensayo de sedimentación y regresión lineal obtenida en condición (Izquierda; Derecha): Cola flotada con condición óptima 40 gt<sup>-1</sup> colector y en ausencia de coagulante; Relave recibido sin flotar con condición óptima.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

Tabla 7.14 Dosificación en [g] y [L] calculados para los reactivos a utilizar en presencia de coagulante + floculante y variando dosis de colector.

N° Prueba	Masa de mineral g	Dosis							
		Coagulante		Floculante		Colector		Espumante	
		gt <sup>-1</sup>	g	gt <sup>-1</sup>	g	gt <sup>-1</sup>	μL	gt <sup>-1</sup>	μL
<b>13</b>	1335,9	13	0,0174	45	0,0601	15	18	8	13
<b>14</b>	1270,7	13	0,0164	45	0,0572	25	28	8	13
<b>15</b>	1357,1	13	0,0176	45	0,0611	40	48	8	13

Tabla 7.15 Resultados de recuperación en peso de pruebas en presencia de coagulante + floculante y variando dosis de colector.

<b>Pruebas en presencia de coagulante y floculante</b>				
<b>FC 15-5M: 15 gt<sup>-1</sup> colector</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	341,6	341,6	25,6%	25,6%
Colas	994,3	1335,9	74,4%	100,0%
Alimentación	1335,9			
<b>FC 25-5M/CF 13-5M: 25 gt<sup>-1</sup> colector</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	479,0	479,0	37,7%	37,7%
Colas	791,7	1270,7	62,3%	100,0%
Alimentación	1270,7			
<b>FC 40-5M: 40 gt<sup>-1</sup> colector</b>				
Tiempo [min]	Masa [g]		Masa recuperada [%]	
	Directa	Acumulada	Directa	Acumulada
0				
5	386,6	386,6	28,5%	28,5%
Colas	970,5	1357,1	71,5%	100,0%
Alimentación	1357,1			

CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

7.5. Datos de distribución granulométrica por muestra

<b>Relave recibido</b>		<b>Cola flotada F 45-5M</b>		<b>Cola flotada CF 13-5M</b>	
Tamaño (µm)	% pasante	Tamaño (µm)	% Pasante	Tamaño (µm)	% Pasante
3350,00	100,0	3350,00	100,0	3350,00	100,0
2000,00	100,0	2000,00	100,0	2000,00	100,0
300,00	92,56	300,00	97,37	300,00	97,83
180,00	81,04	180,00	88,60	180,00	88,54
150,00	76,86	150,00	83,64	150,00	83,01
106,00	68,74	106,00	74,89	106,00	73,42
75,00	61,68	75,00	66,44	75,00	64,56
53,00	55,43	53,00	58,17	53,00	55,85
45,00	52,28	45,00	53,99	45,00	51,04
37,00	50,39	37,00	51,47	37,00	47,82
31,11	48,75	31,11	49,34	31,11	45,68
26,16	46,67	26,16	46,85	26,16	43,21
22,00	44,34	22,00	44,29	22,00	40,65
18,50	41,87	18,50	41,76	18,50	38,15
15,55	39,31	15,55	39,16	15,55	35,71
13,08	36,57	13,08	36,33	13,08	33,27
11,00	33,54	11,00	33,21	11,00	30,70
9,25	30,11	9,25	29,87	9,25	27,88
7,78	26,38	7,78	26,44	7,78	24,78
6,54	22,63	6,54	23,03	6,54	21,58
5,50	19,09	5,50	19,70	5,50	18,38
4,62	15,96	4,62	16,55	4,62	15,38
3,89	13,22	3,89	13,65	3,89	12,71
3,27	10,81	3,27	11,06	3,27	10,37
2,75	8,67	2,75	8,80	2,75	8,34
2,31	6,81	2,31	6,88	2,31	6,60
1,94	5,25	1,94	5,29	1,94	5,12
1,64	3,98	1,64	3,99	1,64	3,90
1,38	2,95	1,38	2,95	1,38	2,91
1,16	2,14	1,16	2,13	1,16	2,12
0,97	1,49	0,97	1,48	0,97	1,50
0,82	0,99	0,82	0,97	0,82	1,00
0,69	0,61	0,69	0,59	0,69	0,62
0,58	0,33	0,58	0,33	0,58	0,35
0,49	0,16	0,49	0,16	0,49	0,18
0,41	0,07	0,41	0,06	0,41	0,08
0,34	0,02	0,34	0,02	0,34	0,04
0,29	0,00	0,29	0,00	0,29	0,02
0,24	0,00	0,24	0,00	0,24	0,01

CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

0,20	0,00	0,20	0,00	0,20	0,01
0,17	0,00	0,17	0,00	0,17	0,00
0,15	0,00	0,15	0,00	0,15	0,00

<b>Cola flotada CO 25-5M</b>		<b>Cola flotada COF 40-5M</b>		<b>Cola flotada FC 25-5M</b>	
Tamaño (µm)	% pasante	Tamaño (µm)	% pasante	Tamaño (µm)	% pasante
3350,00	100,0	3350,00	100,0	3350,00	100,0
2000,00	100,0	2000,00	100,0	2000,00	100,0
300,00	89,92	300,00	88,01	300,00	91,36
180,00	74,69	180,00	71,15	180,00	77,52
150,00	69,59	150,00	64,76	150,00	72,74
106,00	59,99	106,00	55,06	106,00	63,54
75,00	52,18	75,00	47,19	75,00	55,99
53,00	45,65	53,00	40,32	53,00	49,75
45,00	42,61	45,00	37,14	45,00	46,99
37,00	40,93	37,00	35,54	37,00	45,98
31,11	39,47	31,11	34,08	31,11	44,71
26,16	37,61	26,16	32,23	26,16	42,89
22,00	35,59	22,00	30,24	22,00	40,82
18,50	33,51	18,50	28,31	18,50	38,70
15,55	31,40	15,55	26,42	15,55	36,46
13,08	29,16	13,08	24,45	13,08	33,96
11,00	26,74	11,00	22,27	11,00	31,11
9,25	24,09	9,25	19,85	9,25	27,95
7,78	21,27	7,78	17,33	7,78	24,60
6,54	18,38	6,54	14,82	6,54	21,27
5,50	15,52	5,50	12,45	5,50	18,02
4,62	12,85	4,62	10,34	4,62	15,05
3,89	10,50	3,89	8,48	3,89	12,41
3,27	8,47	3,27	6,87	3,27	10,09
2,75	6,73	2,75	5,47	2,75	8,09
2,31	5,25	2,31	4,27	2,31	6,36
1,94	4,03	1,94	3,29	1,94	4,91
1,64	3,03	1,64	2,48	1,64	3,72
1,38	2,25	1,38	1,84	1,38	2,77
1,16	1,62	1,16	1,34	1,16	2,00
0,97	1,13	0,97	0,94	0,97	1,40
0,82	0,75	0,82	0,62	0,82	0,92
0,69	0,46	0,69	0,39	0,69	0,56
0,58	0,25	0,58	0,22	0,58	0,31
0,49	0,12	0,49	0,12	0,49	0,15
0,41	0,06	0,41	0,06	0,41	0,06
0,34	0,02	0,34	0,03	0,34	0,02
0,29	0,01	0,29	0,02	0,29	0,00

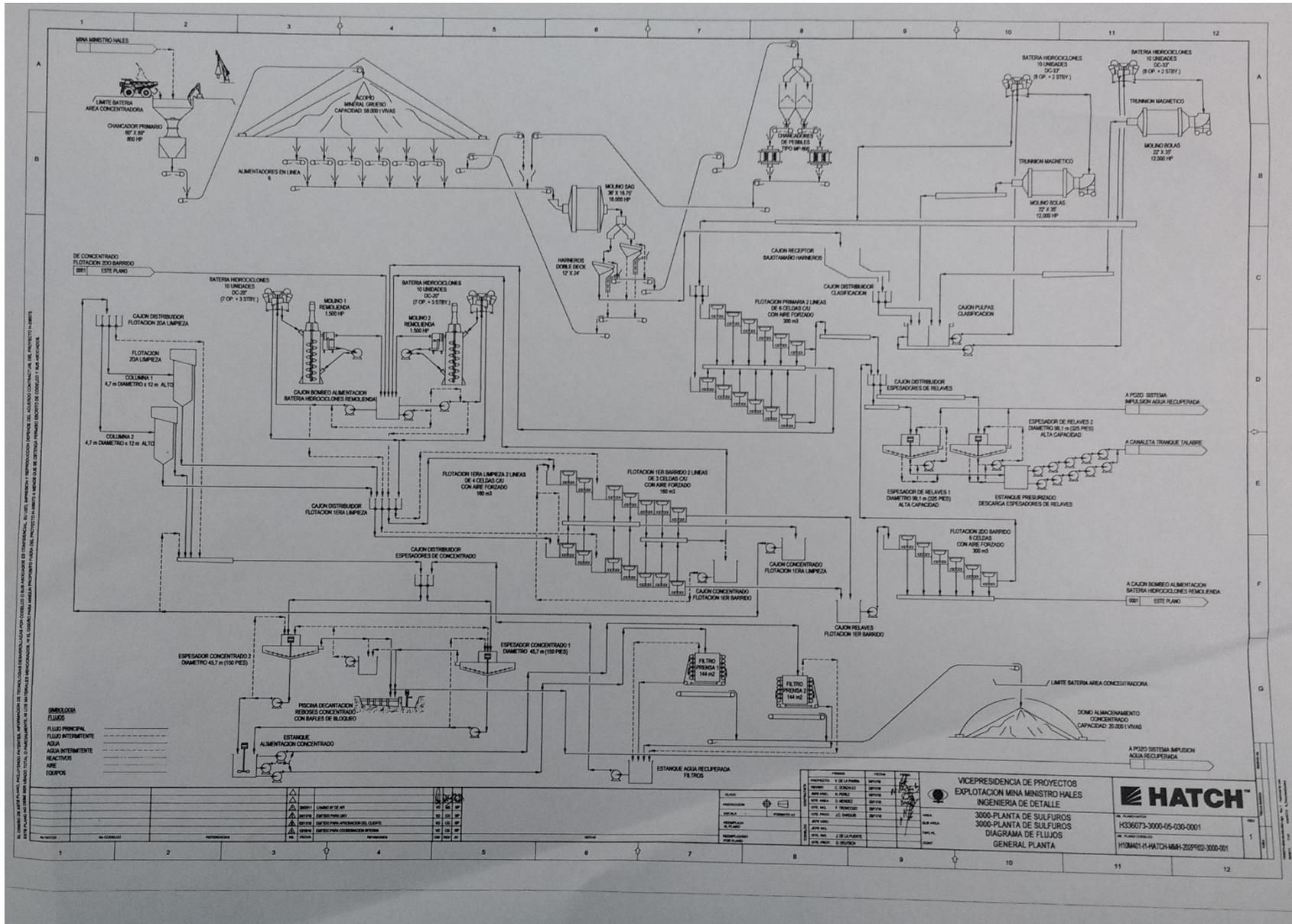
CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

0,24	0,01	0,24	0,02	0,24	0,00
0,20	0,00	0,20	0,01	0,20	0,00
0,17	0,00	0,17	0,00	0,17	0,00
0,15	0,00	0,15	0,00	0,15	0,00

---

# CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

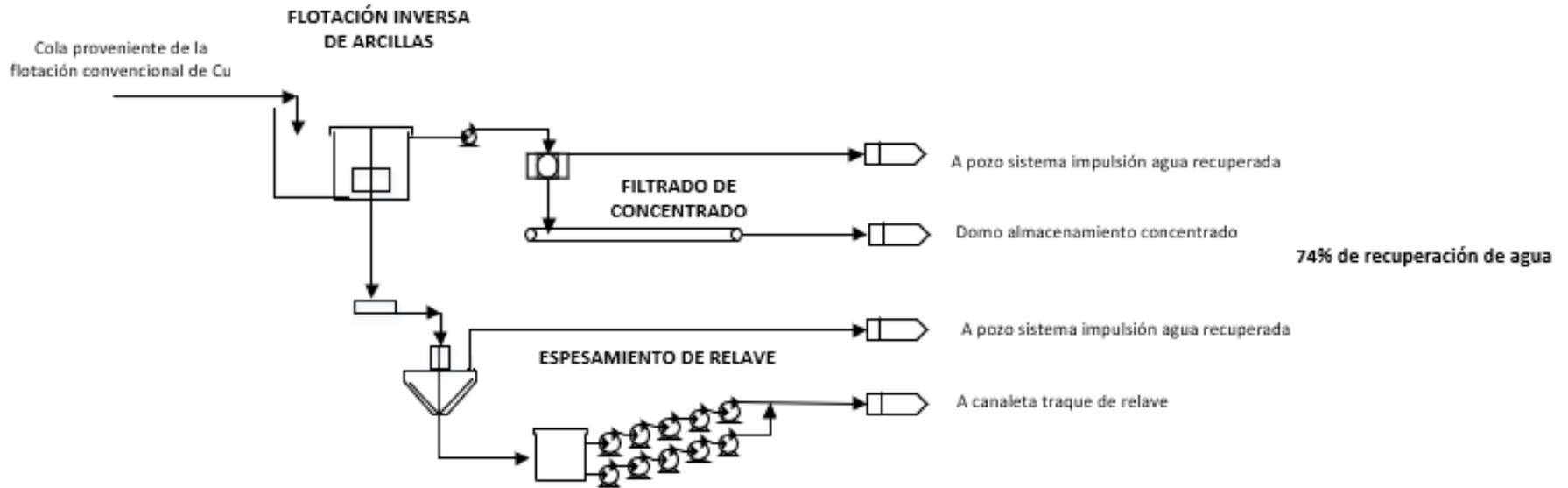
## 7.6. Flowsheet planta Codelco - División Ministro Hales





## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

### 7.8. Balance hídrico condición experimental de flotación inversa de arcillas

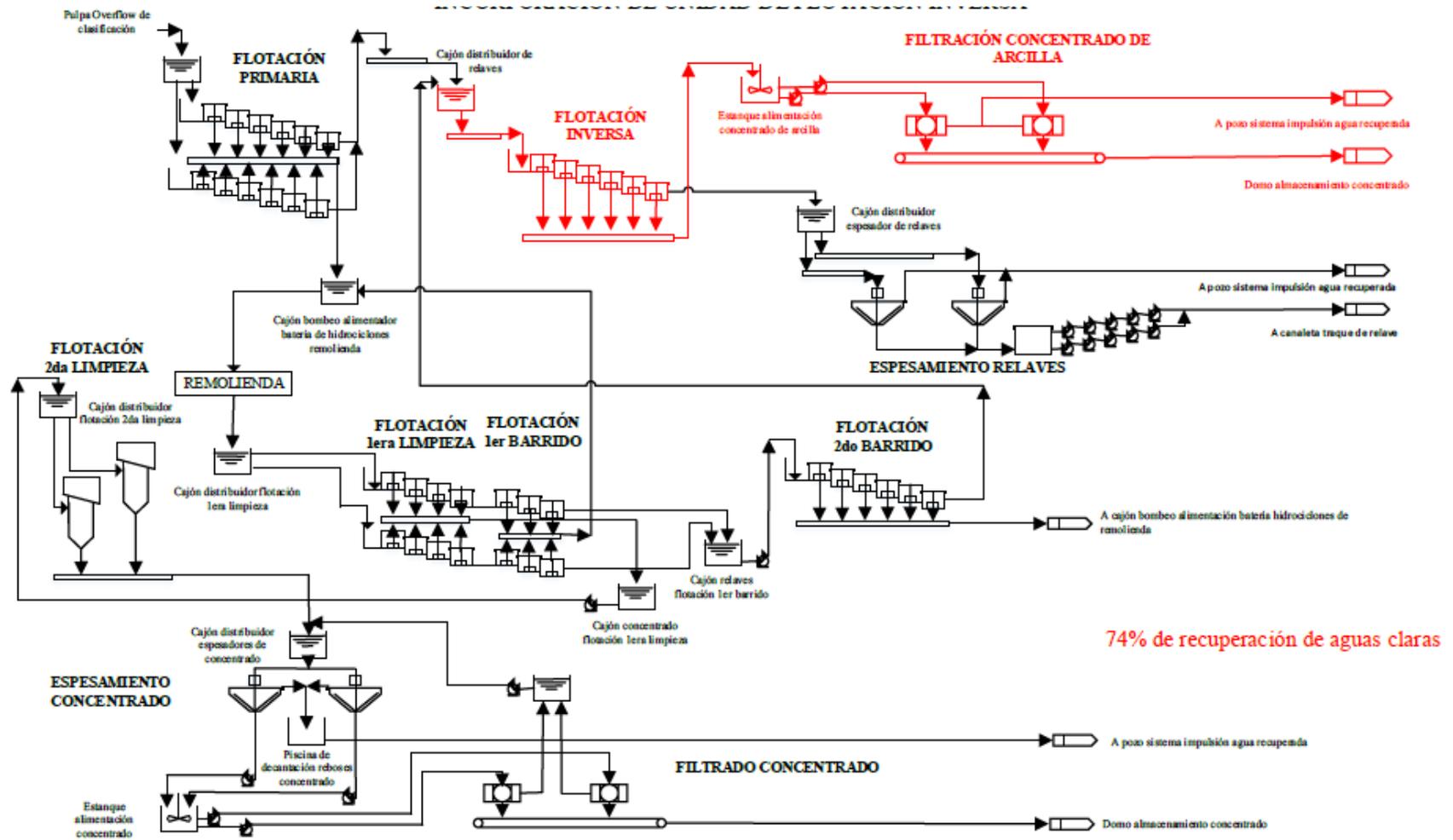


FLOTACIÓN INVERSA									ESPEZADOR DE RELAVE						FILTRADO DE CONCENTRADO																	
F			C			T			F			WATER RECOVERY			T			F			C			WATER RECOVERY								
tph			tph			tph			tph			tph			tph			tph			tph			tph			tph					
1316	2,5	526	565	2,48	228	751	2,47	304	751,3	2,47	304				751	2,47	304	565	2,48	228	564,9	2,48	228									
2184	37,6	2184	1189	32,2	1189	995	43	995	995	43	995	<b>502</b>	<b>502</b>		493	60,4	493	1189	32,2	1189	77	88	77				<b>1112</b>	<b>1112</b>				
3501	1,29	2711	1754	1,24	1417	1746	1,34	1299	1746	1,34	1299				1244	1,56	797	1754	1,24	1417	642	2,11	305									

Figura 7.7. Flowsheet de la unidad de Flotación inversa - Espesamiento/Filtrado; Balance hídrico: Condición experimental.

## CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

7.9. Flowsheet de planta Codelco – DMH incorporando unidad de flotación inversa



FLOTACIÓN INVERSA									ESPEADOR DE RELAVE						FILTRADO DE CONCENTRADO						WATER RECOVERY			
F			C			T			F			T			F			C			WATER RECOVERY			
tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	tph	m <sup>3</sup> /h <sup>-1</sup>	
3767	2,5	1501	1617	2,56	630	2150	2,47	871	2150	2,47	871	2150	2,47	871	1617	2,56	630	1617	2,56	632				
6252	37,6	6252	3405	32,2	3405	2847	43,0	2847	2847	43,0	2847	1410	60,4	1410	3405	32,2	3405	108,1	88,0	108			<b>3297</b>	<b>3297</b>
10019	1,23	7753	5022	1,24	4035	5001	1,35	3717	5001	1,35	3717	3560	1,56	2280	5022	1,24	4035	1725	2,33	740				

**Simbología**

— Trazado actual de la planta

— Trazado nuevo a incorporar

Figura 7.8. Flowsheet área de concentración - espesamiento de planta Codelco DMH incorporando unidad de flotación inversa.

CONCENTRACIÓN DE ARCILLAS IÓNICAS DESDE RELAVES POR FLOTACIÓN INVERSA

7.10. Afiche de campaña: “Comprometidos con la sustentabilidad y ahorro de agua”, impulsada por Codelco DMH, 2018.

