



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

PRETRATAMIENTO DE MINERAL BITUMINOSO DE COBRE  
PREVIO A FLOTACIÓN

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN METALURGIA EXTRACTIVA

JUAN FRANCISCO SCHWARZE FRAILE

PROFESOR GUÍA:

LEANDRO VOISIN ARAVENA

PROFESOR CO-GUÍA:

WILLY KRACHT GAJARDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CHRISTIAN ILHE BASCUÑÁN

PERLA ACUÑA ROJAS

SANTIAGO DE CHILE

2017

## Resumen

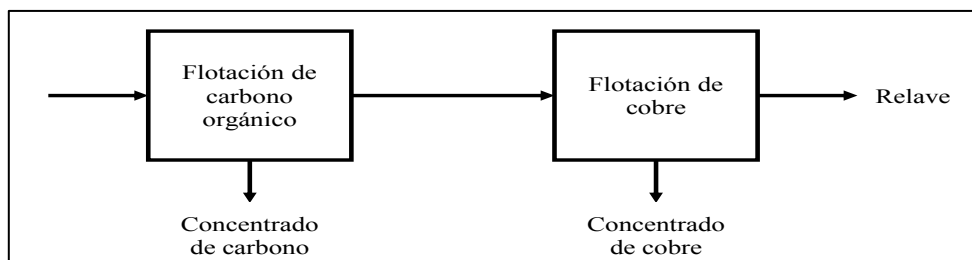
Existe en Chile una franja de depósitos de sulfuros de cobre, del tipo estrato-ligados, asociada a la Cordillera de la Costa, entre Caldera y San Fernando. Algunos de estos depósitos son Talcuna, Cabildo y El Soldado, el mayor de todos. Estos yacimientos contienen otros elementos metálicos, tales como oro, plata, zinc y plomo. Aunque no tan importantes como los grandes pórfidos, son relevantes para la pequeña y mediana minería. Yacimientos similares se encuentran en Australia, Rusia, Polonia, Groenlandia y China.

Estos depósitos se formaron sobre rocas sedimentarias que fueron posteriormente metamorfoseadas. Estas rocas, contienen carbono orgánico, que se manifiesta como bitumen, pirobitumen, e incluso grafito [22].

Debido a que se comporta como un agente tensoactivo, el carbono interactúa negativamente con los reactivos, particularmente con el espumante. Las empresas acostumbran contrarrestar este efecto con un incremento de la dosificación de espumante: tres, cuatro o más veces los niveles habituales de la industria. Incluso agregan depresantes específicos para el carbón. Y aun así, la recuperación de cobre, la ley del concentrado y la cinética de flotación caen significativamente por la presencia de carbono.

Inspirado en la tecnología utilizada para el tratamiento de las arenas bituminosas (tar sands), se postuló que pretratar o preflotar estos minerales utilizando un método similar que retire el carbono, permitiría mejorar los resultados

Este método consiste en la adición de una base fuerte y una preflotación. Luego, se prosigue con una flotación convencional de cobre.



Para validar esta hipótesis, se realizaron pruebas a nivel de laboratorio de preflotación con adición de una base fuerte, seguidos de una flotación convencional. Las pruebas se realizaron con mineral de Cabildo. Los resultados de las pruebas muestran:

- Un aumento del 5-8% en la recuperación del cobre.
- Un aumento (no bien cuantificado) en la ley del concentrado de cobre.
- Una disminución (50%) del consumo de espumante.
- Un aumento (50-100%) de la cinética de flotación, lo que implica una reducción equivalente en el tiempo de residencia.

Estos resultados muestran que la preflotación previo a la flotación es un método interesante y atractivo para procesar los minerales metálicos bituminosos. Esta tesis es un primer paso hacia el desarrollo de esta novedosa tecnología.

## Abstract

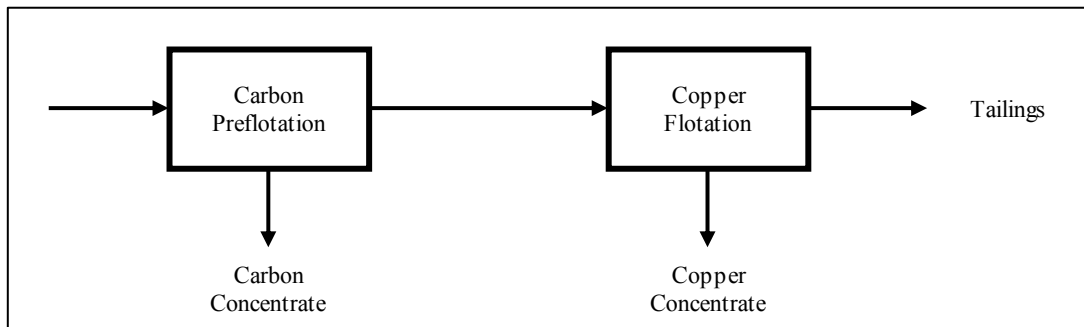
### Pretreatment of bituminous copper ore previous to froth flotation

There is a belt of stratabound copper deposits in Chile associated with the Coastal Mountain ridge (Cordillera de la Costa), from Caldera to San Fernando. Some of them are Talcuna, Cabildo, and the largest: El Soldado. These deposits also contain gold, silver, zinc, and lead. Not as large as porphyric deposits, they are important for the small and medium size mining industry. Similar deposits are found in Australia, Russia, Poland, Greenland, and China.

These metal ores were formed in metamorphosed sedimentary rocks with organic carbon. Carbon is present in the form of bitumen, pyrobitumen, and on some locations graphite [22].

Because it acts as a surfactant agent, carbon interacts negatively with reagents, particularly with the frother reagent. Companies use an increment of the frother dosage to counter this issue: three, four or more times the usual levels of the industry. Sometimes they add carbon specific depressing reagents. And even so, copper recovery, concentrate grade, and kinetic flotation drop significantly due to the presence of carbon.

Inspired by the technology used by the tar sands industry, it was postulated that a pretreatment or preflotation of these ores would be able to improve results if carbon is extracted previously. These pretreatment considers the addition of a strong base and a preflotation.



In order to validate this hypothesis, a set of laboratory tests were conducted, adding a strong base before prefloating a copper ore slurry, followed by a conventional froth flotation stage. S sample of Cabildo ore was used. Tests results show:

- An increase of 5-8% in copper recovery.
- An increase (not well quantified) of the copper concentrate grade.
- A decrease (50%) in the frother reagent consumption.
- An increase (50-100%) in kinetic flotation, which implies an equivalent reduction in flotation residence time.

Results show that the pretreatment is an interesting and attractive method for metal bituminous ores processing. This thesis is the first step to develop this novel technology.

A mis papás

A mis abuelos

A mi hijo

A Soledad,  
mi polola y futura compañera en mi vida

Cuando ustedes digan “sí”, que sea realmente sí; y, cuando digan “no”, que sea no (Mateo 5, 37).  
Y la verdad los hará libres (Juan 8, 32).

Jesús de Nazaret

## Agradecimientos

Al comienzo parecía una loca aventura, semejante a una quijotada. Hoy día veo que junto a mi han estado muchos Sanchos, acompañándome y dándome ánimo.

En primer lugar, agradezco a quienes me mostraron este camino de la minería y la metalurgia extractiva desde mi niñez, e incluso antes: mi bisabuelo Johann, mi abuelo Juan, mis tíos Hermann, Néstor, Rogelio, Gastón, René, Carmen y Lorenzo.

A aquellos profesores que fueron marcando mi vida, cada uno en lo suyo. Del colegio: Mario Gárate, mi profesor de Química; Óscar Pizarro, Manuel Sandoval y Cecilia Neira, mis profesores jefes; Carlos Aravena, que dio una pista que ha iluminado toda mi vida, y mis profesores de matemáticas, Edgardo Ramírez y mi tía Aminta Schwarze. Del pregrado recuerdo especialmente a Dionisio Garrido, Francisco Santa María, Aldo Casali, Roberto Muñoz, y Augusto Millán Y aunque nunca me hicieron clases, no quiero dejar de recordar a Marianella Andrade y Juanita Vergara, mis eternas secretarias docente.

A los profesores del programa de magister que me acompañaron en esta etapa de mi vida: mi profesor guía Leandro Voisin, Willy Kracht que sin saberlo me dio la pista de esta investigación, y Gonzalo Montes-Atenas, que me facilitó el uso del laboratorio de Procesamiento de Minerales. A Perla Acuña, que a su modo me ha estado empujando a salir de la zona de confort. A mis compañeros de estudio y de investigación, Paula Martínez, Nicolás Navarro, Javier Merrill, Matías Álvarez, Giovanni Pamparana, Camila Pizarro, y otros cuyo nombre no registré. La ayuda dada por Bárbara Gordon, Nicole Cid y Romina Araya me permitió resolver los temas administrativos, que no fueron pocos.

A quienes me dieron apoyo desinteresado para lograr desarrollar y llevar a buen término las pruebas que respaldan esta tesis: Anisse Pizarro y Marco Cáceres, de los laboratorios de Procesamiento de Minerales y de Pirometalurgia respectivamente, a Andrés Monardes, que me facilitó las muestras, y a Jorge Cifuentes y José Luis Barrera, del Laboratorio MTQ.

Y finalmente a quienes me han acompañado en el camino no menos importante de descubrir que nunca he estado solo: mis amigos los sacerdotes Julio Larrondo y Carlos Risopatrón, y la hermana Irma Alcayaga, de la Divina Providencia.

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Presentación del tema .....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo general .....	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Justificación del trabajo .....	3
1.4	Alcances del estudio .....	4
2	Marco teórico.....	5
2.1	Definición y características del bitumen.....	5
2.2	El bitumen y los yacimientos de cobre .....	7
2.3	El bitumen en yacimientos de Chile .....	8
2.4	Flotación de minerales de cobre bituminoso .....	12
2.5	Arenas bituminosas y obtención de petróleo .....	14
3	Planificación experimental .....	18
3.1	VARIABLES DEL SISTEMA .....	18
3.2	Preparación de la muestra de mineral .....	19
3.3	Cinéticas de molienda.....	28
3.4	Pruebas de Preflotación y de Flotación de Cobre .....	32
3.5	Plan de pruebas experimentales.....	37
3.5.1	Pruebas de flotación de cobre sin preflotación.....	37
3.5.2	Pruebas de preflotación sin adición de una base fuerte, y flotación de cobre .....	38
3.5.3	Pruebas de preflotación con adición de NaOH, y flotación de cobre.....	39
3.5.4	Pruebas de preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> , y flotación de cobre .....	40
3.5.5	Pruebas de limpieza del concentrado de la preflotación.....	40
4	Trabajo Experimental .....	42
4.1	Caracterización de las muestras .....	42
4.1.1	Análisis químico por cobre y por carbono.....	42
4.1.2	Análisis químico ICP.....	43
4.1.3	Análisis con equipo Hi-Logger .....	45
4.1.4	Determinación de densidad del mineral (picnometría).....	48
4.1.5	Determinación de la humedad del mineral .....	48
4.2	Pruebas preliminares.....	49

4.3	Pruebas de preflotación y flotación de cobre.....	49
4.4	Pruebas sin preflotación.....	50
4.4.1	Pruebas sin preflotación de muestra AC.....	50
4.4.2	Pruebas sin preflotación de muestra BC.....	51
4.4.3	Pruebas sin preflotación de muestra CC.....	53
4.5	Pruebas con preflotación sin adición de base fuerte.....	55
4.5.1	Prueba con preflotación sin adición de base fuerte de muestra AC.....	55
4.5.2	Prueba con preflotación sin adición de base fuerte de muestra BC.....	56
4.5.3	Prueba con preflotación sin adición de base fuerte de muestra CC.....	58
4.6	Pruebas con preflotación con adición de NaOH.....	59
4.6.1	Pruebas con preflotación con adición de NaOH de muestra AC.....	59
4.6.2	Pruebas con preflotación con adición de NaOH de muestra BC.....	62
4.6.3	Pruebas con preflotación con adición de NaOH de muestra CC.....	64
4.7	Pruebas con preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> .....	70
4.7.1	Pruebas con preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> de muestra AC.....	70
4.7.2	Pruebas con preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> de muestra BC.....	73
4.7.3	Pruebas con preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> de muestra CC.....	75
4.8	Prueba con limpieza del concentrado de la preflotación.....	79
5	Análisis y discusión.....	85
5.1	Efecto de la preflotación en la recuperación de cobre.....	85
5.1.1	Resultados de la muestra AC.....	85
5.1.2	Resultados de la muestra BC.....	88
5.1.3	Resultados de la muestra CC.....	90
5.2	Efecto de la preflotación en la ley del concentrado de cobre.....	93
5.2.1	Resultados de la muestra AC.....	93
5.2.2	Resultados de la muestra BC.....	94
5.2.3	Resultados de la muestra CC.....	95
5.3	Efecto de la preflotación en el consumo de espumante.....	97
5.4	Efecto de la preflotación en la cinética de la flotación de cobre.....	99
5.5	Diferencias entre las bases fuertes probadas.....	101
5.5.1	Efecto sobre la recuperación de cobre.....	101
5.5.2	Efecto sobre la ley del concentrado de cobre.....	102
5.5.3	Efecto sobre el consumo de espumante.....	102
5.5.4	Efecto sobre la cinética de la flotación de cobre.....	104
5.6	Preflotación sin adición de una base fuerte.....	104

5.7	Efecto de una etapa de limpieza del concentrado de la preflotación en la recuperación de cobre	105
5.8	Cinética de la extracción de carbono orgánico .....	109
5.8.1	Cinética de la extracción de carbono orgánico para la muestra AC .....	110
5.8.2	Cinética de la extracción de carbono orgánico para la muestra BC .....	112
5.8.3	Cinética de la extracción de carbono orgánico para la muestra CC .....	113
6	Conclusiones y recomendaciones para futuros estudios.....	114
6.1	Conclusiones de la presente tesis.....	114
6.2	Recomendaciones para futuros estudios .....	118
7	Bibliografía.....	120

## ANEXOS

ANEXO A: PREPARACIÓN DE PAQUETES

ANEXO B: ANÁLISIS CON HI-LOGGER

ANEXO C: CINÉTICAS DE MOLIENDA

ANEXO D: ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

ANEXO E: AJUSTE MODELO DE KLIMPEL



## Índice de Tablas

Tabla 1: Resultados industriales en Minera Las Cenizas .....	2
Tabla 2: Tarifas de ENAMI para minerales de flotación. Cobre base 2,5% Cu insoluble.....	2
Tabla 3: Muestras recibidas de Minera Las Cenizas .....	19
Tabla 4: Paquetes formados a partir de muestras N° 1 y 20.....	23
Tabla 5: Paquetes formados a partir de muestras N° 5 y 11.....	26
Tabla 6: Paquetes formados a partir de muestras N° 6 y 15.....	27
Tabla 7: Pruebas correspondientes a línea base (flotación de cobre directa, sin preflotación) .....	38
Tabla 8: Pruebas correspondientes a preflotación sin adición de una base fuerte, y flotación de cobre .....	38
Tabla 9: Pruebas correspondientes a preflotación con adición de NaOH, y flotación de cobre ...	39
Tabla 10: Pruebas correspondientes a preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> , y flotación de cobre .....	40
Tabla 11: Pruebas correspondientes a preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> , y flotación de cobre .....	41
Tabla 12: Análisis químico de muestras utilizadas en pruebas .....	42
Tabla 13: Análisis digestión total ICP-MS.....	43
Tabla 14: Distribución de especies en la ganga, según análisis de Hi-Logger.....	47
Tabla 15: Determinación de densidad del sólido (picnometría).....	48
Tabla 16: Determinación humedad del mineral .....	48
Tabla 17: Prueba flotación de cobre sin preflotación para muestra AC .....	50
Tabla 18: Prueba flotación de cobre sin preflotación para muestra BC .....	51
Tabla 19: Prueba flotación de cobre sin preflotación para muestra BC .....	52
Tabla 20: Prueba flotación de cobre sin preflotación para muestra CC .....	53
Tabla 21: Prueba flotación de cobre sin preflotación para muestra CC .....	54
Tabla 22: Prueba preflotación sin adición de base fuerte más flotación de cobre para muestra AC .....	55
Tabla 23: Prueba preflotación sin adición de base fuerte más flotación de cobre para muestra BC .....	57
Tabla 24: Prueba preflotación sin adición de base fuerte más flotación de cobre para muestra CC .....	58
Tabla 25: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra AC ..	60
Tabla 26: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra AC ..	61
Tabla 27: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra BC...	62
Tabla 28: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra CC...	64
Tabla 29: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra CC...	65
Tabla 30: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra CC...	67
Tabla 31: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra CC...	68
Tabla 32: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra CC...	69
Tabla 33: Prueba preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> más flotación de cobre para muestra AC .....	71
Tabla 34: Prueba preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> más flotación de cobre para muestra AC .....	72
Tabla 35: Prueba preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> más flotación de cobre para muestra BC .....	73
Tabla 36: Prueba preflotación con adición de Ca(OH) <sub>2</sub> más flotación de cobre para muestra CC .....	75

Tabla 37: Prueba preflotación con adición de $\text{Ca(OH)}_2$ más flotación de cobre para muestra CC	76
Tabla 38: Prueba preflotación con adición de $\text{Ca(OH)}_2$ más flotación de cobre para muestra CC	78
Tabla 39: Prueba con limpieza de concentrados de preflotación más flotación de cobre para muestra CC	79
Tabla 40: Prueba con limpieza de concentrados de preflotación más flotación de cobre para muestra CC	81
Tabla 41: Prueba con limpieza de concentrados de preflotación más flotación de cobre para muestra CC	82
Tabla 42: Prueba con limpieza de concentrados de preflotación más flotación de cobre para muestra CC	83
Tabla 43: Resumen resultados de recuperación de cobre para muestra AC	86
Tabla 44: Resumen resultados de recuperación de cobre para muestra BC	88
Tabla 45: Resumen resultados de recuperación de cobre para muestra CC (Parte 1)	90
Tabla 46: Resumen resultados de recuperación de cobre para muestra CC (Parte 2)	91
Tabla 47: Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra AC	93
Tabla 48: Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra BC	94
Tabla 49: Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra CC (parte 1)	95
Tabla 50: Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra CC (parte 2)	96
Tabla 51: Efecto de dosificación de espumante en recuperación de cobre, flotación de cobre. Pruebas sin preflotación.	97
Tabla 52: Efecto de dosificación de espumante en recuperación de cobre, flotación de cobre. Pruebas con preflotación. Base fuerte: $\text{NaOH}$ .	98
Tabla 53: Efecto de dosificación de espumante en recuperación de cobre, flotación de cobre. Pruebas con preflotación. Base fuerte: $\text{Ca(OH)}_2$	98
Tabla 54: Efecto de la preflotación en cinética de recuperación de cobre, flotación de cobre	99
Tabla 55: Efecto de la preflotación en cinética de recuperación de cobre, flotación de cobre: Pruebas con preflotación sin una base fuerte.	99
Tabla 56: Efecto de la base fuerte utilizada en la recuperación de cobre de la flotación de cobre. Dosificación de espumante: 100 g/t	101
Tabla 57: Efecto de la base fuerte utilizada en la ley de cobre obtenida a los 5 minutos de la flotación de cobre. Dosificación de espumante: 100 g/t	102
Tabla 58: Efecto de la dosificación de espumante sobre la recuperación de cobre en la flotación de cobre, según la base fuerte utilizada	103
Tabla 59: Efecto de la dosificación de espumante sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos de la flotación de cobre, según la base fuerte utilizada	103
Tabla 60: Efecto de la base fuerte utilizada sobre la cinética de la flotación de cobre	104
Tabla 61: Comparación de recuperaciones y leyes en preflotación, muestras AC y BC	105
Tabla 62: Comparación de recuperaciones y leyes en preflotación, muestra CC	105
Tabla 63: Comparación de recuperaciones y leyes en pruebas con limpieza del concentrado de la preflotación, muestra CC	107
Tabla 64: Comparación de recuperaciones y leyes en pruebas con limpieza del concentrado de la preflotación, muestra CC	108

Tabla 65: Recuperación de carbono orgánico en pruebas hechas con muestra AC .....	110
Tabla 66: Comparación de resultados de recuperación de carbono orgánico para pruebas con preflotación realizadas con la muestra AC .....	111
Tabla 67: Recuperación de carbono orgánico en pruebas hechas con muestra BC .....	112
Tabla 68: Análisis económico para planta existente que procese 40 mil toneladas de mineral de cobre con una ley de 1%.....	117

## Índice de Figuras

Figura 1: Algunos yacimientos de cobre de la formación Lo Prado .....	1
Figura 2: Rutas en la formación de los distintos tipos de migrabitúmenes [18] .....	6
Figura 3: Microfotografía con luz reflejada, escala indicada. Partícula de pirobitúmenes (B) rodeada por calcopirita (CPY). La calcopirita rellena algunas cavidades y cortes del bitumen, mostrando que la solidificación de este ocurrió antes de la llegada de los sulfuros de cobre [27] .	7
Figura 4: Secuencias paragénicas en Navarana Fjord, Groenlandia [19]y en Distrito Uchuni, IV Región, Chile [28] .....	8
Figura 5: Esquema simplificado de El Soldado [26].....	9
Figura 6: Mapa geológico simplificado, mostrando algunos centros mineros de la Cordillera de la Costa centro norte y centro de Chile: 1: Naltahua, 2: Melipilla, 3: Lo Aguirre, 4: El Salado, 5: El Soldado, 6: Cerro Negro, 7: Uchumi, 8: Talcuna [3] .....	11
Figura 7: Microfotografías a muestras de El Soldado, ambas con luz reflejada. (A) Vetilla de pirobitúmen asociada a trazas de calcopirita. (B) Pirita framboidal dentro de pirobitúmen [27] .	12
Figura 8: Efecto de mezclar mineral previo a la molienda en el requerimiento de espumante (simulación).....	13
Figura 9: Recuperación de carbono orgánico versus recuperación de zinc en Century Mine, Australia [11].....	13
Figura 10: Esquema propuesto para proceso BIOSHALE en concentrador Lubin, Polonia [4]...	14
Figura 11: Ubicación de arenas bituminosas en Alberta, Canadá [1] .....	15
Figura 13: Explotación de arenas bituminosas como rajo (open pit) [1].....	16
Figura 14: Esquema sistema de extracción de bitumen in situ [25].....	16
Figura 15: Muestra N° 20 sobre balanza digital.....	21
Figura 16: Mazo o combo utilizado para reducción de tamaño de muestras. Al fondo se ve el chancador de mandíbulas.....	22
Figura 17: Chancador de mandíbulas utilizado para la segunda reducción de tamaño. ....	22
Figura 18: Carrusel de 10 compartimentos, utilizado para formar los paquetes de mineral para cada prueba. ....	25
Figura 19: Carrusel de 16 compartimentos, para muestras de menores a 500 g. ....	25
Figura 20: Pulverizador rotatorio .....	29
Figura 21: Panel de control del pulverizador. El botón verde corresponde al interruptor de partida. Al centro está el timer con dos interruptores: escala de 0 a 3 o de 0 a 30 (derecha arriba), y minutos o segundos (derecha abajo). En la parte inferior está el horómetro del equipo.....	30
Figura 22: Tamizaje en seco. Se observa la formación de glómeros, impidiendo una buena clasificación de las partículas finas .....	31
Figura 23: Cinética de molienda de paquetes CC. % pasante bajo 140 mallas (línea azul) y bajo 400m mallas (línea roja).....	32
Figura 24: Esquema con arreglo de celda de flotación. Incluye sistema de recirculación de agua tibia. ....	32
Figura 25: Vista del arreglo de celda de flotación y sistema de recirculación de agua tibia. Celda de flotación con pulpa.....	33
Figura 26: Celda de flotación durante preflotación, mostrando un envase de plástico semi-sumergido con el fin que la celda rebose y evacúe el carbono orgánico.....	34
Figura 27: Procedimiento para pruebas con preflotación y flotación de cobre.....	35
Figura 28: Procedimiento para pruebas que incorporan limpieza del concentrado de la preflotación .....	36

Figura 29: Celda de flotación de 0,5L, utilizada para limpieza del concentrado de la preflotación .....	37
Figura 30: Corte a muestra N° 10 (AC).....	45
Figura 31: Corte a muestra N° 13 (BC).....	46
Figura 32: Trazado del haz hecho por Hi-Logger, análisis N° 1. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha .....	47
Figura 33: Análisis espectral N° 1 con Hi-Logger. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.....	47
Figura 34: Resumen recuperación global de cobre para muestra AC .....	87
Figura 35: Resumen recuperación de cobre en la flotación de cobre (considerada como etapa aislada, es decir calculada a partir de la cola de la preflotación) para muestra AC .....	87
Figura 36: Resumen recuperación global de cobre para muestra BC.....	89
Figura 37: Resumen recuperación de cobre en flotación de cobre (considerada como etapa aislada, es decir calculada a partir de la cola de la preflotación) para muestra BC.....	90
Figura 38: Resumen recuperación global de cobre para muestra CC.....	92
Figura 39: Resumen recuperación de cobre en flotación de cobre (considerada como etapa aislada, es decir calculada a partir de la cola de la preflotación) para muestra CC.....	92
Figura 40: Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra BC .....	94
Figura 41: Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra BC .....	95
Figura 42: Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra CC .....	97
Figura 43: Comparación de resultados de recuperación de flotación de cobre, calculada respecto a mineral alimentado .....	101
Figura 44: Comparación entre recuperación de sólido y recuperación de cobre en etapa de preflotación.....	106
Figura 45: Comparación entre ley de cobre de mineral y ley de cobre del concentrado de preflotación.....	107
Figura 46: Comparación entre recuperación de sólido y recuperación de cobre en etapa de limpieza de la preflotación .....	108
Figura 47: Bolsas con producto de pruebas. Notar que el material es más oscuro en las bolsas superiores (concentrado preflotación o primer concentrado de flotación de cobre) y más claro en las bolsas inferiores (colas), indicando que el sólido se va empobreciendo en carbono orgánico. ....	110
Figura 48: Distribución de bolsas con productos de pruebas mostradas en la Figura 47.....	110
Figura 49: Concentrado de cobre inicial sin preflotación (Test N° 2, paquete AC-14, izquierda) y con preflotación (Test N° 31-D, paquete CC-7, derecha). Nótese la diferencia en el color de la espuma debido a la mayor/menor presencia de bitumen (color negro).....	115
Figura 50: Arriba: circuito industrial de flotación de cobre. Abajo: circuito industrial, donde se ha incorporado una etapa de preflotación.....	117

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Presentación del tema

Desde hace años, los geólogos han estado estudiando los yacimientos de cobre en la cordillera de la costa de la zona central de Chile. Ellos han establecido que entre la zona de Copiapó y de San Fernando existen "bolsones" de material calcáreo con presencia de carbono orgánico (principalmente en la forma de bitumen). El contenido de carbono orgánico se encuentra habitualmente en el rango 1 a 5%. Esta área incluye las formaciones Lo Prado y Talcuna. El material, calcáreo metamórfico, forma roca de dureza alta (Wi sobre 16), y presenta carbono orgánico que habría sido un facilitador de los procesos posteriores de enriquecimiento hidrotermal, permitiendo la precipitación de metales, especialmente cobre. Ver Figura 1.



**Figura 1: Algunos yacimientos de cobre de la formación Lo Prado**

El mismo carbono orgánico que facilitó la mineralización, hoy genera problemas en la flotación debido a que interactúa con los reactivos utilizados. En particular, al comparar el comportamiento con minerales de cobre de la misma zona sin contenidos de carbono orgánico, se observa una inestabilidad de la espuma que resulta en menores recuperaciones, menores leyes de concentrado, mayores consumos de reactivos (especialmente de espumante), y mayores tiempos de flotación requeridos.

Las dificultades para flotar minerales de cobre con contenidos de carbono orgánico no se presentan únicamente en Chile: se han documentado casos en Australia, Rusia y Polonia. En todos estos casos se trata de rocas calcáreas sedimentarias o metamórficas, con contenidos de carbono orgánico.

Un grupo de investigadores polacos ha estudiado la destrucción del carbono orgánico utilizando ácido (sulfúrico). Debido a los altos consumos de ácido (100 a 400 g/kg), aplican este proceso a concentrados rougher (fracciones middling y pobres), con el objetivo de mejorar la calidad del concentrado final. Sin embargo, deben empeorar significativamente la selectividad de la flotación rougher con el fin de aumentar su recuperación, aumentando con ello los volúmenes a manejar.

Los altos consumos de ácido se explican porque los depósitos de minerales de cobre están contenidos en roca con carbonatos.

En el caso de los minerales de la formación Lo Prado, en Chile, uno de los ejemplos más representativos corresponde a los yacimientos de Minera Las Cenizas, en Cabildo (V Región). Cuando comenzaron a ser tratados estos minerales a comienzos del presente siglo, la planta se tuvo que adecuar a ellos: se aumentó el tiempo de residencia, se disminuyó la granulometría, y se aumentaron las dosificaciones de reactivos. Aun así, los resultados que se obtenían eran significativamente más bajos que los obtenidos con minerales del mismo sector pero sin la presencia de carbono orgánico (ver Tabla 1).

**Tabla 1: Resultados industriales en Minera Las Cenizas**

Tipo Mineral	Recuperación Global % Cu	Ley de concentrado % Cu
Mineral sin carbono	92	28
Mineral con carbono	82	22

Estas diferencias no se observan únicamente en estos minerales. ENAMI, en las tarifas que paga por maquila, también considera la presencia de minerales con contenidos de carbono orgánico (aunque sin explicitar esto último), tal como muestra la Tabla 2.

**Tabla 2: Tarifas de ENAMI para minerales de flotación. Cobre base 2,5% Cu insoluble**

Tarifas de agosto 2016	Tarifa	
	Base \$/tms*	Escala \$/tms.1%**
Tarifas nacionales excepto indicadas	38.035	23.770
Tarifa ganga caliza Cabildo-Rancagua	30.863	20.902

\* Nota: Precio de una tonelada de mineral de 2,5% Cu insoluble

\*\* Nota: Incremento/decremento en precio de una tonelada de mineral por cada incremento/decremento de ley en 1% de Cu insoluble

Por otro lado, la industria que produce petróleo a partir de arenas bituminosas (tar sands), especialmente en Canadá y Estados Unidos, lleva más de 80 años manejando materiales con contenidos de carbono orgánico en la forma de bitumen. Esta industria aplica una base fuerte, tal como el hidróxido de sodio, para separar las arenas del bitumen. En toda la bibliografía revisada,

no se ha encontrado estudio alguno que se inspire en las técnicas utilizadas por esa industria al problema del carbono orgánico presente en los minerales metálicos.

Esto invita a estudiar esta posibilidad, con la posible recompensa de poder mejorar los resultados metalúrgicos de la flotación de cobre y otros elementos metálicos, y de este modo aumentar la viabilidad de muchos proyectos mineros medianos y pequeños.

El desarrollo de las pruebas se hizo en base a financiamiento propio, lo que limitó la cantidad de pruebas y análisis que se pudieron ejecutar. Se contó con el apoyo de la Universidad de Chile en el uso de los laboratorios y reactivos, y de Minera Las Cenizas en la obtención de la muestra de mineral.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

La presente propuesta de tesis tiene como objetivo general verificar que es posible un preflotación a minerales de cobre de la formación Lo Prado con contenido de carbono orgánico, siguiendo el método utilizado para las arenas bituminosas, y de este modo mejorar los resultados en la flotación.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Establecer el efecto de retirar el carbono orgánico del mineral sobre el proceso de flotación de cobre en una muestra de la formación Lo Prado
- Verificar, a nivel de laboratorio, que se puede separar el carbono orgánico del mineral mediante un preflotación en ambiente básico.
- Investigar la influencia de algunas variables sobre la recuperación y la ley de cobre en la flotación primaria de cobre, con o sin preflotación. Estos factores son:
  - Aplicación de preflotación básico
  - Base fuerte utilizada en la preflotación (NaOH o CaO)
  - Dosificación de espumante en la flotación de cobre
- Validar que es posible recuperar el cobre que se arrastra con el concentrado de carbono orgánico, y de este modo obtener una mejor recuperación global de cobre.

## **1.3 Justificación del trabajo**

En la Cordillera de la Costa de Chile, entre Copiapó y San Fernando, se ubica una serie de yacimientos metálicos medianos y pequeños, en muchos de los cuales se observa la presencia de carbono orgánico en una roca caja sedimentaria o metamórfica, con una componente importante de carbonatos.

Desde los años '60 se conocen las dificultades que implica la presencia de carbono orgánico en la flotación de menas metálicas, siendo un caso emblemático la mina Burladora que se ubicaba en la zona de Illapel [8]. A la fecha, no se ha encontrado una manera completamente satisfactoria para



procesar estos minerales. Actualmente se asume la imposibilidad de mejorar las leyes y recuperaciones, y por tanto conseguir resultados semejantes a los logrados en depósitos minerales cercanos con poco o nulo contenido de carbono orgánico.

La implementación de un preflotación con una base fuerte permitiría a pequeños y medianos productores mejorar la viabilidad de sus proyectos. Incluso El Soldado, el mayor yacimiento de la zona, tiene en sus planes futuros extraer mineral con contenidos importantes de carbono orgánico. También sería aplicable a yacimientos similares en otros países.

#### **1.4 Alcances del estudio**

El presente estudio considera probar la viabilidad de la preflotación de carbono orgánico y su efecto en la flotación rougher de minerales de cobre a nivel de laboratorio.

Se realizarán análisis de cobre de las muestras generadas. Adicionalmente, y debido al presupuesto disponible, se realizarán análisis de carbono orgánico mediante una técnica indirecta: por volatilización diferenciada.

Se ha definido estudiar la aplicación a minerales de Minera Las Cenizas, Cabildo, quedando abierta la posibilidad de estudiar el comportamiento de otros minerales, de Chile o el extranjero.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Definición y características del bitumen

Tal como se indica en el libro “Bitumen in Ore Deposits” (Parnell, et al eds.), está bien documentado que en algunos depósitos metálicos existe una clara relación entre los contenidos de metal y los de materia orgánica [22]. Lo que no siempre queda claro es si esta relación es meramente accidental o bien uno es causa/efecto del otro.

La materia orgánica presente en los yacimientos se origina a partir de seres que vivieron en un pasado remoto, y cuyos cuerpos se acumularon junto con otros sedimentos en un ambiente que no permitía que fueran utilizados como nutrientes por otros seres vivos. En general, se trata de ambientes con carencia de oxígeno. Ejemplos de estos ambientes son el fondo de los pantanos y el lecho marino, fuera del alcance de las corrientes de agua.

Por la acción inicial de bacterias anaeróbicas, y luego por los cambios de presión y temperatura que implican las fuerzas geológicas, la materia orgánica se degrada y transforma en compuestos más elementales. Las fases gaseosa y líquidas menos viscosas migran, dejando atrás las componentes de mayor viscosidad, los bitúmenes, y las compones sólidas incapaces de migrar. Aunque no existe una definición universalmente aceptada, se podría definir al bitumen como “materia orgánica que tuvo o tiene el potencial de desplazarse como un líquido” [9]. Por lo tanto, esta definición excluye la materia orgánica compuesta por polímeros (kerógenos) y los gases.

La formación del bitumen se puede, en términos simplistas, estructurar en tres etapas [9]:

- Diagénesis. Corresponde a la etapa inicial, no madura, donde los restos orgánicos se están incorporando a los sedimentos.
- Catagénesis, también llamada “ventana del petróleo”. Esta etapa se inicia cuando la temperatura alcanza los 60° en sedimentos antiguos, o 120° en sedimentos más reciente. La materia orgánica se separa para formar moléculas livianas de gases y produciendo un residuo más “grafítico”.
- Metagénesis. Es la última etapa de maduración. Los bitúmenes, que se pudieron haber generado en las etapas anteriores, quedan aislados de las componentes más fluidas. En relación con las componentes sólidas, pueden haberse desplazado, desde unos pocos milímetros hasta varios cientos de metros.

Los bitúmenes se pueden clasificar en dos grandes grupos [18]:

- Ozocerita, que se forma principalmente a partir de residuos terrestres. Se originan probablemente a partir de residuos herbáceos o boscosos, ricos en ceras parafínicas derivadas de moléculas de alta complejidad utilizadas para protegerse del sol y de la pérdida de humedad por el viento. Rara vez se ven asociaciones de minerales metálicos con ozocerita.
- Migrabitumen, que se forma principalmente a partir de microorganismos marinos, especialmente algas, fitoplancton y bacterias. Estos organismos no requieren de una protección importante contra el sol o la deshidratación, por lo que no se encuentran protegidos por moléculas de alta complejidad.

Los migrabitúmenes se clasifican en tres grandes grupos, según la secuencia de formación: Todos parten de un estado inicial, que puede corresponder a micronafta, petróleo inmaduro y/o asfalto (ver Figura 2).

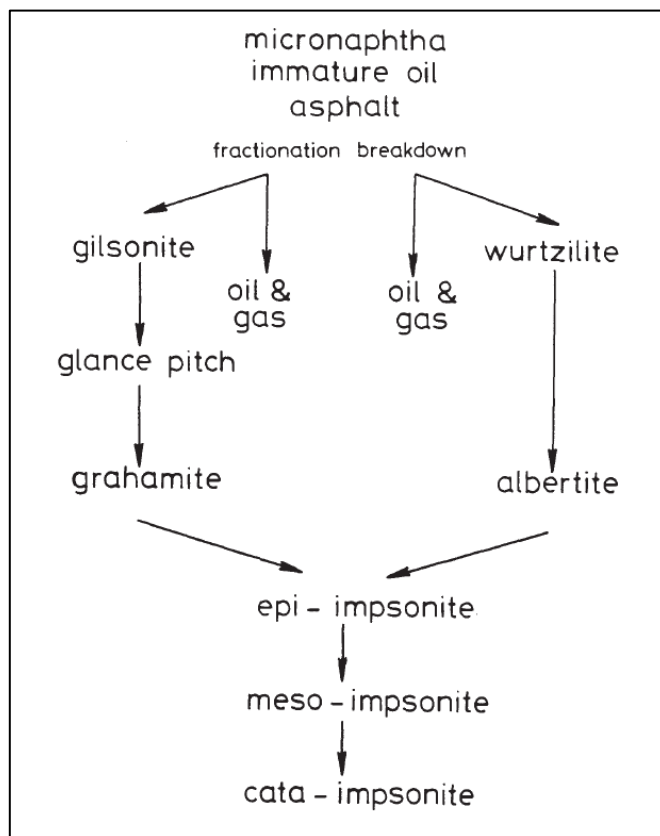


Figura 2: Rutas en la formación de los distintos tipos de migrabitúmenes [18]

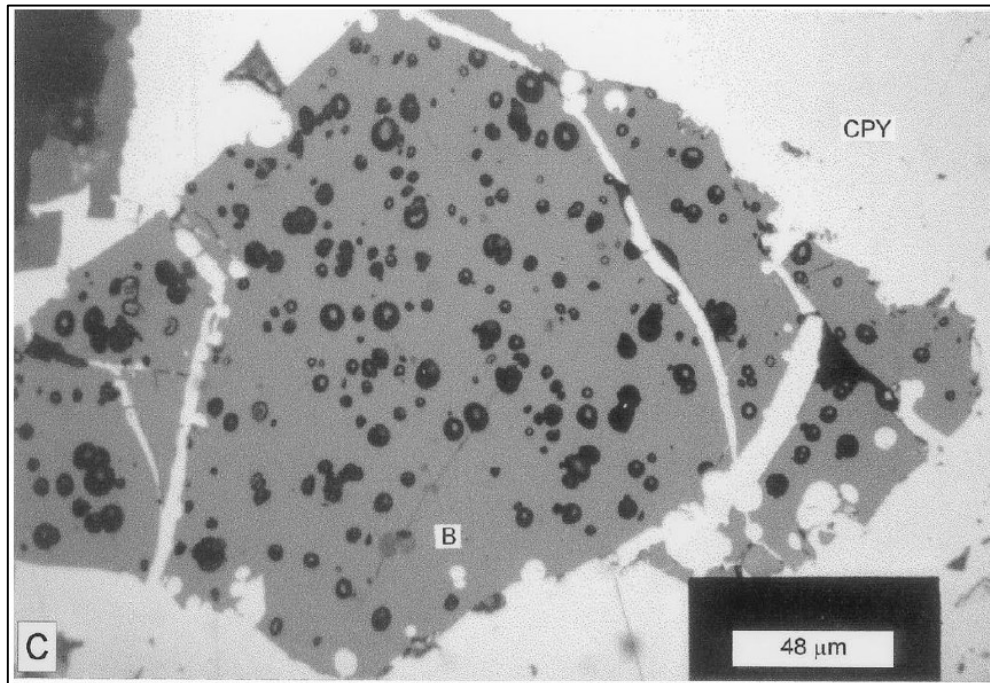
- Aquellos bitúmenes producidos por fraccionamiento físico, similar a una destilación. Corresponde a la secuencia fuente → gilsonita → breca (glance pitch) ~ grahamita. Son compuestos sólidos a temperatura ambiente. Pueden estar formando parte de infiltraciones, y a menudo aparecen integrados al crecimiento de las menas metálicas y otros minerales.
- Aquellos bitúmenes producidos por reacciones químicas de las moléculas que lo componen, con productos volátiles o de baja viscosidad. Corresponde a la secuencia fuente → wurtzilita → albertita. Pueden estar integrados a menas de baja temperatura.
- Impsonitas, también llamados pirobitúmenes: bitúmenes formados a partir de los compuestos de mayor viscosidad pertenecientes a uno de los dos grupos recién descritos (grahamita o albertita). Corresponden a una metamorfosis llevada a cabo a alta temperatura. Aparecen integrados con menas metálicas y otros minerales. La última etapa de la secuencia, la cata-impsonita, guarda semejanzas con el grafito

## 2.2 El bitumen y los yacimientos de cobre

Como ya se dijo en la sección 2.1, en muchos lugares se observa una íntima asociación entre los yacimientos metálicos y la presencia de materia orgánica (bitúmenes), especialmente cuando se trata de roca sedimentaria calcárea.

Hoy día se postula que la relación entre ambas componentes de la materia no sería casualidad. Es más, se piensa que muchos yacimientos de cobre se formaron gracias a la presencia de materia orgánica en la roca caja., aunque esta hipótesis aún no ha sido universalmente aceptada.

Es posible establecer el orden en que se producen la formación de los depósitos. Por ejemplo, al observar microfotografías, es posible reconocer como algunos cristales han crecido en los espacios disponibles dejados por los elementos más antiguos. Esto es un indicador del orden de llegada de los elementos (ver Figura 3). Esto permite a los investigadores establecer una secuencia de llegada (ver Figura 4).



**Figura 3: Microfotografía con luz reflejada, escala indicada. Partícula de pirobitúmenes (B) rodeada por calcopirita (CPY). La calcopirita rellena algunas cavidades y cortes del bitumen, mostrando que la solidificación de este ocurrió antes de la llegada de los sulfuros de cobre [27]**

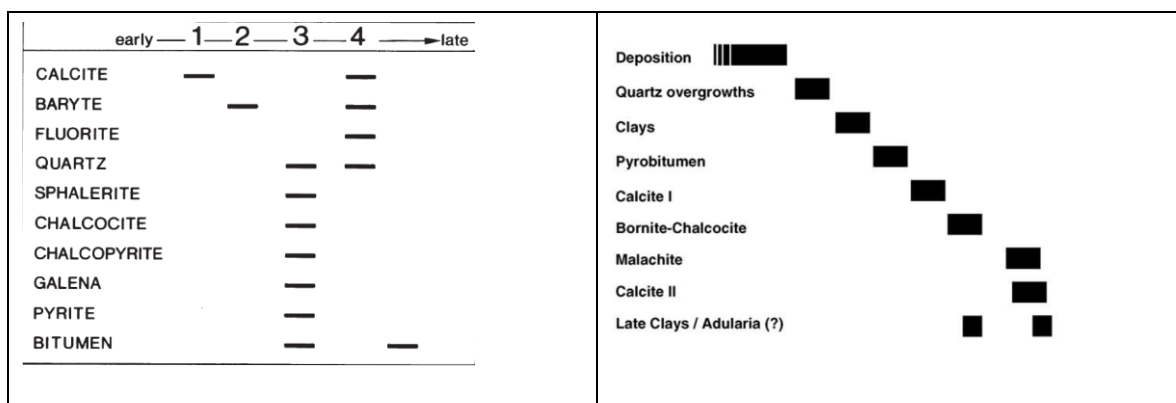


Figura 4: Secuencias paragénicas en Navarana Fjord, Groenlandia [19] y en Distrito Uchuni, IV Región, Chile [28]

Algunos de los indicadores que llevan a pensar que los depósitos de bitumen tienen una importante participación en la formación de algunos yacimientos metálicos son los siguientes:

- El material orgánico es una fuente de azufre. A medida que el material orgánico se va degradando, se liberan gases como  $H_2S$  y  $CH_4$ , generando un ambiente reductor que permitiría la precipitación de los sulfatos en la forma de sulfuros.[29]
- Las reacciones exotérmicas asociadas a la materia orgánica, tales como descomposición y oxidación, podrían haber proporcionado la energía requerida para la mineralización [29]
- En algunos casos se ha observado que al comparar la concentración de azufre en el material orgánico, esta es menor cerca de los yacimientos metálicos que en el material orgánico cercano que se formó al mismo tiempo [19].
- Un indicador semejante al ADN es la razón isotópica del azufre,  $\delta^{34}S$ . Este indicador permite establecer si dos minerales se formaron a partir de una misma fuente de azufre. En algunos yacimientos metálicos se ha encontrado que el valor del  $\delta^{34}S$  es el mismo para la mena y para el bitumen que la acompaña, a pesar de haberse establecido que la llegada del elemento metálico ocurrió en una edad posterior a la formación del bitumen [19]

### 2.3 El bitumen en yacimientos de Chile

En una franja de dirección norte-sur, que corresponde aproximadamente a la cordillera de la Costa de Chile entre la cuarta y la sexta regiones, se ubican una serie de depósitos de cobre de origen hidrotermal. Estos depósitos, de menor tamaño que los pórfidos, comparten algunas características comunes, siendo las más relevantes las siguientes [3]:

- Son yacimientos del tipo manto, estrato-ligados.
- La mineralización está ubicada sobre una roca huésped compuesta por capas intercaladas de material sedimentario marino y lava. (ver
- Figura 5).
- Se originaron en un período de tiempo relativamente estrecho: desde el Jurásico hasta el Cretácico inferior.
- Las rocas sedimentarias corresponde a carbonatos de origen marino y areniscas de origen ígneo.
- Se observa la presencia de intrusivos granitoides, con datación entre el Cretácico inferior y el superior. La roca huésped experimentó un metamorfismo regional de bajo grado.
- Sobre este conjunto, se ubica una capa de roca ígnea más reciente.

- Se observa la presencia de contenidos de carbono orgánico en la roca huésped, en la forma de pirobitumen, aunque hay quien postula que una fracción del carbono orgánico podría estar presente como grafito [6].
- Se observa la presencia de diques de andesita, posteriores a la mineralización.
- Los principales minerales de cobre son la calcopirita y la bornita, con alguna presencia de calcosina.

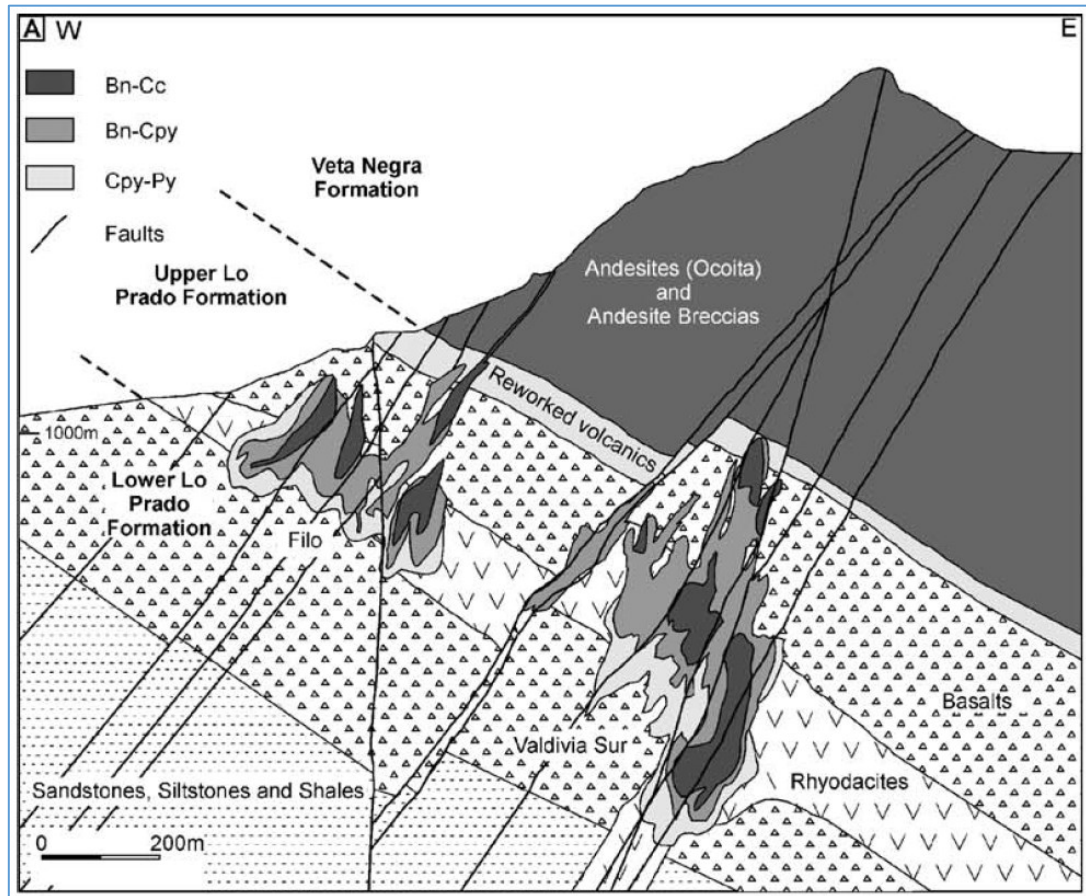


Figura 5: Esquema simplificado de El Soldado [26]

El yacimiento más grande de esta zona, con más de 200 Mt y una ley de 1,34% de cobre [3], es El Soldado (lat. 32°38,8' S, long 71°06,7' W). Por su importancia, ha sido el más estudiado. El yacimiento El Soldado está albergado en la Formación Lo Prado, donde están los depósitos mineralizados. Estos depósitos se ubican cerca de los intrusivos, aunque estos intrusivos carecen de mineral (eso sí, algunos presentan una post mineralización). Esto hace pensar que la formación de los sulfuros primarios ocurrió poco después de la llegada del intrusivo volcánico.

Otros centros mineros relevantes son Talcuna, Uchuni (ambos en las cercanías de La Serena, IV Región), Cerro Negro, Cabildo (V Región), Lo Aguirre y Naltahua, (Región Metropolitana). Naltahua, cercano a Melipilla, fue un importante centro minero durante la primera mitad del siglo XX [13]. Ver Figura 6.

Los modelos geológicos más recientes postulan que la mineralización con cobre se produjo gracias a la presencia del carbono orgánico. Las soluciones hidrotermales, al moverse a través de las rocas

ya descritas, se encontraron con un ambiente reductor propiciado por los hidrocarburos, que potenció la precipitación de sulfuros de elementos metálicos. Se han propuesto dos mecanismos para explicar este hecho [3]:

- Un evento de dos etapas, donde el pirobitumen penetró en la roca ígnea y se produjo la precipitación de pirita framboidal formada por la reducción bacteriana de sulfato. En una segunda etapa, después de un tiempo significativo, y facilitado por el ambiente reductor provisto por el hidrocarburo que fue alterado, precipitó el cobre de soluciones hidrotermales, reemplazando a la pirita. [27]. Esto estaría presente en el sector sur de la franja (El Soldado y Naltahua). Ver Figura 7.
- Un evento de una etapa, sin precipitación de pirita, y que se daría más en la zona de Talcuna y Uchuni. El cobre de las soluciones hidrotermales precipitaría en la presencia de  $H_2S$  generado por la reducción de sulfato por parte de bacterias en la roca caja.

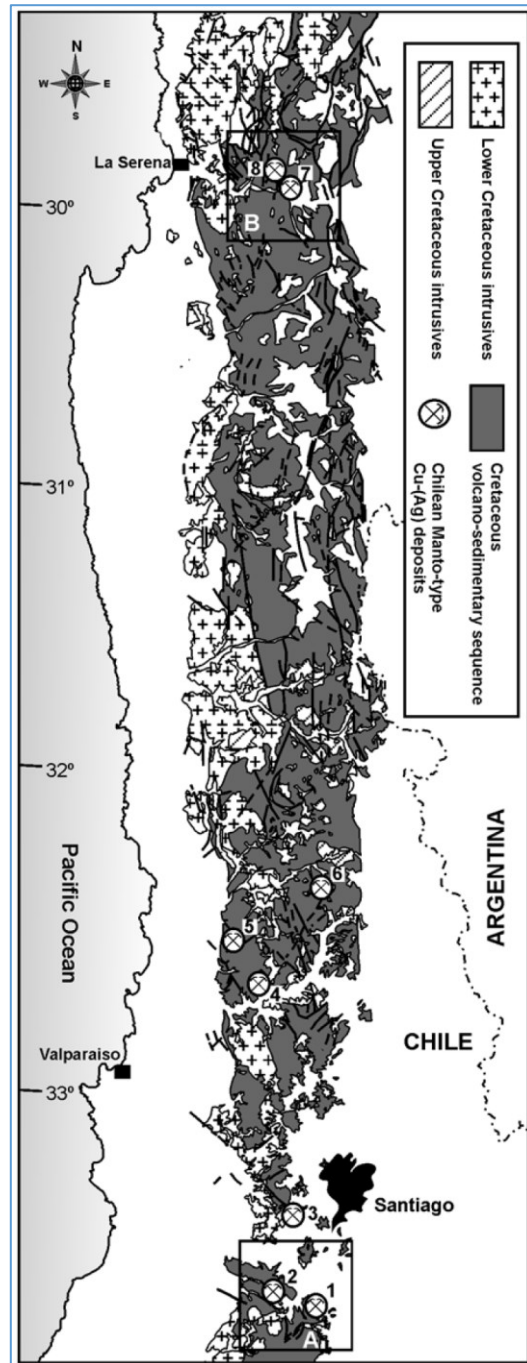
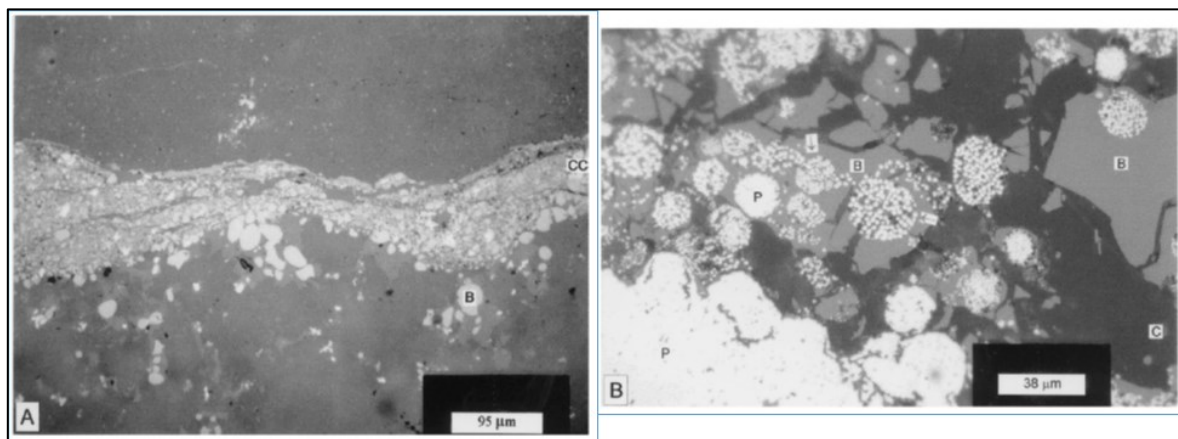


Figura 6: Mapa geológico simplificado, mostrando algunos centros mineros de la Cordillera de la Costa centro norte y centro de Chile: 1: Naltahua, 2: Melipilla, 3: Lo Aguirre, 4: El Salado, 5: El Soldado, 6: Cerro Negro, 7: Uchumi, 8: Talcuna [3]

En ambos casos, las baterías presentes en la roca caja se habrían potenciado con las soluciones hidrotermales y se habrían alimentado de los hidrocarburos y sulfatos presentes. En ambos casos, la mineralización se produjo durante el Cretácico inferior.



No existe una explicación clara sobre el origen del azufre que se combinó con el cobre, aunque se piensa estaría asociado a los intrusivos, dado el relativamente alto contenido de este elemento que presentan. En los yacimientos del norte, se estima que el azufre se habría originado a partir de sulfato evaporítico continental.



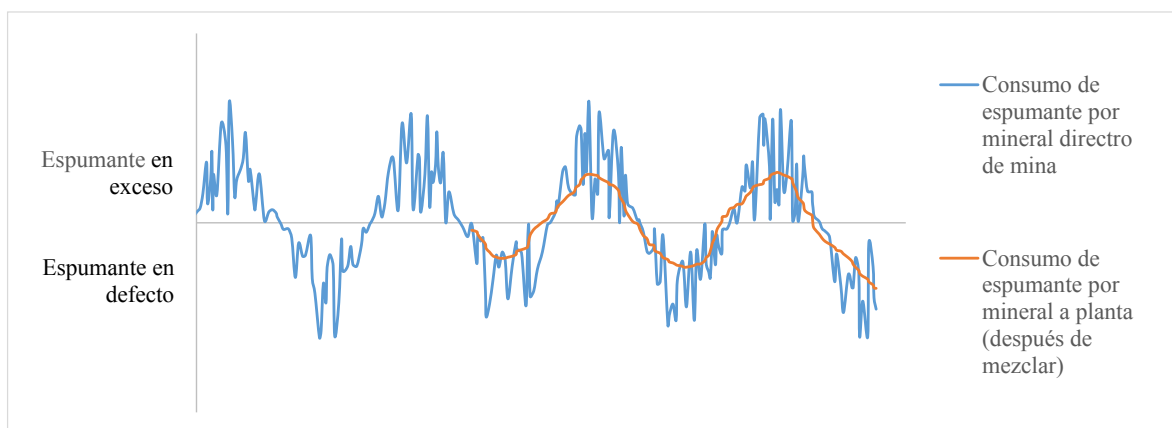
**Figura 7: Microfotografías a muestras de El Soldado, ambas con luz reflejada. (A) Vetilla de pirobitumen asociada a trazas de calcopirita. (B) Pirita framboidal dentro de pirobitumen [27]**

## **2.4 Flotación de minerales de cobre bituminoso**

La presencia de carbono orgánico asociado con minerales de cobre sulfurado genera dificultades para la recuperación metalúrgica de estas especies mediante flotación. El material de origen orgánico interactúa con los reactivos utilizados, especialmente con el espumante.

Aunque no se ha descrito bien el mecanismo como ocurre, el efecto visible es que el carbono orgánico altera la estabilidad de la espuma. Experiencias a nivel de laboratorio desarrolladas por Minera Las Cenizas (Planta Cabildo) demostraron la necesidad de utilizar dosificaciones de espumante más altas que la requerida por minerales de bajo o nulo contenido de carbono orgánico para poder mantener la estabilidad de la espuma. Los resultados metalúrgicos de la flotación en la planta dan cuenta de este diferente comportamiento (ver Tabla 1) [20][21].

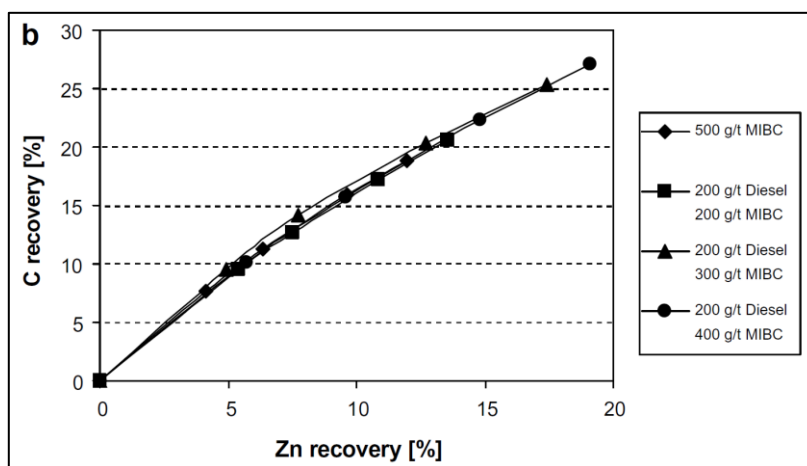
A nivel industrial, cuando en la década pasada se comenzó a tratar estos minerales, se observó que la espuma de las celdas en ocasiones se desvanecía, secuencialmente desde la primera hacia la última celda. Los operadores, tratando de volver a formar la espuma, llegaban incluso a arrojar baldes de espumante dentro de las celdas. Este fenómeno se logró explicar por la variabilidad que presentaría el carbono orgánico presente en el mineral: al ser heterogénea su distribución, no existe una dosis única que asegure la estabilidad de la espuma. Cuando el mineral fresco alimentado requería mayor cantidad de espumante que la alimentada para lograr una espuma estable, esta última se desvanecía. Por ello, se incorporó dentro de la operación como procedimiento habitual el mezclar el mineral recibido de la mina antes que entrar a la molienda. De este modo, se conseguía que el contenido de carbono orgánico fuera más uniforme (ver Figura 8). Junto con ello, se definió que el operador agregara siempre espumante en exceso, aunque esto afectara la operación aguas abajo. Estas instrucciones se mantienen hasta el día de hoy.



**Figura 8: Efecto de mezclar mineral previo a la molienda en el requerimiento de espumante (simulación)**

Problemas similares se han reportado con minerales de otros yacimientos de Chile. Y en otros países también se observa el mismo problema ocasionado por la presencia de carbono orgánico. Un par de ejemplos se presentan a continuación.

En Century Mine, uno de los mayores depósitos de plomo y zinc de Australia [11] se ha intentado una pre-flotación del material orgánico presente en el mineral. Esta pre-flotación consiste en una flotación previa a la flotación de galena, sin agregar colector, aunque sí espumante. Han logrado una baja extracción del carbono y una mala selectividad del zinc (ver Figura 9), con un consumo alto de espumante (200 a 1000 g/t de MIBC). Pruebas a nivel de laboratorio han mostrado que la adición de diésel reduce el consumo de MIBC (en un 50%), y que el uso de polipropileno glicol (PPG 192) produce espumas más estables. Sin embargo, no logran mejorar la separación entre el carbono y el zinc. Los investigadores de Century han postulado que el carbono orgánico estaría presente en la forma de grafito, y declaran que solo la fracción de menor tamaño (menor a 12  $\mu\text{m}$ ) se estaría recuperando en la pre-flotación.



**Figura 9: Recuperación de carbono orgánico versus recuperación de zinc en Century Mine, Australia [11]**

En Polonia, un grupo de investigadores, liderado por Chmielewski y Luszczkiewicz, han estudiado el efecto del carbono orgánico en las plantas concentradoras de Polkowice y Lubin, propiedad de KGHM Polska Miedz. Estas operaciones son alimentadas con sulfuros de cobre contenidos en una roca sedimentaria de carbonatos de calcio y magnesio llamada esquisto negro (black shale), la que contiene carbono orgánico. Allá, al igual que en Minera Las Cenizas, se ha observado que el

comportamiento del mineral es significativamente diferente al comparar los resultados de la flotación en menas con diferente contenido de carbono orgánico. Para el caso del concentrador Lubin, los resultados recientemente reportados muestran recuperaciones de 86% del cobre total y con leyes de concentrado de 14% [4].

Los investigadores polacos han estudiado una lixiviación de la fracción más pobre del concentrado primario y otros concentrados intermedios utilizando ácido sulfúrico. Con ello, disuelven carbonatos, liberando (y limpiando) las partículas mineralizadas con cobre (ver Figura 10).

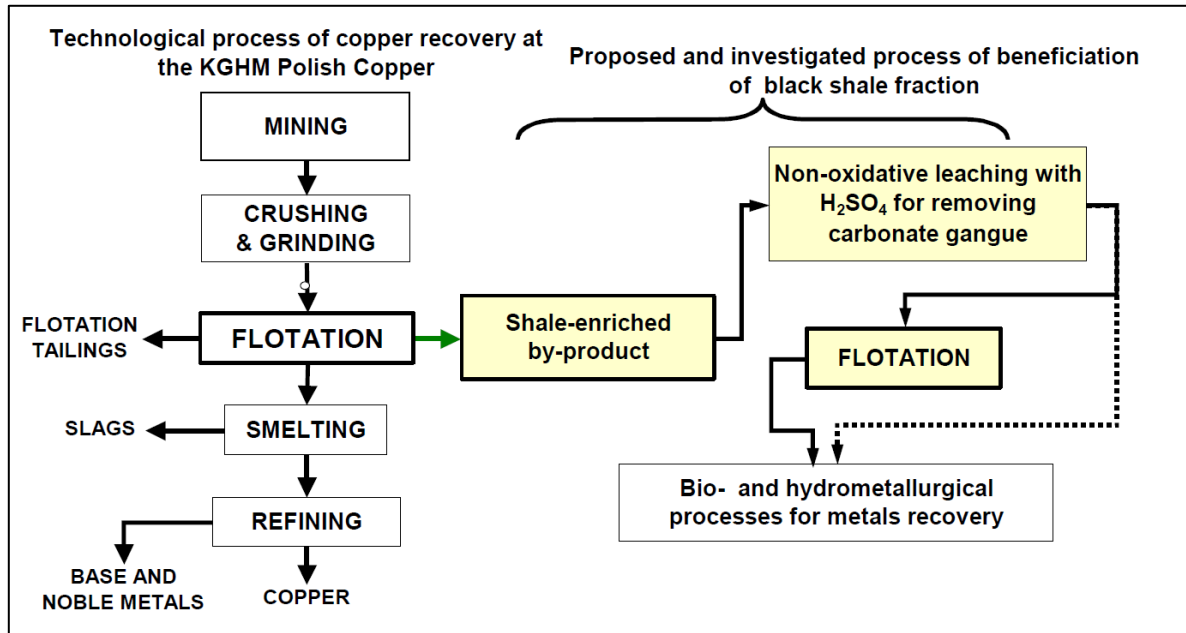
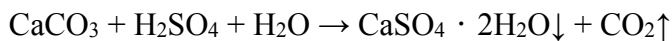


Figura 10: Esquema propuesto para proceso BIOSHALE en concentrador Lubin, Polonia [4]

Este proceso, llamado BIOSHALE, tiene consumos de ácido sulfúrico altos, entre 200 a 400 kg/t de material lixiviado [4], explicado por la presencia de los carbonatos, que se disuelven:



## 2.5 Arenas bituminosas y obtención de petróleo

Hoy día, las fuentes principales para la obtención de petróleo es a partir de la explotación de yacimientos petroleros (Rusia y Arabia Saudí son los principales productores[17], y Venezuela tiene las mayores reservas[16]). En segundo lugar como fuente de petróleo se ubica la explotación de yacimientos con arenas bituminosas.

Uno de los mayores productores de petróleo a partir de arenas bituminosas es Canadá. Las mayores reservas de este país se encuentran en la provincia de Alberta, donde destaca el valle del río Athabasca, lugar donde se comenzó a explotar por primera vez este recurso ([2], ver Figura 11).

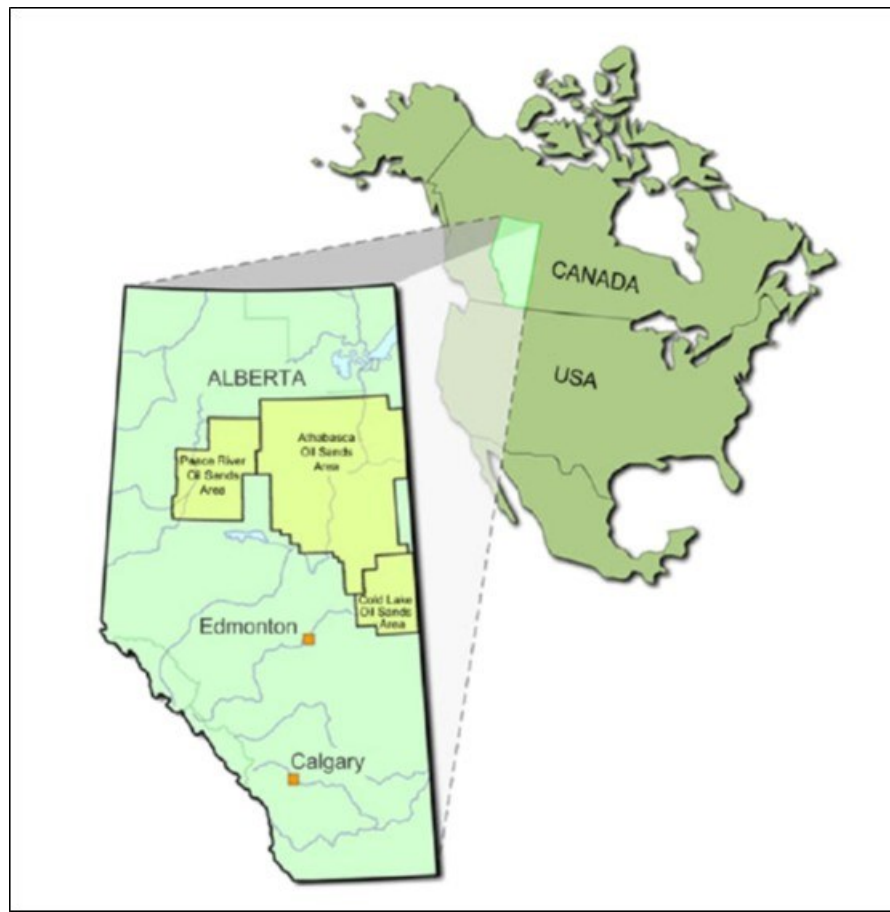


Figura 11: Ubicación de arenas bituminosas en Alberta, Canadá [1]

La primera patente que permitió la obtención de bitumen a partir de las arenas bituminosas fue solicitada por Karl A. Clark, de la Universidad de Alberta, en 1929[7]. El método consistía en alimentar las arenas a un depósito agitado conteniendo agua a una temperatura entre 75 y 100 °C, y al que previamente se había adicionado una base fuerte. Dentro del depósito, se hacía burbujear aire. El bitumen se separaba de las arenas y subía hacia la superficie debido a su hidrofobicidad natural. Se conseguía así una emulsión de bitumen y agua como producto. Las arenas con bajo contenido de bitumen quedaban en el fondo del depósito, y se descartaban. En una siguiente etapa, el bitumen se purificaba extrayendo el agua, y luego se procesaba para conseguir un producto comercial.

Esta patente se implementó por primera vez a nivel industrial en una planta demostrativa que mandó construir el gobierno de Alberta, en 1948. Esta planta operó dos años, y fue suficiente para convencer a las principales empresas petroleras de la factibilidad de explotar las grandes reservas de bitumen de la región, operación que continua hasta el día de hoy.

Hoy se extrae bitumen desde este tipo de yacimientos en Canadá y Estados Unidos. Son depósitos de material no consolidado que se ubica cerca de la superficie, por lo que se trabajan como rajos (open pit). El contenido de bitumen para hacer rentable la operación se ubica usualmente en el rango 5 a 20%. En el pasado se utilizaron dragas, rotopalas y correas transportadoras, las que han

sido reemplazadas por palas y camiones debido a su mayor flexibilidad y menor costo (ver Figura 12).

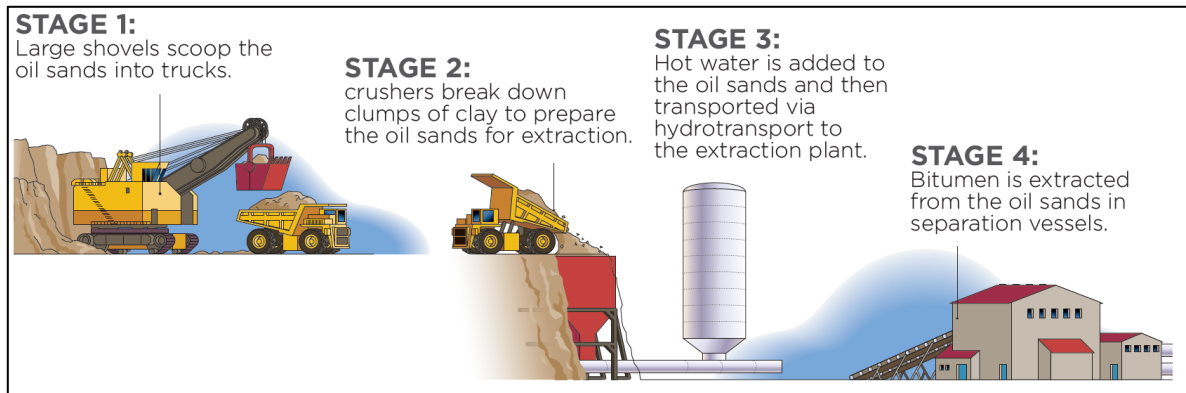


Figura 12: Explotación de arenas bituminosas como rajo (open pit) [1]

Hay operaciones in situ, donde el agua se inyecta al yacimiento. Esta tecnología se aplica cuando las reservas de bitumen están más profundas, y es la más utilizada en los yacimientos de Utah, EE.UU. El agua se inyecta a presión en pozos, y se recupera junto con el bitumen (ver Figura 13). Para aplicarla, es necesario que el yacimiento tenga una porosidad adecuada. La eficiencia del proceso se mejora si el agua se aplica en ciclos de alta y baja presión. Tiene las desventajas de requerir mayor consumo de energía y de lograr menores recuperaciones al comparar con las instalaciones donde las arenas se extraen y tratan.

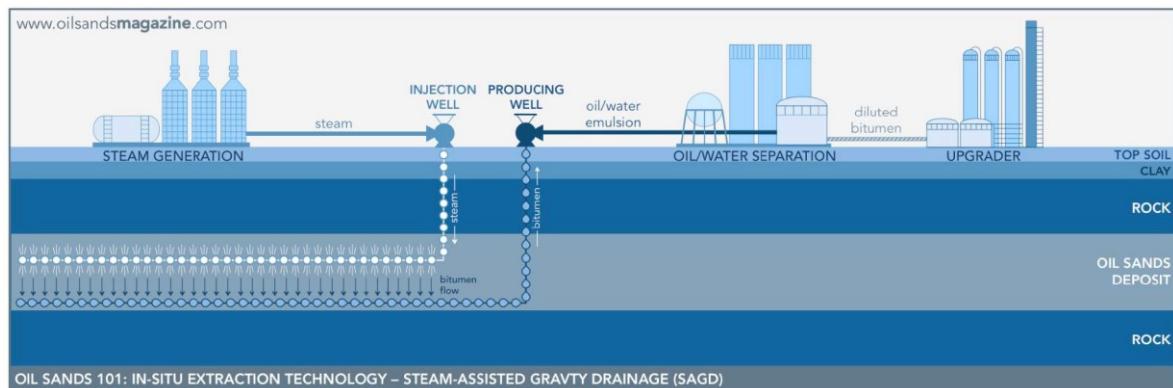


Figura 13: Esquema sistema de extracción de bitumen in situ [25]

Dado que la mayor parte de las reservas de bitumen está bajo los 75 m desde la superficie (93% del total en el caso de Athabasca [1]), se ha propuesto utilizar minería subterránea. Esto todavía no se ha implementado, principalmente por temores respecto a la estabilidad mecánica de las arenas. Es un desafío abierto.

El transporte hacia las instalaciones de separación se hace en forma hidráulica, mezclando la arena con agua caliente y soda cáustica. Se aprovecha el tiempo de residencia dentro de la tubería para realizar un preacondicionamiento de las arenas. El transporte hidráulico también permite la desagregación de la arena. Al ser un material no consolidado, no se requiere de conminución.

Luego del transporte y preflotación, el bitumen se separa de la arena utilizando diversas alternativas. Estas han modificado el método de Clark, aprovechando la preflotación que ocurre durante el transporte hidráulico.

Uno de los mayores desafíos que presenta esta industria tiene relación con los pasivos ambientales. Dado que no es económico retornar las arenas tratadas hacia los yacimientos de donde fueron extraídas, se requiere de depósitos para almacenarlas, similares a los tranques de relaves. Además, y aunque el 90% del agua se recicla [15] y se ha avanzado en mejorar esta eficiencia [14], una parte del agua no se puede reutilizar por su saturación en impurezas. La legislación define que el agua que ha contactado bitumen no se puede devolver a ríos y lagos por su contenido de hidrocarburos. Esto obliga a generar grandes depósitos de agua contaminada. En las cercanías del río Athabasca, a comienzos de la presente década estos depósitos cubrían una superficie superior a 130 km<sup>2</sup> [12]. Tampoco se puede olvidar riego de incendios: en mayo de 2016, un gigantesco incendio quemó unas 2.400 casas y más de 590 mil hectáreas de bosques. Fue declarado oficialmente extinto más de un año después, en septiembre de 2017.

### 3 PLANIFICACIÓN EXPERIMENTAL

El trabajo experimental permite validar la hipótesis que extraer el carbono orgánico del mineral mediante un preflotación con una base fuerte, utilizando técnicas propias de la industria de obtención de petróleo a partir de arenas bituminosas, tiene como efecto un aumento en la recuperación, mejora la ley del concentrado, y aumenta la cinética de la flotación de cobre.

El estudio considera la realización de pruebas a nivel de laboratorio, utilizando muestras de mineral bituminoso de cobre obtenido del yacimiento que Minera Las Cenizas posee en Cabildo, V Región.

Por razones de presupuesto, ya que esta tesis fue financiada por el tesista, la cantidad de pruebas se tuvo que acotar, al igual que la cantidad de análisis químicos. Esto deja abierta la posibilidad de realizar pruebas adicionales que optimicen los resultados encontrados.

Para la ejecución de las pruebas, se utilizaron equipos existentes en los laboratorios de Procesamiento de Minerales y de Pirometalurgia del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile.

En este capítulo se describe como se realizaron las pruebas experimentales que soportan la presente tesis y el equipamiento utilizado.

#### 3.1 Variables del sistema

Dado que las pruebas se realizaron utilizando mineral proporcionado por Minera Las Cenizas, se utilizaron condiciones similares a las que utiliza para la flotación de cobre en sus campañas experimentales y en su operación industrial:

- Granulometría a flotación: 80% bajo 150 mallas (106  $\mu\text{m}$ )
- Concentración de sólidos en flotación: 25%
- pH: natural
- Colector: AX-343 (70 g/t)
- Espumante: AF-70Plus (100 a 200 g/t)
- Tiempo acondicionamiento: 5 min
- Tiempo flotación: 25 min

Se realizaron prueba de flotación de cobre de minerales bituminosos sin la preflotación.

Luego, se realizaron pruebas de flotación de cobre después de un preflotación. La comparación entre los resultados obtenidos con o sin preflotación da cuenta del potencial que este puede representar para la industria.

Para este estudio, se seleccionaron las siguientes variables para conocer su efecto en la flotación de cobre:

- Base fuerte utilizada. Se consideró el uso de hidróxido de sodio (NaOH), y alternativamente el uso de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), ambos de calidad analítica. No se realizaron pruebas con cal vida, por no tener certeza de su calidad. Sin embargo, pruebas posteriores

a esta tesis mostraron que este reactivo entrega resultados similares a los expuestos en la presente tesis.

- Dosificación de espumante. Esta es una de las variables más importantes, pues el utilizar dosis muy altas de este reactivo es una de las estrategias utilizadas por Minera Las Cenizas y otras para el tratamiento de estos minerales. Se consideraron tres dosificaciones: 50, 100 y 200 g/t.

### 3.2 Preparación de la muestra de mineral

Se obtuvo de Minera Las Cenizas un total de 21 muestras, cada muestra compuesta por un único fragmento. Cada muestra fue identificada visualmente según su contenido de carbono orgánico. Las muestras se pesaron en una báscula mecánica. El detalle de las muestras recibidas se entrega en la Tabla 3:

**Tabla 3: Muestras recibidas de Minera Las Cenizas**

N° muestra	Tipo muestra	Lote	Fecha obtención	Identificación Lote	Patente camión	Peso muestra, kg
1	AC	5090	23-05-2016	7750 N780C 18235	GX CL 53	9.1
2	MC	5090	23-05-2016	7750 N780C 18235	HX JB 88	8
3	MC	5090	23-05-2016	7750 N780C 18235	HX JB 92	9
4	MC	5090	23-05-2016	7750 N780C 18235	GX CJ 56	5.5
5	BC	5090	23-05-2016	7750 N780C 18235	GX CJ 53	7
6	AC	5090	23-05-2016	7750 N780C 18235	HX JB 88	6.3
7	MC	5090	23-05-2016	7750 N780C 18235	CX CJ 56	5.4
8	MC	5096	24-05-2016	7750 N780C 18235	HX JB 88	8
9	MC	5096	24-05-2016	7750 N780C 18235	GX CJ 54	10.4



N° muestra	Tipo muestra	Lote	Fecha obtención	Identificación Lote	Patente camión	Peso muestra, kg
10	AC	5096	24-05-2016	7750 N780C 18235	HX JB 92	6.1
11	BC	5096	24-05-2016	7750 N780C 18235	DK FZ 52	7.1
12	AC	5096	24-05-2016	7750 N780C 18235	GX CJ 56	10.2
13	BC	5096	24-05-2016	7750 N780C 18235	GX CJ 54	12.2
14	MC	5096	24-05-2016	7750 N780C 18235	HX JB 92	7.7
15	AC	5099	25-05-2016	7750 N780C 18235	HX JB 93	6.3
16	MC	5099	25-05-2016	7750 N780C 18235	CX CJ 54	6
17	MC	5099	25-05-2016	7750 N780C 18235	HX JB 88	7.5
18	MC	5099	25-05-2016	7750 N780C 18235	GX CJ 56	8.4
19	MC	5099	25-05-2016	7750 N780C 18235	HX JB 92	8.6
20	AC	5099	25-05-2016	7750 N780C 18235	HX JB 93	6.6
21	MC	5099	25-05-2016	7750 N780C 18235	GX CJ 54	5.3

Nota: AC = muestra con contenido alto de carbono orgánico, MC = muestra con contenido medio de carbono orgánico, y BC = muestra con contenido bajo de carbono orgánico.

Las muestras N° 10 (alto en carbono) y 13 (bajo en carbono) se utilizaron para realizar experimentos de prueba, donde se validó la hipótesis que era posible obtener una mejora en la flotación de cobre. También se extrajo de estas muestras el corte para obtener pulidos que se estudiaron mediante análisis espectral en un equipo Hi-Logger. Ver sección 4.1.3.

Se optó por realizar pruebas con mineral del tipo AC (alto en carbono orgánico) y mineral del tipo BC (bajo en carbono orgánico), reservando las muestras MC (contenido medio de carbono orgánico) para futuros desarrollos experimentales.

Se consideraron las muestras N° 1 y 20 para formar una muestra con mineral alto en carbono orgánico. La muestra conjunta se denominó muestra AC.

Se consideraron las muestras N° 5 y 11 para formar una muestra con mineral bajo en carbono orgánico. La muestra conjunta se denominó muestra BC.



**Figura 14: Muestra N° 20 sobre balanza digital**

Se procedió a formar paquetes de 400 g con mineral bajo 10 mallas (2 mm), aptas para realizar las pruebas de molienda y flotación.

Primeramente, se pesaron los fragmentos en una balanza digital (ver Figura 14). Luego, utilizando un mazo o combo (ver Figura 15) se rompieron los fragmentos de mineral en trozos más pequeños, los que se colectaron y alimentaron un chancador de mandíbula (ver Figura 16).



**Figura 15: Mazo o combo utilizado para reducción de tamaño de muestras. Al fondo se ve el chancador de mandíbulas**



**Figura 16: Chancador de mandíbulas utilizado para la segunda reducción de tamaño.**

El mineral chancado se tamizó en seco en la malla 10 (2 mm). El sobretamaño se retornó al chancador de mandíbulas, y el producto se volvió a tamizar. Esto se repitió hasta que la cantidad

de mineral sobre la malla 10 era pequeña. Esta fracción sobretamaño de mineral se reservó y no se utilizó en las pruebas experimentales.

Luego, utilizando un carrusel de 10 compartimentos (ver Figura 17), se procedió a separar el mineral 100% bajo 10 mallas en paquetes de 400 g aproximadamente. Antes de eso, se utilizó el mismo carrusel para homogeneizar la muestra, separando y juntando el material acumulado en los compartimentos tres veces.

Con la fracción 100% bajo 10 mallas, se procedió a formar paquetes de aproximadamente 400 g utilizando el carrusel de 10 compartimentos. Se consideró razonable una diferencia menor a 5% entre el peso del paquete y los 400 g. Cuando esta diferencia era mayor, se utilizó un carrusel de 16 compartimentos (ver Figura 18) para separar una fracción ( $1/16$  ó  $2/16$ ), y así tener un peso más cercano a los 400 g definidos para realizar las moliendas.

Para la muestra formada a partir de las muestras N° 1 y 20 (mineral con alto contenido de carbono orgánico), resultó un total de 30 paquetes de unos 430 g cada uno. El detalle del peso de cada uno de los 30 paquetes que finalmente se obtuvo se muestra en la Tabla 4:

**Tabla 4: Paquetes formados a partir de muestras N° 1 y 20 (ambas AC)**

Identificación paquete	Peso húmedo [g]	Fracción a retirar para conseguir ~400 g	Peso húmedo después de retirar fracción [g]	Dif % sobre 400 g
AC-1	417,8	1/16	391,7	2.1%
AC-2	420,6	1/16	394,3	1.4%
AC-3	426,8	1/16	400,1	0.0%
AC-4	433,8	1/16	406,7	-1.7%
AC-5	423,3	1/16	396,9	0.8%
AC-6	420,4	1/16	394,1	1.5%
AC-7	424,3	1/16	397,8	0.5%
AC-8	426,2	1/16	399,6	0.1%
AC-9	424,6	1/16	398,1	0.5%
AC-10	444,7	2/16	389,1	2.7%
AC-11	424,4	1/16	397,9	0.5%

Identificación paquete	Peso húmedo [g]	Fracción a retirar para conseguir ~400 g	Peso húmedo después de retirar fracción [g]	Dif % sobre 400 g
AC-12	451,4	2/16	395,0	1.3%
AC-13	428,7	1/16	401,9	-0.5%
AC-14	438,2	1/16	410,8	-2.7%
AC-15	426,4	1/16	399,8	0.1%
AC-16	422,6	1/16	396,2	0.9%
AC-17	433,5	1/16	406,4	-1.6%
AC-18	448,1	2/16	392,1	2.0%
AC-19	430,6	1/16	403,7	-0.9%
AC-20	429,7	1/16	402,9	-0.7%
AC-21	428,4	1/16	401,6	-0.4%
AC-22	430,3	1/16	403,4	-0.9%
AC-23	417,3	1/16	391,2	2.2%
AC-24	407,6	-	407,6	-1.9%
AC-25	404,9	1/16	379,6	-1.2%
AC-26	417,6	1/16	391,5	2.1%
AC-27	423,8	1/16	397,3	0.7%
AC-28	417,1	1/16	391,1	2.2%
AC-29	418,8	1/16	392,6	1.8%
AC-30	426,7	1/16	400,1	0.0%



**Figura 17: Carrusel de 10 compartimentos, utilizado para formar los paquetes de mineral para cada prueba.**



**Figura 18: Carrusel de 16 compartimentos, para muestras de menores a 500 g.**

Para la muestra formada a partir de las muestras N° 5 y 11 (mineral con bajo contenido de carbono orgánico), resultó un total de 20 paquetes de unos 400 g cada uno. El detalle del peso de cada uno de los 20 paquetes que finalmente se obtuvo se muestra en la Tabla 5:

**Tabla 5: Paquetes formados a partir de muestras N° 5 y 11**

Identificación paquete	Peso húmedo [g]	Dif % sobre 400 g
BC-1	410.42	-2.6%
BC-2	406.12	-1.5%
BC-3	394.92	1.3%
BC-4	402.82	-0.7%
BC-5	394.52	1.4%
BC-6	401.92	-0.5%
BC-7	403.12	-0.8%
BC-8	394.82	1.3%
BC-9	396.12	1.0%
BC-10	393.52	1.6%
BC-11	410.12	-2.5%
BC-12	399.72	0.1%
BC-13	395.52	1.1%
BC-14	392.82	1.8%
BC-15	397.72	0.6%
BC-16	406.32	-1.6%
BC-17	387.02	3.2%
BC-18	388.42	2.9%
BC-19	395.12	1.2%
BC-20	408.42	-2.1%

Se comenzó el programa de pruebas de cada una de las dos muestras (AC y BC). Sin embargo, tras realizar varias pruebas, se conocieron los análisis químicos de las cabezas. Resultó que el contenido de cobre de la muestra AC era extremadamente bajo (0,0185 %), lo que restaba validez a los

resultados. Por ello, se congeló el plan para esta muestra y se procedió a preparar una nueva muestra de mineral con alto contenido de carbono orgánico. Esta muestra, que se denominó CC, se formó a partir de las muestras N° 6 y 15. La otra muestra disponible de mineral con alto contenido de carbono, la muestra N° 12, se reservó por su bajo contenido de cobre (0,032%.)

Se repitió para la muestra CC exactamente el mismo procedimiento para formar paquetes de aproximadamente 400 g ya descrito para las muestras AC y BC. Se formaron 25 paquetes, según se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6: Paquetes formados a partir de muestras N° 6 y 15**

Identificación paquete	Peso húmedo [g]	Dif. % sobre 400 g
CC-1	397.14	-0.7%
CC-2	395.84	-1.0%
CC-3	394.84	-1.3%
CC-4	422.34	5.6%
CC-5	389.14	-2.7%
CC-6	398.74	-0.3%
CC-7	402.94	0.7%
CC-8	406.64	1.7%
CC-9	424.64	6.2%
CC-10	387.24	-3.2%
CC-11	389.04	-2.7%
CC-12	391.44	-2.1%
CC-13	391.34	-2.2%
CC-14	388.04	-3.0%
CC-15	404.24	1.1%
CC-16	388.44	-2.9%
CC-17	388.24	-2.9%
CC-18	389.74	-2.6%



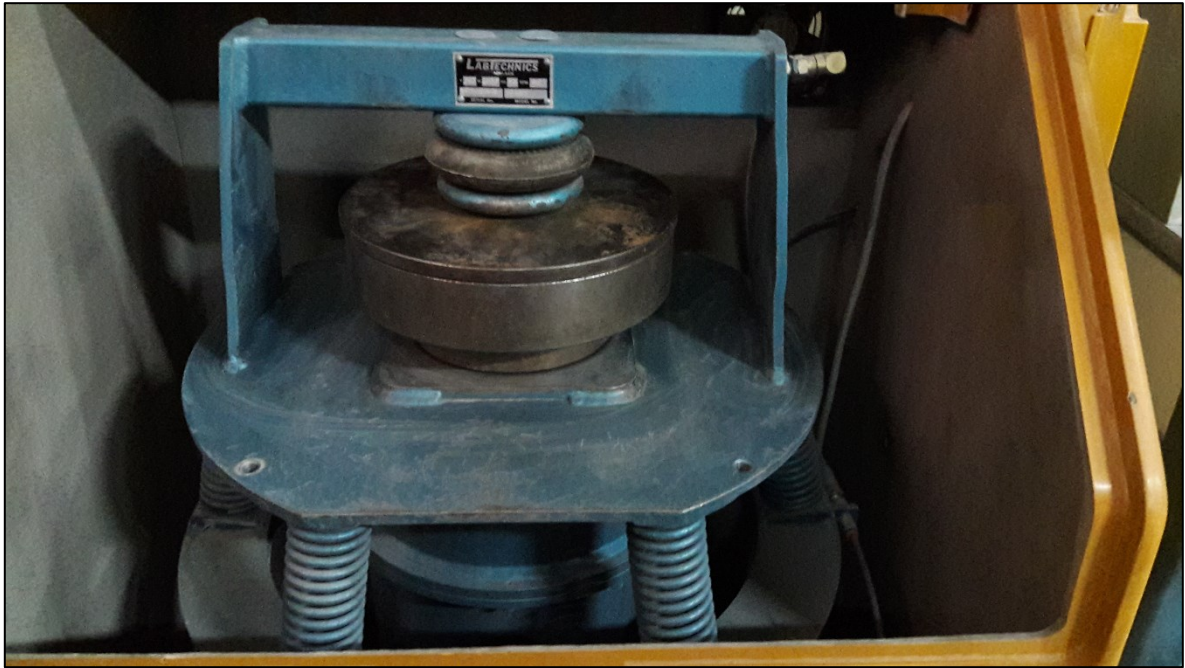
Identificación paquete	Peso húmedo [g]	Dif. % sobre 400 g
CC-19	390.84	-2.3%
CC-20	425.94	6.5%
CC-21	402.24	0.6%
CC-22	399.04	-0.2%
CC-23	394.64	-1.3%
CC-24	400.84	0.2%
CC-25	386.24	-3.4%

El detalle del procedimiento utilizado para la formación de los paquetes denominados AC, BC y CC se encuentra en el Anexo A.

### 3.3 Cinéticas de molienda

Se analizó la posibilidad de utilizar el molino de rodillos existente en el Laboratorio, pero se descartó pues el tamaño de los paquetes de mineral es pequeño (400 g aproximadamente), y se diluía la pulpas al vaciar y limpiar el molino. El volumen interno de este equipo es de casi 10 L.

Por esta razón, se utilizó el pulverizador vibratorio para conseguir la granulometría requerida por la flotación, similar a la utilizada por Minera Las Cenizas (80% bajo 140 mallas, 106  $\mu\text{m}$ ) (ver Figura 19).



**Figura 19: Pulverizador rotatorio**

El pulverizador cuenta con un timer, y dos interruptores que permiten ajustar su escala (ver Figura 20):

- Minutos o segundos
- 0 a 3 o 0 a 30



**Figura 20:** Panel de control del pulverizador. El botón verde corresponde al interruptor de partida. Al centro está el timer con dos interruptores: escala de 0 a 3 o de 0 a 30 (derecha arriba), y minutos o segundos (derecha abajo). En la parte inferior está el horómetro del equipo.

El primer interruptor se fijó en segundos, y el segundo fijó la escala del timer entre 0 y 30 segundos.

Se realizaron cinéticas a cada uno de los paquetes de mineral estudiados. Para tiempos mayores a 30 segundos, se realizaron moliendas de 30 segundos más el saldo del tiempo definido. El mineral molido se colectó del tambor del pulverizador utilizando una brocha, y luego se tamizó en húmedo. Se probó la alternativa de tamizar en seco, pero se descartó pues el mineral tiende a formar glómeros (ver Figura 21), a pesar de su bajo contenido de humedad (ver sección 4.1.5).



**Figura 21: Tamizaje en seco. Se observa la formación de glómeros, impidiendo una buena clasificación de las partículas finas**

Los resultados de las cinéticas de molienda se encuentran en el Anexo C.

Con el fin de obtener un producto 80% bajo 140 mallas, se seleccionó un tiempo de 60 segundos (dos veces 30 segundos en el pulverizador) para los paquetes AC.

Con el fin de obtener un producto 80% bajo 140 mallas, se seleccionó un tiempo de 60 segundos (dos veces 30 segundos en el pulverizador) para los paquetes BC.

Con el fin de obtener un producto 80% bajo 140 mallas, se seleccionó un tiempo de 74 segundos (dos veces 30 segundos más 14 segundos en el pulverizador) para los paquetes CC (ver Figura 22).

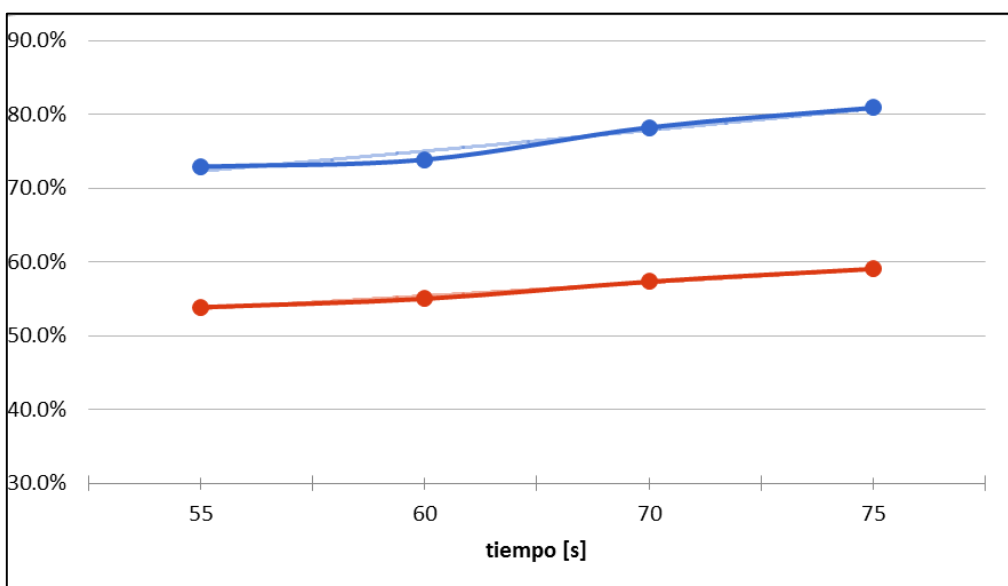


Figura 22: Cinética de molienda de paquetes CC. % pasante bajo 140 mallas (línea azul) y bajo 400m mallas (línea roja)

Los elementos utilizados en las pruebas de molienda fueron los siguientes:

- Una bandeja de acero inoxidable
- Una paleta de acero inoxidable
- Un pulverizador vibratorio
- Una brocha
- Un juego de tamices (mallas 65, 100, 140, 200, 270 y 400)
- Un lavatorio donde poder hacer el tamizaje en húmedo
- Tres baldes plásticos de 20 L, para el tamizaje en húmedo
- Un carrusel de 16 compartimientos
- Una balanza de precisión (5 kg  $\pm$  0,1 g)
- Bolsas plásticas
- Marcador indeleble (para rotular las bolsas)
- Aire comprimido para limpiar el polvo de los equipos y materiales

### 3.4 Pruebas de Preflotación y de Flotación de Cobre

Tanto las pruebas de preflotación o separación de carbono orgánico, así como de flotación de cobre se realizaron en una única celda de flotación Denver de 1 litro de capacidad, autoaspirante. La velocidad de rotación del impulsor se mantuvo constante en 1.700 rpm.

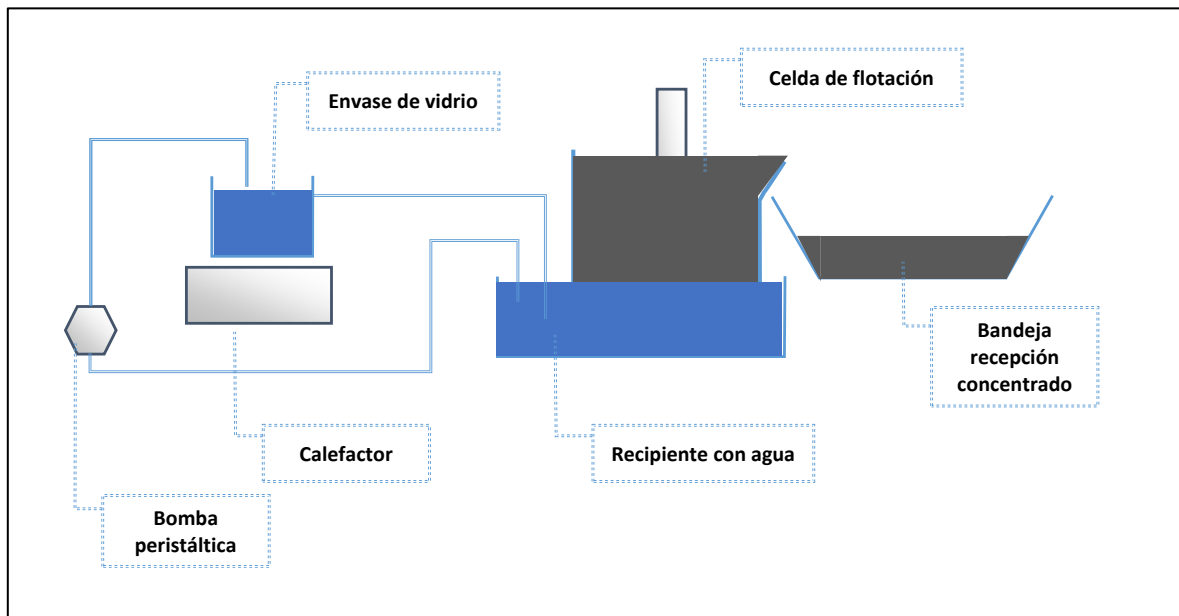
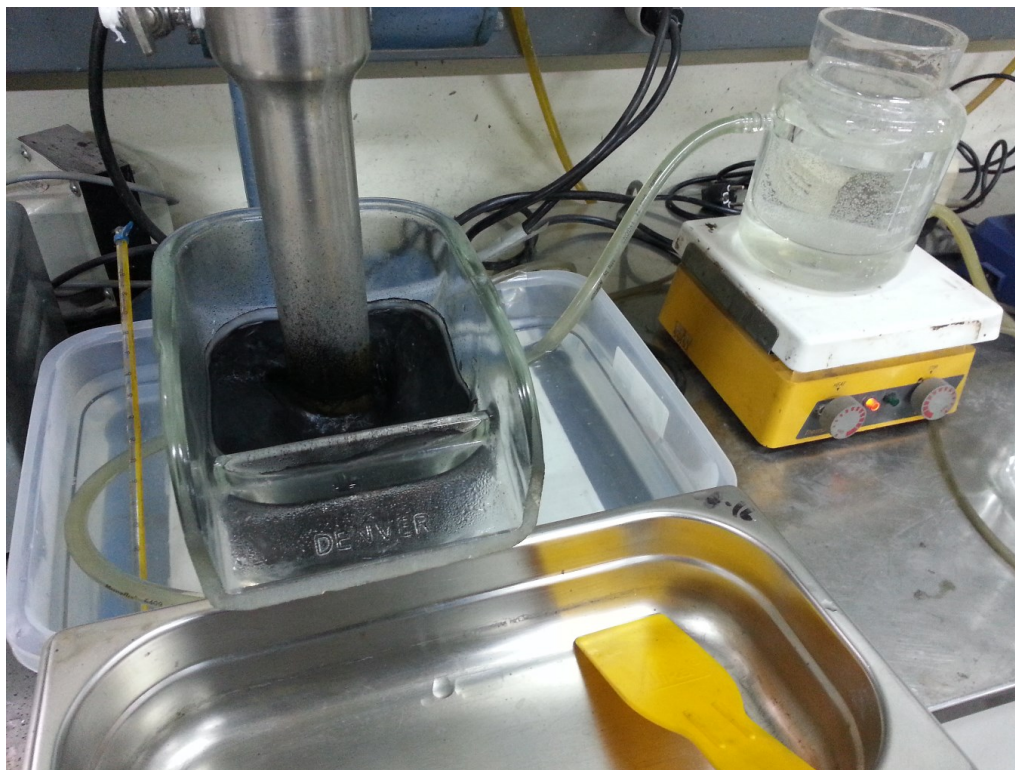


Figura 23: Esquema con arreglo de celda de flotación. Incluye sistema de recirculación de agua tibia.

Las pruebas de preflotación se realizaron con control de la temperatura de la pulpa. Para ello, la celda de flotación se colocó dentro de un recipiente con agua, la que estaba en un circuito cerrado con un calefactor y con recirculación mediante una bomba peristáltica (ver Figura 23 y Figura 24). El control de temperatura en el baño se hizo leyendo la temperatura en un termómetro sumergido

en el baño. Además, se leyó la temperatura de la pulpa al inicio y al final de cada prueba. Se verificó que esta temperatura estuviese en el rango 20 a 30°C, temperatura similar a la que se observa en la flotación industrial luego de la molienda.



**Figura 24: Vista del arreglo de celda de flotación y sistema de recirculación de agua tibia. Celda de flotación con pulpa**

Para las pruebas que consideraron preflotación, se agregó el mineral en la cantidad establecida, y luego se agregó agua corriente (tap water) hasta conseguir una concentración aproximada de 30% de sólidos. La cantidad de agua a agregar se estandarizó en 860 mL.

Dado que los paquetes formados fueron de aproximadamente 400 g, se descontó (1/16) del mineral molido previo al preflotación, para lo cual se utilizó el carrusel de 16 compartimientos mostrado en la Figura 18. En el caso de aquellas pruebas de flotación de cobre sin preflotación, se descontó (2/16) del paquete de 400 g.

Luego de agregar agua, se agregaba la base fuerte en la dosis establecida por el programa de pruebas, y se comenzaba a agitar la celda con la válvula de aire abierta. El tiempo de acondicionamiento de la preflotación se estableció en 30 minutos.

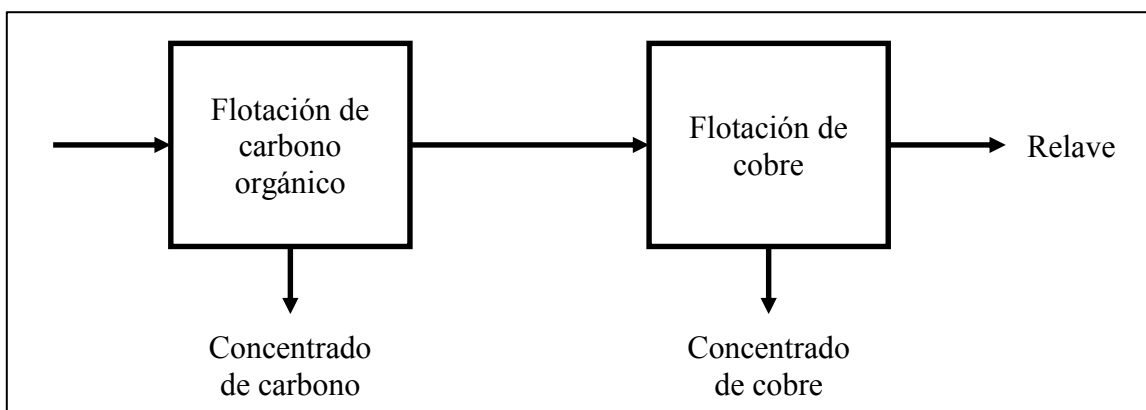
Tras el acondicionamiento de la preflotación, se procedió a separar el carbono orgánico, el cual es hidrófobo y sube a la superficie con la ayuda de las burbujas de aire. A medida que se fueron desarrollando las pruebas, se fue adquiriendo mayor habilidad en minimizar el arrastre de pulpa durante la extracción del carbono orgánico de la celda. En las primeras pruebas, el carbono orgánico se retiraba de la celda agregando agua, de modo que la celda rebosara. Luego se mejoró el proceso con la adición de un paleteo suave. En las últimas pruebas, el control del nivel de la celda fue una combinación de adición de agua, de paleteo, y de regular el nivel sumergiendo parcialmente envases plásticos en la celda (los que se iban llenando con agua, ver Figura 25). Esto producía zonas muertas en la superficie, que se limpiaban con un chorrito de agua, pero tuvo la ventaja de

permitir la minimización de los derrames de pulpa hacia la bandeja colectora de concentrado cuando se cerraba la válvula de aire, en la etapa de acondicionamiento de la flotación de cobre.



**Figura 25: Celda de flotación durante preflotación, mostrando un envase de plástico semi-sumergido con el fin que la celda rebose y evacúe el carbono orgánico.**

Las flotaciones de cobre se realizaron con las colas de la preflotación en la misma celda de flotación (ver Figura 26). Una vez terminada la preflotación, se reemplazaba la bandeja colectora de concentrado y se cerraba la válvula de alimentación del aire a la celda. Luego, se agregaban los reactivos de flotación (espumante y colector) en las dosis establecidas por el programa. Tras el tiempo de acondicionamiento (5 minutos), se procedía a efectuar la flotación de cobre. La flotación de cobre se realizaba sin control de la temperatura, permitiendo que la celda se enfriara. Se procedía a iniciar el cronómetro y se abría la válvula de aire para permitir la formación de espuma.



**Figura 26: Procedimiento para pruebas con preflotación y flotación de cobre**

Hubo algunas pruebas programadas donde no se produjo una espuma estable. Estas pruebas se cancelaron sobre la marcha y se adecuaron a la prueba siguiente adicionando mayor cantidad de espumante. Se asignó un tiempo de acondicionamiento adicional de 3 minutos.

Todas las pruebas de flotación de cobre, tanto las que consideraban preflotación como las que no, se dividieron en tres etapas. En cada etapa se procedía a reemplazar la bandeja colectora de concentrado. Las etapas consideradas fueron las siguientes:

- 0 a 5 minutos
- 5 a 15 minutos
- 15 a 30 minutos

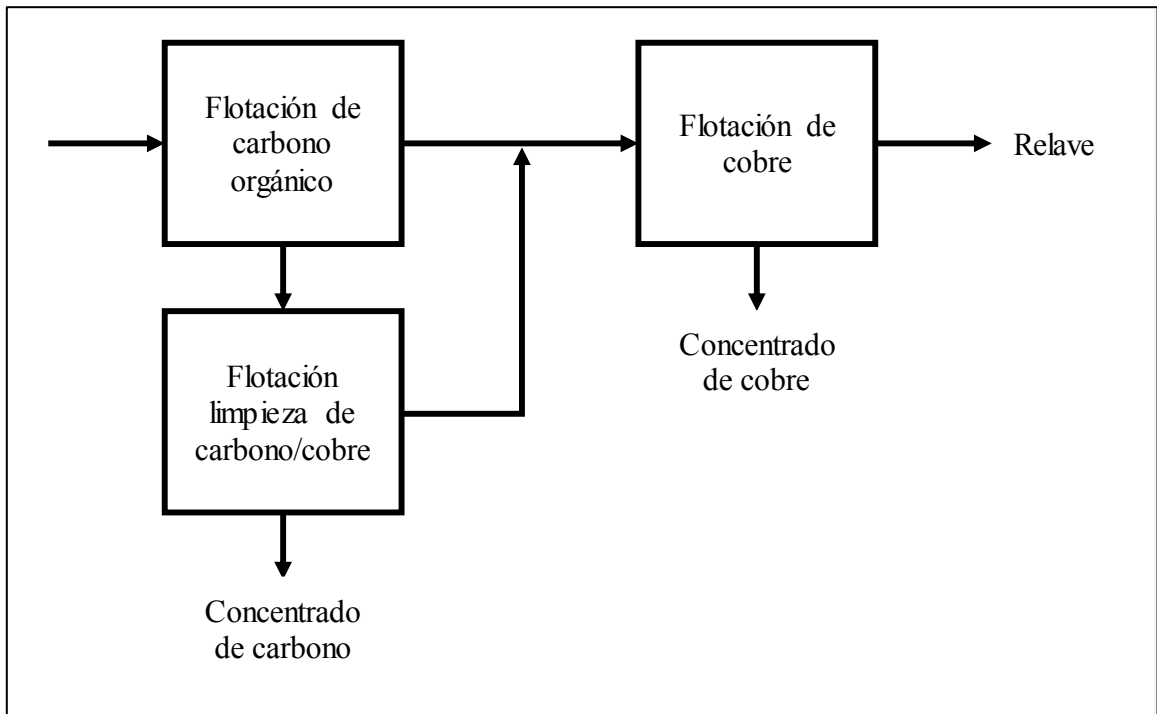
Al final de la flotación de cobre se procedía a vaciar el contenido de la celda en un filtro de vacío. Para asegurar que se limpiara bien la celda, esta se llenaba con agua y agitaba con el mecanismo y con burbujeo durante algunos segundos para volver a vaciar su contenido en el filtro. Este procedimiento de limpieza se realizaba dos veces.

Una vez filtrada la cola de la flotación, se colocaba con el papel en una bandeja. Las bandejas de concentrado de la preflotación, de concentrado de la flotación de cobre y de la cola se llevaban hasta una estufa con temperatura controlada (80 °C), donde se dejaban secar.

Una vez secas las bandejas, se pesaban y restaba el peso de las bandejas limpias para saber el peso de material contenido. Luego se limpiaban con la ayuda de una espátula y una brocha para su envase en bolsas plásticas previamente rotuladas, antes de llevar las muestras a análisis químico. En el caso de las colas, se limpiaba el papel filtro con ayuda de una brocha. Se dispuso de tres brochas, según el contenido de carbono orgánico y de cobre del material a remover.

Hacia el final del programa, se realizaron algunas pruebas donde el concentrado de la preflotación se volvía a flotar en una etapa de limpieza. Las colas de esta limpieza se retornaron a la celda Denver para unir las con el contenido de esta celda y proceder al acondicionamiento y flotación de cobre (ver Figura 27). El concentrado de esta limpieza se puede considerar un concentrado de carbono orgánico con menor contenido de pulpa mineral.





**Figura 27: Procedimiento para pruebas que incorporan limpieza del concentrado de la preflotación**

Para realizar la flotación limpieza, se utilizó una celda de flotación de 0,5 L (ver Figura 28). La celda se operó a 40 rpm, con una presión de aire de 0,4 bar. Se consideró un tiempo de flotación de 15 minutos, sin acondicionamiento previo.

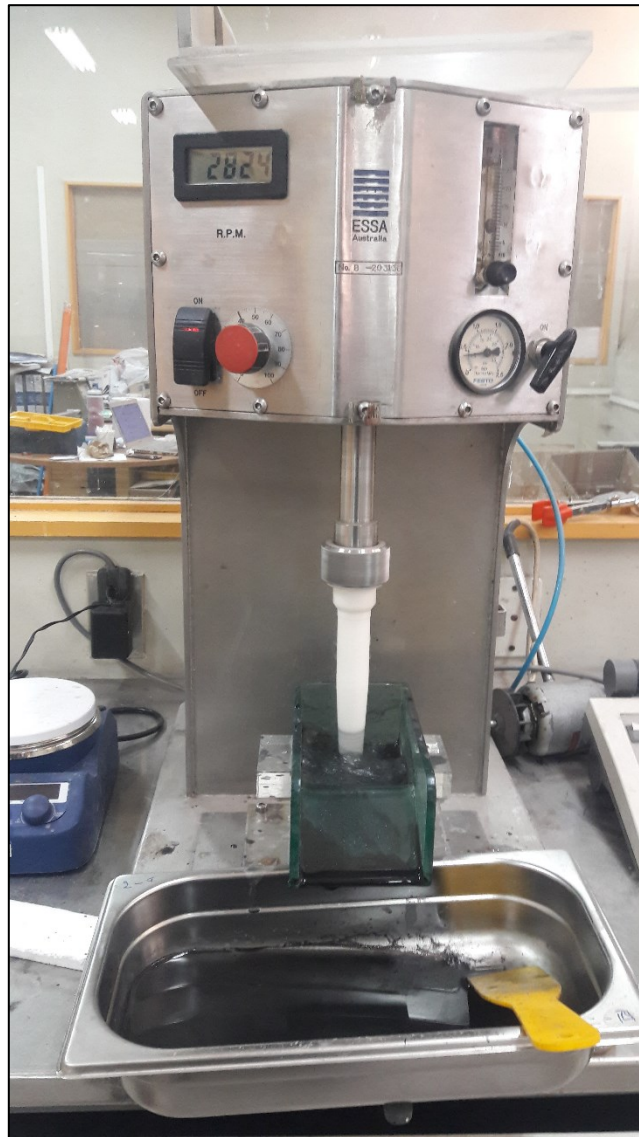


Figura 28: Celda de flotación de 0,5L, utilizada para limpieza del concentrado de la preflotación

### 3.5 Plan de pruebas experimentales

Como se indicó anteriormente, el programa de trabajo se modificó al conocerse que el contenido de cobre de la muestra denominada AC era muy bajo.

Las pruebas planificadas se presentan ordenadas según la muestra, en el orden AC, BC y CC.

#### 3.5.1 Pruebas de flotación de cobre sin preflotación

Estas pruebas tienen como objetivo conocer el comportamiento del mineral al ser flotado por cobre sin aplicar la preflotación con una base fuerte. Representan el modo de operar de Minera Las

Cenizas y varias otras en Chile y el resto del mundo, donde se aplica espumante en dosis altas para contrarrestar el efecto negativo que el carbono orgánico produce sobre la recuperación de cobre.

**Tabla 7: Pruebas correspondientes a flotación de cobre directa, sin preflotación**

N° Test	Muestra	Espumante: AF-70Plus, [g/t]	Paquete utilizado
1	AC (alto en carbono orgánico)	50	No se formó espuma
2		100	AC-14
3		200	AC-10
4	BC (bajo en carbono orgánico)	50	No se formó espuma estable
5		100	BC-5
6		200	BC-2
7	CC (alto en carbono orgánico)	50	No se formó espuma estable
8		100	CC-23
9		200	CC-16

Las condiciones comunes a estas pruebas son las siguientes:

- Granulometría: 80% bajo 140 mallas (106  $\mu\text{m}$ )
- Concentración de sólidos: 25%
- pH: natural
- Colector: AX-343. Dosis colector: 70 g/t
- Tiempo de acondicionamiento: 5 minutos
- Tiempos de cinética de flotación: 5, 15 y 30 minutos

### 3.5.2 Pruebas de preflotación sin adición de una base fuerte, y flotación de cobre

Estas pruebas tienen como objetivo explorar si es posible un preflotación sin agregar una base fuerte, dado que el carbono orgánico presente en el mineral en la forma de bitumen presenta una hidrofobicidad natural.

**Tabla 8: Pruebas correspondientes a preflotación sin adición de una base fuerte, y flotación de cobre**

N° Test	Muestra	Paquete utilizado
10	AC	AC-38
11	BC	BC-11
12	CC	CC-17

Las condiciones comunes a estas pruebas son las siguientes:

- Granulometría: 80% bajo 140 mallas (106  $\mu\text{m}$ )

- Concentración de sólidos: 30%
- pH: natural
- Tiempo de acondicionamiento preflotación: 30 minutos
- Tiempo de preflotación: 30 minutos
- Espumante: AF-70 Plus. Dosis espumante: 100 g/t
- Colector: AX-343. Dosis colector: 70 g/t
- Tiempo de acondicionamiento: 5 minutos
- Tiempos de cinética de flotación: 5, 15 y 30 minutos

### 3.5.3 Pruebas de preflotación con adición de NaOH, y flotación de cobre

Estas pruebas corresponden a la primera base fuerte estudiada: el hidróxido de sodio, también llamado soda cáustica.

La dosificación de NaOH (4,0 kg/t) se definió a partir de la literatura asociada al tratamiento de las arenas bituminosas, aplicando el rango alto para asegurar su efecto.

**Tabla 9: Pruebas correspondientes a preflotación con adición de NaOH, y flotación de cobre**

N° Test	Muestra	Espumante: AF-70Plus, [g/t]	Paquete utilizado
13	AC (alto en carbono orgánico)	50	AC-34
14		100	AC-16
15		200	---
16	BC (bajo en carbono orgánico)	50	No se formó espuma estable
17		100	BC-1 / BC8
18		200	---
19	CC (alto en carbono orgánico)	50	CC-24
20		100	CC-11 / CC-4 / CC-1
21		200	CC-9

Las condiciones comunes a estas pruebas son las siguientes:

- Granulometría: 80% bajo 140 mallas (106  $\mu$ m)
- Concentración de sólidos: 30%
- Base fuerte: NaOH pureza analítica. Dosificación base fuerte: 4 kg/t
- Tiempo de acondicionamiento preflotación: 30 minutos
- Tiempo de preflotación: 30 minutos
- Colector: AX-343. Dosis colector: 70 g/t
- Tiempo de acondicionamiento: 5 minutos
- Tiempos de cinética de flotación: 5, 15 y 30 minutos

### 3.5.4 Pruebas de preflotación con adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y flotación de cobre

Estas pruebas corresponden a la primera base fuerte estudiada: el hidróxido de calcio, también llamado cal apagada.

La dosificación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (3,7 kg/t) se definió con el fin de tener el mismo aporte de iones  $\text{OH}^-$  que los que aporta el  $\text{NaOH}$  de las pruebas descritas en el inciso anterior. Queda abierta la posibilidad de optimizar esta dosificación.

**Tabla 10: Pruebas correspondientes a preflotación con adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y flotación de cobre**

N° Test	Muestra	Espumante: AF-70Plus, [g/t]	Paquete utilizado
22	AC (alto en carbono orgánico)	50	No se formó espuma estable
23		100	AC-17
24		200	AC-4
25	BC (bajo en carbono orgánico)	50	No se formó espuma estable
26		100	BC-17
27		200	---
28	CC (alto en carbono orgánico)	50	CC-20
29		100	CC-8
30		200	CC-13

Las condiciones comunes a estas pruebas son las siguientes:

- Granulometría: 80% bajo 140 mallas (106  $\mu\text{m}$ )
- Concentración de sólidos: 30%
- Base fuerte:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pureza analítica. Dosificación base fuerte: 3,7 kg/t
- Tiempo de acondicionamiento preflotación: 30 minutos
- Tiempo de preflotación: 30 minutos
- Colector: AX-343. Dosis colector: 70 g/t
- Tiempo de acondicionamiento: 5 minutos
- Tiempos de cinética de flotación: 5, 15 y 30 minutos

### 3.5.5 Pruebas de limpieza del concentrado de la preflotación

Se realizaron pruebas donde se limpió el concentrado de la preflotación mediante una flotación de este concentrado en una celda de flotación de 0,5 L. Las colas de esta limpieza se retornaron a la celda Denver para juntarlas con las colas de la preflotación. Luego, se procedió al acondicionamiento y flotación de cobre.

Es objetivo de estas pruebas es validar la hipótesis que es posible mejorar la recuperación global de cobre en la flotación de cobre, ya que parte de los finos de cobre son arrastrados mecánicamente (junto con la pulpa) hacia el concentrado de la preflotación en la etapa de preflotación. Limpiando este concentrado, el cobre contenido en la cola de la limpieza se une a la cola de la preflotación. Estas pruebas también permiten conocer el comportamiento del carbono orgánico, verificando si

sale por el concentrado de la etapa de limpieza, o bien se queda en la cola de esta etapa y por tanto deteriora los resultados de la flotación de cobre cuando esta cola se une con la cola de la preflotación.

Estas pruebas se repitieron varias veces, con paquetes de la muestra CC. La base fuerte utilizada fue NaOH. La dosificación de espumante fue la misma para todos los casos (100 g/t).

**Tabla 11: Pruebas correspondientes a preflotación con adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y flotación de cobre**

N° Test	Muestra	Paquete utilizado
31 y siguientes	CC (alto en carbono orgánico)	CC-15 / CC-21 / CC-10 / CC-11 / CC-7 / CC-19

Las condiciones comunes a estas pruebas son las siguientes:

- Granulometría: 80% bajo 140 mallas (106  $\mu\text{m}$ )
- Concentración de sólidos: 30%
- Base fuerte: NaOH. Dosificación base fuerte: 4,0 kg/t
- Tiempo de acondicionamiento preflotación: 30 minutos
- Tiempo de preflotación: 30 minutos
- Tiempo de limpieza: 15 minutos, en celda de 0,5 L
- Espumante: AF-70 Plus. Dosis espumante: 100 g/t
- Colector: AX-343. Dosis colector: 70 g/t
- Tiempo de acondicionamiento: 5 minutos
- Tiempos de cinética de flotación: 5, 15 y 30 minutos

## 4 TRABAJO EXPERIMENTAL

### 4.1 Caracterización de las muestras

Se utilizaron las siguientes metodologías para caracterizar las muestras utilizadas en las pruebas experimentales:

- Análisis químico por cobre y por carbono
- Análisis químico ICP
- Análisis con Equipo Hi-Logger
- Determinación de densidad mediante picnometría
- Determinación de humedad

#### 4.1.1 Análisis químico por cobre y por carbono

Se analizaron muestras de cabeza de cada una de las tres muestras utilizadas (AC, BC y CC).

Se analizaron las muestras por cobre total, cobre soluble, carbono orgánico y carbono total.

Estos análisis se realizaron en un laboratorio externo (Laboratorio Químico Metalúrgico MTQ SpA).

El cobre soluble se determinó con el método del ácido cítrico.

Para analizar el carbono orgánico, se utilizó la técnica de calcinación a 500°C. Para el carbono inorgánico, se usó la técnica de calcinación a 900 °C.

Los resultados de los análisis se muestran a continuación.

**Tabla 12: Análisis químico de muestras utilizadas en pruebas**

Muestra	Cobre [%]	Cobre soluble [%]	Carbono orgánico [%]	Carbono total [%]
AC	0,0185	0,0022	1,95	20,4
BC	2,53	0,167	0,830	13,89
CC	1,153	-	-	-

Los productos de las pruebas se analizaron químicamente por cobre. Algunas muestras se analizaron además por carbono orgánico y carbono total. Con el fin de reducir costos, se utilizó un equipo de fluorescencia de rayos X disponible en el Laboratorio de Pirometalurgia de la Universidad de Chile. Se logró establecer una muy buena correlación entre los análisis químicos de cobre y la medición del equipo de fluorescencia. El detalle de esta correlación se encuentra en el Anexo D.

#### 4.1.2 Análisis químico ICP

Se analizaron las muestras BC y CC por el método de digestión total ICP-MS. La muestra AC no se analizó por razones presupuestarias y por su bajo contenido de cobre.

Los resultados de los análisis se muestran a continuación.

Tabla 13: Análisis digestión total ICP-MS

Elemento	Unidad	Límite	Muestra BC	Muestra CC
Ag	ppm	0,1	36,3	0,1
Al	%	0,01	5,34	8,27
As	ppm	1	32	< 1
Au	ppb	100	< 100	< 100
Ba	ppm	1	207	609
Be	ppm	1	< 1	3
Bi	ppm	0,1	0,2	0,3
Ca	%	0,01	12	1,02
Cd	ppm	0,1	0,3	< 0,1
Ce	ppm	1	20	82
Co	ppm	0,2	10,8	17,1
Cr	ppm	1	46	51
Cs	ppm	0,1	1,4	3,7
Cs	ppm	0,1	1,4	3,7
Cu	ppm	0,1	> 10000	42
Fe	%	0,01	2,51	4,74
Hf	ppm	0,1	1,9	0,9
K	%	0,01	1,33	2,76
La	ppm	0,1	9,3	39,8
Li	ppm	0,1	12,4	29,4



Elemento	Unidad	Límite	Muestra BC	Muestra CC
Mg	%	0,01	1	0,96
Mn	ppm	1	586	776
Mo	ppm	0,1	12,9	0,4
Na	%	0,001	1,11	1,08
Nb	ppm	0,1	1,6	< 0,1
Ni	ppm	0,1	25,2	33,7
P	%	0,001	0,124	0,052
Pb	ppm	0,1	52	21,3
Rb	ppm	0,1	76,2	174
S	%	1	2	< 1
Sb	ppm	0,1	< 0,1	< 0,1
Sc	ppm	1	15	15
Sn	ppm	0,1	0,9	< 0,1
Sr	ppm	1	225	172
Ta	ppm	0,1	< 0,1	< 0,1
Th	ppm	0,1	5,8	13,7
Ti	%	0,0	0,3	0,2
Tl	ppm	0,05	0,86	0,48
U	ppm	0,1	3,5	2,4
V	ppm	4	81	53
W	ppm	0,1	< 0,1	< 0,1
Y	ppm	0,1	15,8	33,5
Zn	ppm	1	56	101
Zr	ppm	0,1	74	39,3

Llama la atención el bajo contenido de cobre informado para la muestra CC (42 ppm). Se solicitó una aclaración al laboratorio, pero a la fecha no se ha tenido respuesta.

#### 4.1.3 Análisis con equipo Hi-Logger

Este análisis se realizó utilizando el equipo Hi-Logger existente en el Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (ATMC) de la Universidad de Chile. Este equipo analiza el haz reflejado en el rango visible y en el rango infrarrojo, para determinar la presencia de elementos químicos. Analizando su espectro, establece la composición mineralógica aproximada de cada punto.

Se procesaron dos cortes, uno de cada una de las muestras utilizadas para las pruebas preliminares, previo a su reducción de tamaño. Se pueden ver los cortes en relación con las muestras N° 10 (AC) y N° 13 (BC) en la Figura 29 y la Figura 30 respectivamente. Cada corte se escaneó seis veces, rotando y desplazando el corte para obtener información de diferentes posiciones de cada una de las muestras.

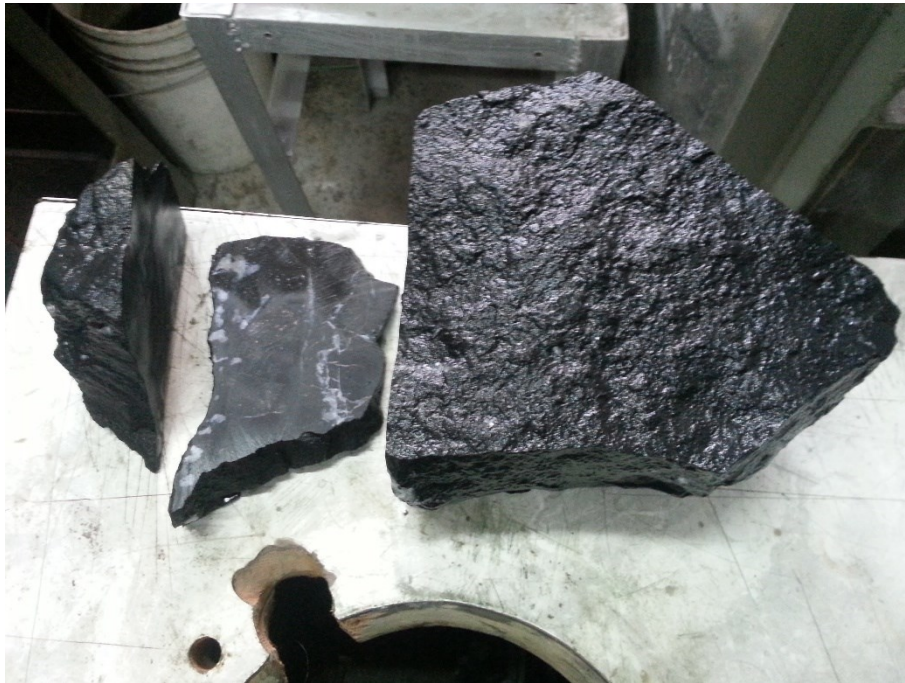


Figura 29: Corte a muestra N° 10 (AC)



Figura 30: Corte a muestra N° 13 (BC)

Las Figura 31 y Figura 32 muestran un ejemplo de análisis espectrales hechos a estas muestras. El análisis completo obtenido con el equipo Hi-Logger para las dos muestras analizadas se encuentra en el Anexo B.

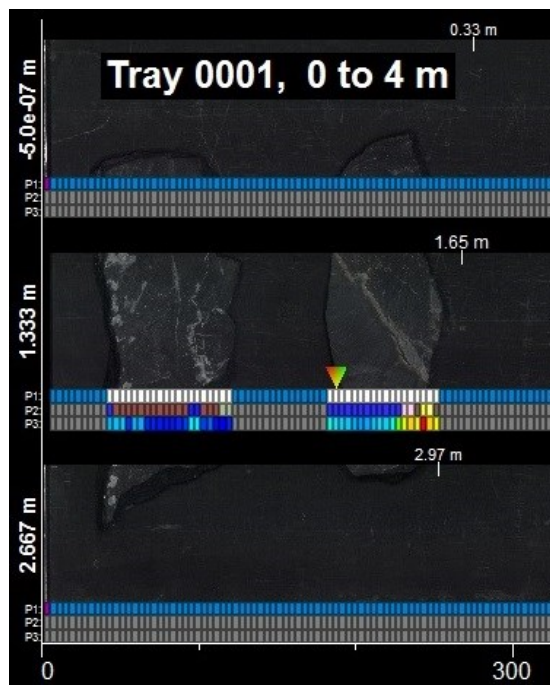


Figura 31: Trazado del haz hecho por Hi-Logger, análisis N° 1. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha

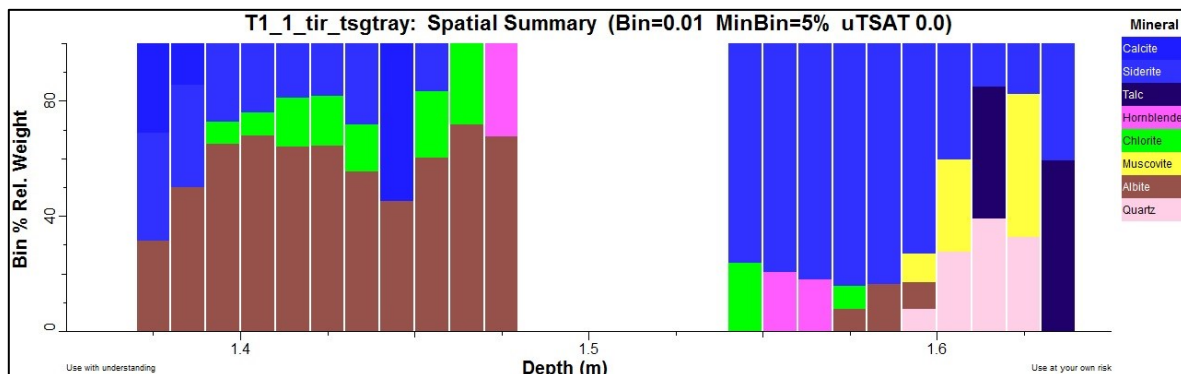


Figura 32: Análisis espectral N° 1 con Hi-Logger. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.

El análisis espectral que entrega el Hi-Logger para estas muestras indica que la ganga está compuesta principalmente por feldespatos y silicatos, con un contenido importante de carbonatos (calcita y siderita). La Tabla 14 muestra las principales especies encontradas para ambas muestras, tomando un promedio de la distribución de los seis cortes realizados con el haz a ambas muestras.

Tabla 14: Distribución de especies en la ganga, según análisis de Hi-Logger

Especie	Tipo de mineral	Muestra N° 10 (AC)	Muestra N° 13 (BC)
Quartz	Silicato (SiO <sub>2</sub> )	-	14,44%
Albite	Feldespato	54,53%	10,69%
Muscovite	Filosilicato	-	12,18%
Chlorite	Filosilicato	12,26%	6,10%
Siderite	Carbonato (FeCO <sub>3</sub> )	22,32%	42,83%
Otros	-	10,89%	13,76%

Se puede observar que la muestra alta en carbono (AC) tiene un menor contenido de carbonatos y mayor contenido de silicatos y feldespatos que la muestra con bajo contenido de carbono (BC).

#### 4.1.4 Determinación de densidad del mineral (picnometría)

Se determinó la densidad de las muestras utilizando la técnica de picnometría. Los resultados son los siguientes:

Tabla 15: Determinación de densidad del sólido (picnometría)

Muestra	Densidad mineral [g/cm <sup>3</sup> ]
AC	2,7081
BC	2,7787
CC	2,7025

#### 4.1.5 Determinación de la humedad del mineral

Se determinó la humedad del mineral mediante secado de la muestra. Para ello, se dejó secando durante un fin de semana a una temperatura controlada (50°C). Se midió la diferencia en peso del mineral. Resultó que el contenido de humedad es muy bajo, del orden de 0,15% para las tres muestras.

Tabla 16: Determinación humedad del mineral

		Muestra		
		AC	BC	CC
Peso bandeja vacía	[g]	322,7	358,1	239,9
Peso mineral húmedo con bandeja	[g]	742,8	766,4	625,1
Peso mineral seco con bandeja	[g]	742,1	765,8	624,5
Peso mineral húmedo	[g]	420,1	408,3	385,2
Peso mineral seco	[g]	419,4	407,7	384,6
Humedad (base seca)	[%]	0,167	0,147	0,156
Humedad (base húmeda)	[%]	0,167	0,147	0,156

## 4.2 Pruebas preliminares

Utilizando las muestras N° 10 (AC) y N° 13 (BC), se realizó primeramente una serie de pruebas de carácter demostrativo orientadas a verificar la validez de la hipótesis de trabajo. También se utilizaron estas muestras a modo de experimento de prueba para establecer la metodología utilizada en esta investigación.

Algunas conclusiones que se extrajeron de estas pruebas preliminares, y que se debieron validar en el desarrollo de la etapa experimental, son las siguientes:

- La molienda del mineral se realizará utilizando el pulverizador vibratorio del Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Universidad de Chile.
- Las pruebas de preflotación y flotación de cobre se realizarán utilizando una celda de flotación de 1 L.
- Es posible extraer una parte importante del carbono orgánico contenido en el mineral, entre un 40 y un 70% en las pruebas preliminares.
- Durante la etapa de preflotación, se produce un arrastre de cobre hacia el concentrado. El cobre sale junto con la pulpa que es arrastrada mecánicamente al rebosar la celda con el carbono orgánico. Se observa que la ley del concentrado de la preflotación es similar a la ley de cabeza. Y que la recuperación de cobre en esta etapa es similar a la recuperación de sólidos. Se debe minimizar este arrastre de pulpa para minimizar el arrastre de cobre.
- Realizando una etapa de limpieza del concentrado de la preflotación, se observa que es posible recuperar el cobre arrastrado. El concentrado de carbono orgánico obtenido arrastra una fracción menor de los sólidos y del cobre. La mayor parte del cobre se retiene con la cola de la etapa de limpieza. Esto implica que no hay una asociación entre el carbono orgánico y el cobre que impida su separación. Mejorando la limpieza mediante más etapas y/o utilizando un equipamiento con menor arrastre físico se mejoraría la recuperación global de cobre

Dado que los resultados asociados a estas pruebas son sólo referenciales, no se incluyen en este informe.

## 4.3 Pruebas de preflotación y flotación de cobre

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las pruebas que se realizaron siguiendo el plan de trabajo. Como se indicó en el capítulo anterior, se modificó el programa original cuando se conoció que la muestra AC (alto contenido de carbono orgánico) tenían contenidos de cobre muy bajos. Ello implicó que se debió reiniciar el programa con una nueva muestra de alto contenido de carbono orgánico, la que se denominó muestra CC.

Los valores de recuperación de cobre mostrados a continuación corresponden a valores calculados a partir de la cabeza calculada (compuesta por la suma de los finos de cobre de los concentrados y de la cola).

Los valores de recuperación de carbono orgánico mostrados a continuación corresponden a valores calculados a partir de la cabeza medida (la ley medida en la muestra de cabeza). Esto se hizo pues

no se midió el carbono de los últimos concentrados y de la cola ya que las pruebas preliminares mostraban sus contenidos bajo el rango de sensibilidad de la metodología empleada en los análisis.

#### 4.4 Pruebas sin preflotación

##### 4.4.1 Pruebas sin preflotación de muestra AC

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas con paquetes obtenidos de la muestra AC.

**Tabla 17: Prueba flotación de cobre sin preflotación para muestra AC**

Test N°	2	Paquete	AC-14
		Fecha	4-nov-2016
Base fuerte	-	Dosis [kg/t]	-
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Ley Cu [%]	Ley C Org [%]	Ley C total [%]
Cabeza	0,0185	1,95	20,4
Conc. 5 min	0,108	4,85	19,59
Conc. 15 min	0,058	4,02	19,51
Conc. 30 min	0,0215	2,48	20,03
Cola	0,012	0	0
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	21,5	10,4	4,1
Recup 15 min	46,3	28,9	12,8
Recup 30 min	55,6	40,5	21,7
Modelo de Klimpel			

Ro [%]	70,1		
k [min <sup>-1</sup> ]	0,1696		

Cabe hacer notar que la prueba con 50 g/t de espumante (Test N° 1) se debió suspender, pues no se formó espuma estable que permitiera la flotación. La prueba con 200 g/t de espumante (Test N° 3) se realizó, pero no se analizó químicamente pues se conoció que la ley de cobre de la cabeza de la muestra era muy baja.

#### 4.4.2 Pruebas sin preflotación de muestra BC

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas con paquetes obtenidos de la muestra BC.

**Tabla 18: Prueba flotación de cobre sin preflotación para muestra BC**

Test	5	Paquete	BC-5
		Fecha	15-nov-2016
Base fuerte	-	Dosis [kg/t]	-
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Ley Cu [%]	Ley C Org [%]	Ley C total [%]
Cabeza	2,53	0,83	13,9
Conc. 5 min	4,96	3,16	12,39
Conc. 15 min	5,205	3,41	12,16
Conc. 30 min	4,48	1,27	12,38
Cola	1,75		
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	15,3	29,0	7,6



Recup 15 min	30,5	58,5	14,7
Recup 30 min	45,4	71,1	22,9
Modelo de Klimpel			
Ro [%]	66,0		
k [min <sup>-1</sup> ]	0,0993		

**Tabla 19: Prueba flotación de cobre sin preflotación para muestra BC**

Test	6	Paquete	BC-2
		Fecha	22-nov-2016
Base fuerte	-	Dosis [kg/t]	-
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	200
Leyes	Ley Cu [%]	Ley C Org [%]	Ley C total [%]
Cabeza	2,53	0,83	13,9
Conc. 5 min	4,585	2,18	14,37
Conc. 15 min	3,75	2,96	14,99
Conc. 30 min	5,9	0,05	11,7
Cola	1,44	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	33,2	46,8	17,7
Recup 15 min	45,1	74,7	25,5
Recup 30 min	60,2	75,1	31,8

Modelo de Klimpel			
Ro [%]	62,7		
k [min <sup>-1</sup> ]	0,2953		

Cabe hacer notar que la prueba con 50 g/t de espumante (Test N° 4) se debió suspender, pues no se formó espuma estable que permitiera la flotación.

#### 4.4.3 Pruebas sin preflotación de muestra CC

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas con paquetes obtenidos de la muestra CC. A estas pruebas no se les realizó análisis de carbono orgánico y carbono total por razones presupuestarias.

Tabla 20: Prueba flotación de cobre sin preflotación para muestra CC

Test	8	Paquete	CC-23
		Fecha	7-dic-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Ley Cu [%]	Ley C Org [%]	Ley C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Conc. 5 min	3,29	-	-
Conc. 15 min	1,22	-	-
Conc. 30 min	1,34	-	-
Cola	0,491	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]

Recup 5 min	54,1	-	19,2
Recup 15 min	66,6	-	31,1
Recup 30 min	73,5	-	37,1
Modelo de Klimpel			
Ro [%]	76,8		
k [min <sup>-1</sup> ]	0,6562		

**Tabla 21: Prueba flotación de cobre sin preflotación para muestra CC**

Test	9	Paquete	CC-16
		Fecha	7-dic-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	200
Leyes	Ley Cu [%]	Ley C Org [%]	Ley C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Conc. 5 min	3,14	-	-
Conc. 15 min	1,78	-	-
Conc. 30 min	1,28	-	-
Cola	0,392	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	51,3	-	19,3
Recup 15 min	70,9	-	32,3
Recup 30 min	80,5	-	41,1

Modelo de Klimpel			
Ro [%]	87,9		
k [min <sup>-1</sup> ]	0,4330		

Cabe hacer notar que la prueba con 50 g/t de espumante (Test N° 7) se debió suspender, pues no se formó espuma estable que permitiera la flotación.

#### 4.5 Pruebas con preflotación sin adición de base fuerte

Estas pruebas se realizaron para conocer el efecto de un preflotación (flotación de carbono orgánico) sin adicionar una base fuerte, aprovechando que el carbono orgánico presente como bitumen es naturalmente hidrofóbico.

La flotación de cobre de estas pruebas se realizó con una dosificación de espumante AF-70 Plus de 100 g/t. Queda abierta la opción de probar cómo funcionaría la flotación de cobre con dosificaciones mayores.

##### 4.5.1 Prueba con preflotación sin adición de base fuerte de muestra AC

A continuación se presentan los resultados de la prueba realizada con un paquete obtenido de la muestra AC.

Tabla 22: Prueba preflotación sin adición de base fuerte más flotación de cobre para muestra AC

Test	10	Paquete	AC-38
		Fecha	7-nov-2016
Base fuerte	-	Dosis [kg/t]	-
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	0,0185	1,95	20,4
Pretrat. 15 min	0,0183	1,50	19,61

Pretrat. 30 min	0,0156	1,99	18,93
Flotación de cobre			
Conc. 5 min	0,0510	2,87	19,02
Conc. 15 min	0,0173	-	-
Conc. 30 min	0,0192	-	-
Cola	0,0070	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Pretrat. 15 min	16,8	12,1	15,8
Pretrat. 30' min	32,6	29,9	33,3
Flotación de cobre			
Recup 5 min	73,9	50,3	47,2
Recup 15 min	77,7	-	51,0
Recup 30 min	81,2	-	54,1
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	61,2	29,1	20,8
Recup 15 min	66,9	-	26,6
Recup 30 min	72,1	-	31,2
Modelo de Klimpel			
Ro [%]	76,2		
k [min <sup>-1</sup> ]	1,22934		

#### 4.5.2 Prueba con preflotación sin adición de base fuerte de muestra BC

A continuación se presentan los resultados de la prueba realizada con un paquete obtenido de la muestra BC.

**Tabla 23: Prueba preflotación sin adición de base fuerte más flotación de cobre para muestra BC**

Test	11	Paquete	BC-11
		Fecha	18-nov-2016
Base fuerte	-	Dosis [kg/t]	-
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	2,53	0,83	13,9
Pretrat. 15 min	2,36	1,21	13,89
Pretrat. 30 min	2,37	1,6	14,52
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	8,11	0,05	7,62
Conc. 15 min	2,81	-	-
Conc. 30 min	1,935	-	-
Cola	1,33	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Pretrat. 15 min	24,1	29,5	20,2
Pretrat. 30 min	35,7	48,1	29,9
Flotación de cobre			
Recup 5 min	48,2	48,3	32,9
Recup 15 min	54,4	-	37,3
Recup 30 min	65,6	-	48,8
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]

Recup 5 min	19,5	0,4	4,4
Recup 15 min	29,0	-	10,5
Recup 30 min	46,5	-	26,9
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	42,5		
k [min <sup>-1</sup> ]	0,1232		

#### 4.5.3 Prueba con preflotación sin adición de base fuerte de muestra CC

A continuación se presentan los resultados de la prueba realizada con un paquete obtenido de la muestra CC. A esta prueba no se les realizó análisis de carbono orgánico y carbono total por razones presupuestarias.

**Tabla 24: Prueba preflotación sin adición de base fuerte más flotación de cobre para muestra CC**

Test	12	Paquete	CC-17
		Fecha	6-dic-2016
Base fuerte	-	Dosis [kg/t]	-
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Pretrat. 30 min	1,18	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	3,86	-	-
Conc. 15 min	1,51	-	-
Conc. 30 min	1,02	-	-

Cola	0,391	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Pretrat. 30 min	22,1	-	21,0
Flotación de Cobre			
Recup 5 min	69,0	-	34,7
Recup 15 min	77,1	-	40,7
Recup 30 min	80,7	-	44,7
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	58,2	-	17,3
Recup 15 min	68,2	-	24,9
Recup 30 min	72,8	-	30,0
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	77,5		
k [min <sup>-1</sup> ]	0,87486		

#### 4.6 Pruebas con preflotación con adición de NaOH

En estas pruebas se verifica el efecto que tiene agregar una base fuerte (NaOH) en la preflotación, previo a la flotación de cobre.

Se probaron tres niveles de dosificación de espumante.

##### 4.6.1 Pruebas con preflotación con adición de NaOH de muestra AC

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas con paquetes obtenidos de la muestra AC.



**Tabla 25: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra AC**

Test	13	Paquete	AC-34
		Fecha	4-nov-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	50
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	0,0185	1,95	20,4
Pretrat. 15 min	0,017	2,06	18,65
Pretrat. 30 min	0,0493	2,3	17,61
Flotación de cobre			
Conc. 5 min	0,172	4,88	18,65
Conc. 15 min	0,02685	-	-
Conc. 30 min	0,0166	-	-
Cola	0,007	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Pretrat. 15 min	19,5	24,6	23,4
Pretrat. 30 min	46,1	37,5	34,3
Flotación de cobre			
Recup 5 min	72,0	45,2	37,4
Recup 15 min	77,2	-	41,3
Recup 30 min	81,6	-	46,7
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]

Recup 5 min	48,1	12,3	4,7
Recup 15 min	57,7	-	10,6
Recup 30 min	65,8	-	18,8
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	67,2		
k [min <sup>-1</sup> ]	0,65529		

**Tabla 26: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra AC**

Test	14	Paquete	AC-16
		Fecha	7-nov-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	0,0185	1,95	20,4
Pretrat. 15 min	0,0168	1,82	18379
Pretrat. 30 min	0,0213	1,49	18,21
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	0,082	5,5	18,49
Conc. 15 min	0,0183	-	-
Conc. 30 min	0,0104	-	-
Cola	0,00825	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]

Pretrat. 15 min	19,2	20,2	21,7
Pretrat. 30 min	32,8	29,5	33,8
Flotación de cobre			
Recup 5 min	72,2	55,1	42,9
Recup 15 min	77,5	-	48,4
Recup 30 min	77,6	-	48,6
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	58,6	36,4	13,7
Recup 15 min	66,6	-	22,2
Recup 30 min	66,7	-	22,5
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	69,2		
k [min <sup>-1</sup> ]	1,32547		

La prueba con 200 g/t de espumante (Test N° 15) se realizó, pero no se analizó químicamente pues se conoció que la ley de cobre de la cabeza de la muestra era muy baja.

#### 4.6.2 Pruebas con preflotación con adición de NaOH de muestra BC

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas con paquetes obtenidos de la muestra BC.

Cabe hacer notar que la prueba con 50 g/t de espumante (Test N° 16) se debió suspender, pues no se formó espuma estable que permitiera la flotación.

**Tabla 27: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra BC**

Test	17	Paquete	BC-8
		Fecha	21-nov-2016

Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	2,53	0,83	13,9
Pretrat. 15 min	2,375	1,94	14,38
Pretrat. 30 min	2,37	1,9	14,32
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	8,6	<0,05	6,32
Conc. 15 min	2,58	-	-
Conc. 30 min	1,4	-	-
Cola	0,63	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Pretrat. 15 min	12,5	30,3	12,7
Pretrat. 30 min	25,3	60,6	25,6
Flotación de cobre			
Recup 5 min	80,2	61,5	40,9
Recup 15 min	83,5	-	44,0
Recup 30 min	87,8	-	51,3
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	73,5	2,4	20,6
Recup 15 min	77,9	-	24,7
Recup 30 min	83,7	-	34,6

Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	80,4		
k [min <sup>-1</sup> ]	1,56325		

La prueba con 200 g/t de espumante (Test N° 18) no se realizó.

#### 4.6.3 Pruebas con preflotación con adición de NaOH de muestra CC

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas con paquetes obtenidos de la muestra CC. A estas pruebas no se les realizó análisis de carbono orgánico y carbono total por razones presupuestarias.

La prueba con 100 g/t de espumante (Test N° 20) se realizó en triplicado.

Las leyes de cobre de los Tests N° 20-B (Paquete CC-19) y N° 20-C (Paquete CC-1) se estimaron utilizando el equipo de fluorescencia de rayos X según la correlación mostrada en el Anexo D.

**Tabla 28: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra CC**

Test	19	Paquete	CC-24
		Fecha	5-dic-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	50
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,2	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	8,37	-	-
Conc. 15 min	1,99	-	-

Conc. 30 min	0,905	-	-
Cola	0,466	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	17,3	-	17,5
Flotación de cobre			
Recup 5 min	63,8	-	24,2
Recup 15 min	70,7	-	28,4
Recup 30 min	74,5	-	33,5
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	56,3	-	8,2
Recup 15 min	64,5	-	13,2
Recup 30 min	69,2	-	19,4
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	70,7		
k [min <sup>-1</sup> ]	0,95666		

**Tabla 29: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra CC**

Test	20-A	Paquete	CC-4
		Fecha	6-dic-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100

Test	20-A	Paquete	CC-4
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,15	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	3,93	-	-
Conc. 15 min	0,747	-	-
Conc. 30 min	0,825	-	-
Cola	0,299	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	19,0	-	19,4
Flotación de cobre			
Recup 5 min	76,1	-	36,4
Recup 15 min	81,5	-	44,9
Recup 30 min	88,1	-	54,3
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	70,5%	-	21,1%
Recup 15 min	77,2%	-	31,7%
Recup 30 min	85,4%	-	43,3%
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	85,5%		
k [min <sup>-1</sup> ]	1,08435		

**Tabla 30: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra CC**

Test	20-B	Paquete	CC-19
		Fecha	21-dic-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,213	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	1,873	-	-
Conc. 15 min	0,924	-	-
Conc. 30 min	0,090	-	-
Cola	0,151	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	14,3	-	10,5
Flotación de cobre			
Recup 5 min	87,5	-	45,1
Recup 15 min	91,7	-	49,1
Recup 30 min	92,3	-	55,3
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	85,4	-	38,7
Recup 15 min	90,3	-	43,1



Recup 30 min	91,1	-	50,1
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	92,4		
k [min <sup>-1</sup> ]	2,67975		

**Tabla 31: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra CC**

Test	20-C	Paquete	CC-1
		Fecha	5-Ene-2017
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,008	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	3,321	-	-
Conc. 15 min	1,038	-	-
Conc. 30 min	0,210	-	-
Cola	0,172	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	17,8	-	17,6%
Flotación de cobre			
Recup 5 min	80,2	-	36,4

Recup 15 min	90,5	-	46,2
Recup 30 min	91,2	-	49,7
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	75,9	-	22,7
Recup 15 min	88,4	-	34,7
Recup 30 min	89,3	-	38,9
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	93,0		
k [min <sup>-1</sup> ]	1,09981		

**Tabla 32: Prueba preflotación con adición de NaOH más flotación de cobre para muestra CC**

Test	21	Paquete	CC-9
		Fecha	5-dic-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	200
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,17	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	3,84	-	-
Conc. 15 min	0,892	-	-

Conc. 30 min	0,508	-	-
Cola	0,282	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	20.1	-	19,4
Flotación de cobre			
Recup 5 min	78.7	-	36,6
Recup 15 min	84.6	-	44,1
Recup 30 min	87.5	-	50,5
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	73,3	-	21,4
Recup 15 min	80,7	-	30,7
Recup 30 min	84,3	-	38,6
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	85,8		
k [min <sup>-1</sup> ]	1,35666		

#### 4.7 Pruebas con preflotación con adición de Ca(OH)<sub>2</sub>

En estas pruebas se verifica el efecto que tiene agregar al preflotación Ca(OH)<sub>2</sub> como base fuerte, alternativa al NaOH.

Se probaron tres niveles de dosificación de espumante.

##### 4.7.1 Pruebas con preflotación con adición de Ca(OH)<sub>2</sub> de muestra AC

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas con paquetes obtenidos de la muestra AC.

**Tabla 33: Prueba preflotación con adición de Ca(OH)<sub>2</sub> más flotación de cobre para muestra AC**

Test	23	Paquete	AC-17
		Fecha	8-nov-2016
Base fuerte	Ca(OH) <sub>2</sub>	Dosis [kg/t]	3,7
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	0,0185	1,95	20,4
Pretrat. 15 min	0,022	1,23	20,18
Pretrat. 30 min	0,024	2,12	19,51
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	0,096	4,41	19,65
Conc. 15 min	0,024	-	-
Conc. 30 min	0,014	-	-
Cola	0,011	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Pretrat. 15 min	15,9	10,1	15,8
Pretrat. 30 min	33,4	27,7	31,6
Flotación de cobre			
Recup 5 min	68,1	45,8	39,4
Recup 15 min	71,5	-	42,6
Recup 30 min	73,5	-	45,6
Recup. Acum. Flotación de Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]

Recup 5 min	52,1	25,1	11,5
Recup 15 min	57,3	-	16,1
Recup 30 min	60,2	-	20,5
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	61,1		
k [min-1]	1,32821		

**Tabla 34: Prueba preflotación con adición de Ca(OH)<sub>2</sub> más flotación de cobre para muestra AC**

Test	24	Paquete	AC-4
		Fecha	10-nov-2016
Base fuerte	Ca(OH) <sub>2</sub>	Dosis [kg/t]	3,7
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	200
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	0,0185	1,95	20,4
Pretrat. 15 min	0,02	2,12	19,59
Pretrat. 30 min	0,023	1,71	19,7
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	0,071	3,09	20,53
Conc. 15 min	0,027	-	-
Conc. 30 min	0,027	-	-
Cola	0,013	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]

Pretrat. 15 min	13,3	16,7	15,1
Pretrat. 30 min	24,0	26,2	25,7
Flotación de cobre			
Recup 5 min	61,5	45,7	37,7
Recup 15 min	68,1	-	43,3
Recup 30 min	69,5	-	44,4
Recup. Acum. Flotación de Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	49,3	26,4	16,2
Recup 15 min	58,1	-	23,7
Recup 30 min	59,9	-	25,2
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	62,2		
k [min <sup>-1</sup> ]	0,96496		

Cabe hacer notar que la prueba con 50 g/t de espumante (Test N° 22) se debió suspender, pues no se formó espuma estable que permitiera la flotación.

#### 4.7.2 Pruebas con preflotación con adición de Ca(OH)<sub>2</sub> de muestra BC

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas con paquetes obtenidos de la muestra BC.

Tabla 35: Prueba preflotación con adición de Ca(OH)<sub>2</sub> más flotación de cobre para muestra BC

Test	19	Paquete	BC-17
		Fecha	21-nov-2016
Base fuerte	Ca(OH) <sub>2</sub>	Dosis [kg/t]	3,7

Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	2,53	0,83	13,9
Pretrat. 15 min	2,32	1,1	14,91
Pretrat. 30 min	2,33	1,23	13,59
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	10,99	0,05	4,55
Conc. 15 min	2,765	-	-
Conc. 30 min	0,815	-	-
Cola	1,35	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Pretrat. 15 min	12,4	19,0	14,3
Pretrat. 30 min	23,3	37,6	27,0
Flotación de cobre			
Recup 5 min	66,7	38,3	37,6
Recup 15 min	72,2	-	42,9
Recup 30 min	73,7	-	47,7
Recup. Acum. Flotación de Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	56,6	1,0	14,5
Recup 15 min	63,7	-	21,8
Recup 30 min	65,7	-	28,5

Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	72,8		
k [min <sup>-1</sup> ]	1,23798		

Cabe hacer notar que la prueba con 50 g/t de espumante (Test N° 25) se debió suspender, pues no se formó espuma estable que permitiera la flotación.

La prueba con 200 g/t de espumante (Test N° 27) no se ejecutó.

#### 4.7.3 Pruebas con preflotación con adición de Ca(OH)<sub>2</sub> de muestra CC

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas con paquetes obtenidos de la muestra CC. A estas pruebas no se les realizó análisis de carbono orgánico y carbono total por razones presupuestarias.

Las leyes de cobre de los Tests N° 22 (Paquete CC-20), N° 23 (Paquete CC-8) y N° 24 (Paquete CC-13) se estimaron utilizando el equipo de fluorescencia de rayos X, mediante la correlación descrita en el Anexo D.

**Tabla 36: Prueba preflotación con adición de Ca(OH)<sub>2</sub> más flotación de cobre para muestra CC**

Test	22	Paquete	CC-20
		Fecha	22-dic-2016
Base fuerte	Ca(OH) <sub>2</sub>	Dosis [kg/t]	3,7
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	50
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,023	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	5,371	-	-



Conc. 15 min	0,998	-	-
Conc. 30 min	0,425	-	-
Cola	0,214	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	13,0	-	15,1%
Flotación de cobre			
Recup 5 min	79,0	-	29,7%
Recup 15 min	87,4	-	39,7%
Recup 30 min	90,9	-	49,4%
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	75,9%	-	17,2%
Recup 15 min	85,6%	-	29,0%
Recup 30 min	89,5%	-	40,4%
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	91,6%		
k [min <sup>-1</sup> ]	1,15131		

Tabla 37: Prueba preflotación con adición de Ca(OH)<sub>2</sub> más flotación de cobre para muestra CC

Test	23	Paquete	CC-8
		Fecha	22-dic-2016
Base fuerte	Ca(OH) <sub>2</sub>	Dosis [kg/t]	3,7
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70

Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,062	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	5,572	-	-
Conc. 15 min	1,181	-	-
Conc. 30 min	0,572	-	-
Cola	0,202	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	17,0	-	18,8
Flotación de cobre			
Recup 5 min	78,2	-	31,8
Recup 15 min	88,9	-	42,4
Recup 30 min	90,8	-	46,3
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	73,7	-	15,9
Recup 15 min	86,6	-	29,1
Recup 30 min	88,9	-	33,8
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	92,3		
k [min. <sup>-1</sup> ]	0,98932		

**Tabla 38: Prueba preflotación con adición de Ca(OH)<sub>2</sub> más flotación de cobre para muestra CC**

Test	24	Paquete	CC-13
		Fecha	5-Ene-2017
Base fuerte	Ca(OH) <sub>2</sub>	Dosis [kg/t]	3,7
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	200
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,034	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	6,018	-	-
Conc. 15 min	0,962	-	-
Conc. 30 min	0,411	-	-
Cola	0,165	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	19,4	-	22,0
Flotación de cobre			
Recup 5 min	80,7	-	33,9
Recup 15 min	90,5	-	45,7
Recup 30 min	93,5	-	54,4
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]

Recup 5 min	76,1	-	15,3
Recup 15 min	88,2	-	30,4
Recup 30 min	91,9	-	41,5
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	94,8		
k [min <sup>-1</sup> ]	1,00054		

#### 4.8 Prueba con limpieza del concentrado de la preflotación

En esta prueba se programó con el fin de verificar si es posible mejorar la recuperación global de cobre mediante una limpieza del concentrado de la preflotación. Como se explicó en la sección 3.5.5 del capítulo anterior, esta prueba busca establecer si es posible mejorar la recuperación global del cobre contenido en el concentrado de la etapa de flotación de cobre, y verificar si existe algún efecto negativo por un eventual retorno del carbono orgánico junto con las colas de la etapa de limpieza.

Se realizó esta prueba considerando NaOH como base fuerte, y con una dosificación de 100 g/t de espumante.

Esta prueba se realizó utilizando paquetes obtenidos a partir de la muestra CC. Por la importancia de esta prueba, se repitió cuatro veces.

Las leyes de cobre se estimaron utilizando el equipo de fluorescencia de rayos X, según la correlación mostrada en el Anexo D. No se analizó el contenido de carbono orgánico y carbono total por razones presupuestarias.

**Tabla 39: Prueba con limpieza de concentrados de preflotación más flotación de cobre para muestra CC**

Test	31-A	Paquete	CC-15
		Fecha	12-dic-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100

Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,006	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	1,650	-	-
Conc. 15 min	1,266	-	-
Conc. 30 min	0,095	-	-
Cola	0,149	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	2,9	-	2,2
Flotación de cobre			
Recup 5 min	77,1	-	37,3
Recup 15 min	89,8	-	45,0
Recup 30 min	90,5	-	51,2
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	76,4	-	35,8
Recup 15 min	89,5	-	43,8
Recup 30 min	90,2	-	50,1
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	94,1		
k [min-1]	1,07417		

Tabla 40: Prueba con limpieza de concentrados de preflotación más flotación de cobre para muestra CC

Test	31-B	Paquete	CC-21
		Fecha	13-dic-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,161	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	7,154	-	-
Conc. 15 min	1,476	-	-
Conc. 30 min	0,651	-	-
Cola	0,187	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	3,6	-	3,6
Flotación de cobre			
Recup 5 min	76,9	-	15,7
Recup 15 min	85,3	-	22,4
Recup 30 min	88,9	-	28,9
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	76,0	-	12,5
Recup 15 min	84,8	-	19,5

Recup 30 min	88,5	-	26,2
Modelo de Klimpel Flot de Cobre	CC-7		
Ro [%]	92,7		
k [min-1]	1,40257		

**Tabla 41: Prueba con limpieza de concentrados de preflotación más flotación de cobre para muestra CC**

Test	31-C	Paquete	CC-10
		Fecha	14-dic-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,119	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	1,989	-	-
Conc. 15 min	0,823	-	-
Conc. 30 min	0,103	-	-
Cola	0,182	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	6,2	-	4,9
Flotación de cobre			
Recup 5 min	80,1	-	37,5

Recup 15 min	89,6	-	47,6
Recup 30 min	90,3	-	53,8
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	78,8	-	34,3
Recup 15 min	88,9	-	44,9
Recup 30 min	89,7	-	51,4
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	92,6		
k [min-1]	1,35633		

**Tabla 42: Prueba con limpieza de concentrados de preflotación más flotación de cobre para muestra CC**

Test	31-D	Paquete	CC-7
		Fecha	19-dic-2016
Base fuerte	NaOH	Dosis [kg/t]	4,0
Colector	AX-343	Dosis [g/t]	70
Espumante	AF-70+	Dosis [g/t]	100
Leyes	Cu [%]	C Org [%]	C total [%]
Cabeza	1,153	-	-
Preflotación	1,048	-	-
Flotación de Cobre			
Conc. 5 min	4,108	-	-
Conc. 15 min	0,866	-	-



Conc. 30 min	0,071	-	-
Cola	0,178	-	-
Recup. Acum.	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Preflotación	3,8	-	3,9
Flotación de cobre			
Recup 5 min	80,1	-	23,7
Recup 15 min	89,7	-	35,5
Recup 30 min	90,1	-	40,8
Recup. Acum. Flotación Cobre	Cu [%]	C Org [%]	Sólido [%]
Recup 5 min	79,3	-	20,6
Recup 15 min	89,3	-	33,0
Recup 30 min	89,7	-	38,4
Modelo de Klimpel Flot de Cobre			
Ro [%]	92,7		
k [min-1]	1,40257		

## 5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se analizan y discuten los resultados experimentales presentados en el capítulo anterior.

Se ha organizado la presentación del análisis de los resultados a partir de los siguientes tópicos principales:

- Efecto de la preflotación en la recuperación de cobre
- Efecto de la preflotación en la ley del concentrado de cobre
- Efecto de la preflotación en el consumo de espumante
- Efecto de la preflotación en la cinética de la flotación de cobre
- Diferencias entre las bases fuertes probadas
- Efecto de una etapa de limpieza del concentrado de la preflotación en la recuperación de cobre
- Cinética de la extracción de carbono orgánico

### 5.1 Efecto de la preflotación en la recuperación de cobre

Este es el efecto más evidente, y el más interesante desde el punto de vista económico: la preflotación produce un aumento en la recuperación de cobre, tanto globalmente como al considerar la etapa de flotación de cobre aislada (es decir, calculando la recuperación a partir de las colas de la preflotación).

Sin embargo, dado que el producto buscado en una instalación industrial es el concentrado de cobre, y que se produce una “fuga” de cobre junto con el concentrado de carbono orgánico de la preflotación por arrastre mecánico, la recuperación absoluta de la flotación de cobre (calculada a partir de la alimentación al preflotación) se puede ver reducida. La recuperación absoluta de la flotación de cobre se puede incrementar mediante etapas de limpieza del concentrado de la preflotación, tal como se muestra en los resultados expuestos en la sección 4.8 y se discute en la sección 5.7 más adelante.

La recuperación lograda con cada una de las tres muestras estudiadas es diferente. Sin embargo, al comparar los resultados de cada muestra por separado, se concluye que se produce un incremento en la recuperación de cobre de la flotación de cobre producto de incorporar una etapa de preflotación.

#### 5.1.1 Resultados de la muestra AC

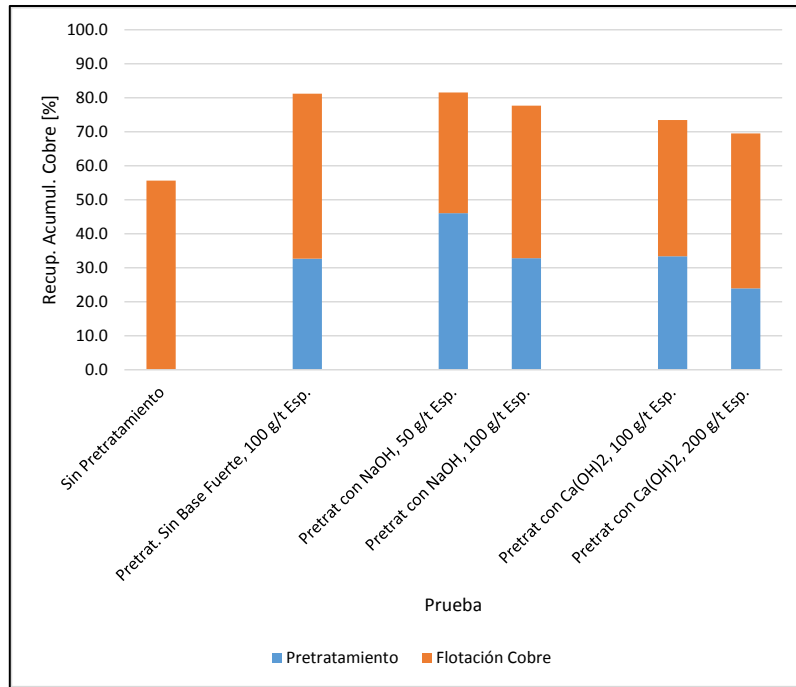
Los niveles de recuperación se consideran bajos al compararlos con la instalación industrial (80 a 82% del cobre). El contenido de cobre de esta muestra resultó ser muy bajo (0,0185%), lo que podría explicar la baja recuperación y alguna dispersión en los resultados. Otra posible explicación de la baja recuperación sería un error en la estimación del tiempo de molienda dado que estas pruebas se realizaron basados en una cinética de molienda realizada previo al ajuste hecho al compresor (ver Anexo C).

Se observa que tanto la recuperación global de cobre como la recuperación de cobre al considerar la etapa de flotación de cobre aisladamente (calculada respecto a la cola de la preflotación) es mayor en todas las pruebas que incluyen preflotación respecto al proceso sin preflotación, tal como se muestra en la Tabla 43, en la Figura 33 y en la Figura 34. Notar que la recuperación en los primeros cinco minutos en la flotación de cobre, respecto a la recuperación acumulada a los 30 minutos, es proporcionalmente mayor que para la prueba sin preflotación. Esto se discutirá más adelante en la sección 5.4. Por otro lado, la recuperación de cobre conseguida en la etapa de preflotación (barra azul en la Figura 33), se podría considerar como una pérdida de cobre. Sin embargo, como se mostrará más adelante en la sección 5.7, este cobre es en su mayor parte recuperable y posible de extraer junto con el concentrado de la flotación de cobre.

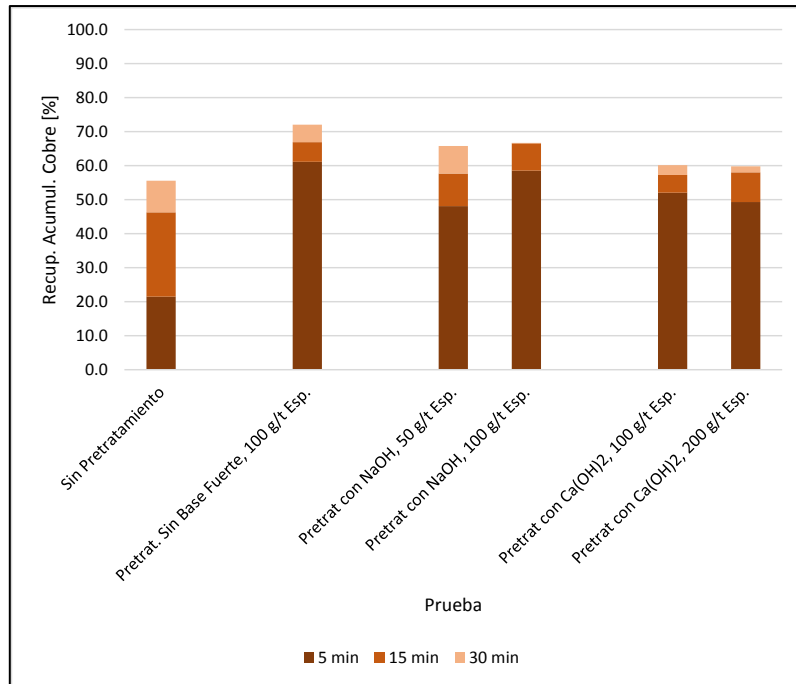
**Tabla 43: Resumen resultados de recuperación de cobre para muestra AC**

Muestra AC						
Test	2	10	13	14	23	24
Descripción	Sin Preflotación	Pretrat. sin Base Fuerte	Pretrat con NaOH		Pretrat con Ca(OH) <sub>2</sub>	
Paquete	AC-14	AC-38	AC-34	AC-16	AC-17	AC-4
Dosis espumante [g/t]	100	100	50	100	100	200
Recuperación acumulada de cobre [%]						
Preflotación	-	32,6	46,1	32,8	33,4	24,0
Flotación Cobre	55,6	81,2	81,6	77,6	73,5	69,5
Recuperación acumulada de cobre en Flotación de cobre* [%]						
5 min	21,5	61,2	48,1	58,6	52,1	49,3
15 min	46,3	66,9	57,7	66,6	57,3	58,1
30 min	55,6	72,1	65,8	66,7	60,2	59,9

\* Se considera Flotación de cobre como etapa aislada (alimentada por cola de Preflotación)



**Figura 33: Resumen recuperación global de cobre para muestra AC**



**Figura 34: Resumen recuperación de cobre en la flotación de cobre (considerada como etapa aislada, es decir calculada a partir de la cola de la preflotación) para muestra AC**

### 5.1.2 Resultados de la muestra BC

Los niveles de recuperación se consideran bajos al compararlos con la instalación industrial (80 a 82% del cobre). Una posible explicación es que se haya producido un error en la estimación del tiempo de molienda, dado que parte de la cinética de molienda se realizó previo al ajuste hecho al compresor. Ver Anexo C.

Se observa que la recuperación de cobre en todas las pruebas con preflotación es mayor que la recuperación de cobre al no considerar un preflotación, tal como se observa en la Tabla 44, la Figura 35 y la Figura 36. Notar que la recuperación en los primeros cinco minutos en la flotación de cobre, respecto a la recuperación acumulada a los 30 minutos, es proporcionalmente mayor que para la prueba sin preflotación. Esto se discutirá más adelante en la sección 5.4. Por otro lado, la recuperación de cobre conseguida en la etapa de preflotación (barra azul en la Figura 35), se podría considerar como una pérdida de cobre. Sin embargo, como se mostrará más adelante en la sección 5.7, este cobre es en su mayor parte recuperable y posible de extraer junto con el concentrado de la flotación de cobre.

Tabla 44: Resumen resultados de recuperación de cobre para muestra BC

Muestra BC					
Test	4	5	11	17	26
Descripción	Sin Preflotación	Sin Preflotación	Pretrat. Sin Base Fuerte	Pretrat con NaOH	Pretrat con Ca(OH) <sub>2</sub>
Paquete	BC-5	BC-2	BC-11	BC-8	BC-17
Dosis espumante [g/t]	100	200	100	100	100
Recuperación acumulada de cobre [%]					
Preflotación	-	-	35,7	25,3	23,3
Flotación de cobre	45,4	60,2	65,6	87,8	73,7
Recuperación acumulada de cobre en Flotación de cobre* [%]					
5 min	15,3	33,2	19,5	73,5	56,6
15 min	30,5	45,1	29,0	77,9	63,7

30 min	45,4	60,2	46,5	83,7	65,7
--------	------	------	------	------	------

\* Se considera Flotación de cobre como etapa aislada (alimentada por cola de Preflotación)

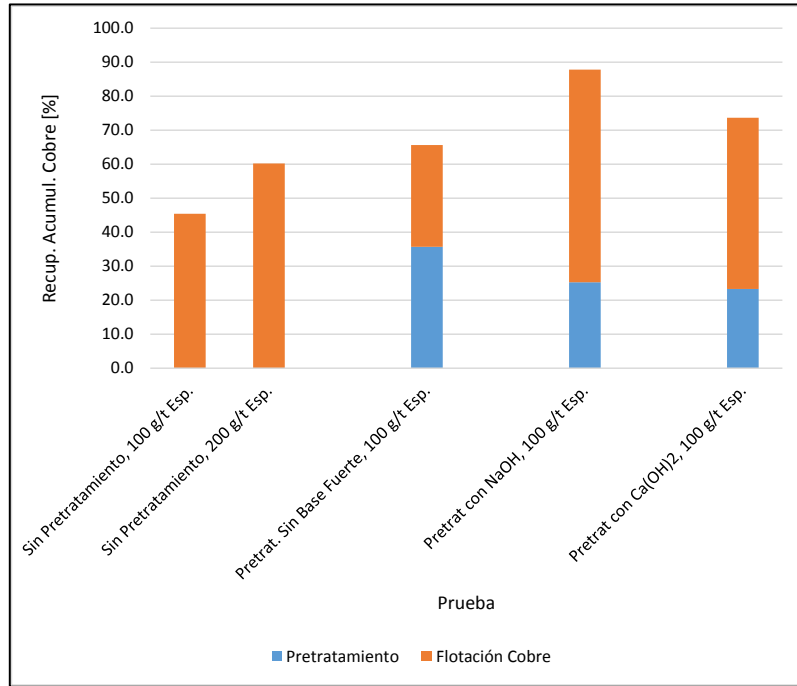
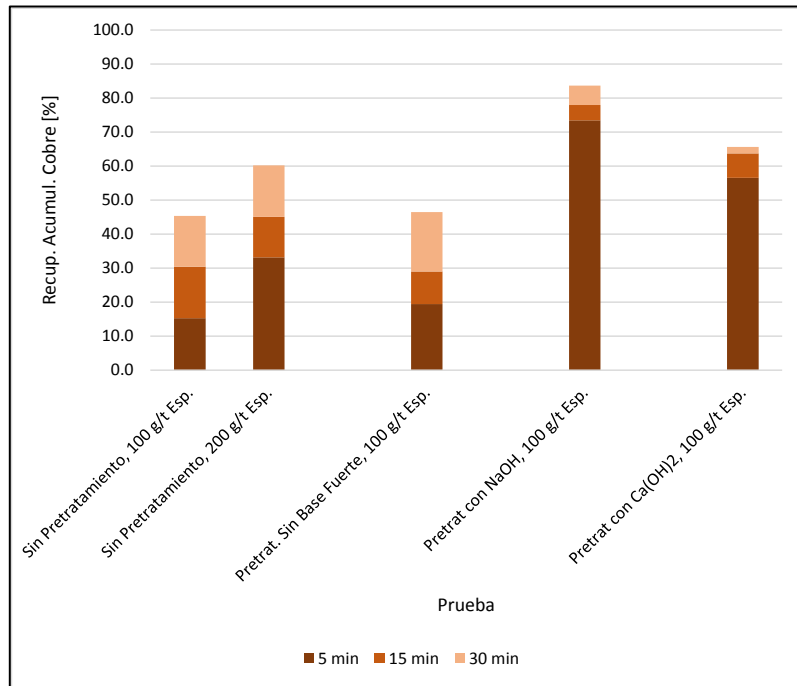


Figura 35: Resumen recuperación global de cobre para muestra BC



**Figura 36: Resumen recuperación de cobre en flotación de cobre (considerada como etapa aislada, es decir calculada a partir de la cola de la preflotación) para muestra BC**

### 5.1.3 Resultados de la muestra CC

Se observa que, para las pruebas realizadas con la muestra CC, la recuperación de cobre en todas las pruebas con preflotación es mayor que la recuperación de cobre al no considerar un preflotación, tal como se observa en la Tabla 45, Tabla 46, Figura 37 y Figura 38.

Cabe hacer notar que con la muestra CC se logró reproducir la recuperación lograda en la instalación industrial (80 a 82% sin preflotación, 200 g/t de espumante). Esto no ocurrió con las otras dos muestras probadas (AC y BC), se sospecha de un problema con la determinación del tiempo de molienda.

Notar que para las pruebas con adición de base fuerte, la recuperación en los primeros cinco minutos en la flotación de cobre, respecto a la recuperación acumulada a los 30 minutos, es proporcionalmente mayor que para las pruebas sin preflotación. Esto se discutirá más adelante en la sección 5.4. Por otro lado, la recuperación de cobre conseguida en la etapa de preflotación (barra azul en la Figura 37), se podría considerar como una pérdida de cobre. Sin embargo, como se mostrará más adelante en la sección 5.7, este cobre es en su mayor parte recuperable y posible de extraer junto con el concentrado de la flotación de cobre.

**Tabla 45: Resumen resultados de recuperación de cobre para muestra CC (Parte 1)**

Muestra CC					
Test	8	9	12	19	20-A
Descripción	Sin Preflotación	Sin Preflotación	Pretrat. sin Base Fuerte	Pretrat con NaOH	con Pretrat NaOH,
Paquete	CC-23	CC-16	CC-17	CC-24	CC-4
Dosis Espumante [g/t]	100	200	100	50	100
Recuperación acumulada de cobre [%]					
Preflotación	-	-	22,1	17,3	19,0
Flotación Cobre	73,5	80,5	80,7	74,5	88,1

Recuperación acumulada de cobre en Flotación de cobre* [%]					
5 min	54,1	51,3	60,2	56,3	70,5
15 min	66,6	70,9	70,6	64,5	77,2
30 min	73,5	80,5	75,3	69,2	85,4

Tabla 46: Resumen resultados de recuperación de cobre para muestra CC (Parte 2)

Muestra CC						
Test	20-B	20-C	21	28	29	30
Descripción	Pretrat con NaOH	Pretrat con NaOH	Pretrat con NaOH	Pretrat con Ca(OH) <sub>2</sub>	Pretrat con Ca(OH) <sub>2</sub>	Pretrat con Ca(OH) <sub>2</sub>
Paquete	CC-19	CC-1	CC-9	CC-20	CC-8	CC-13
Dosis Espumante [g/t]	100	100	200	50	100	200
Recuperación acumulada de cobre [%]						
Preflotación	14,3	17,8	20,1	13,0	17,0	19,4
Flotación Cobre	92,3	91,2	87,5	90,9	90,8	93,5
Recuperación acumulada de cobre en Flotación de cobre* [%]						
5 min	85,4	75,9	73,3	75,9	73,7	76,1
15 min	90,3	88,4	80,7	85,6	86,6	88,2
30 min	91,1	89,3	84,3	89,5	88,9	91,9

\* Se considera Flotación de cobre como etapa aislada (alimentada por cola de Preflotación)



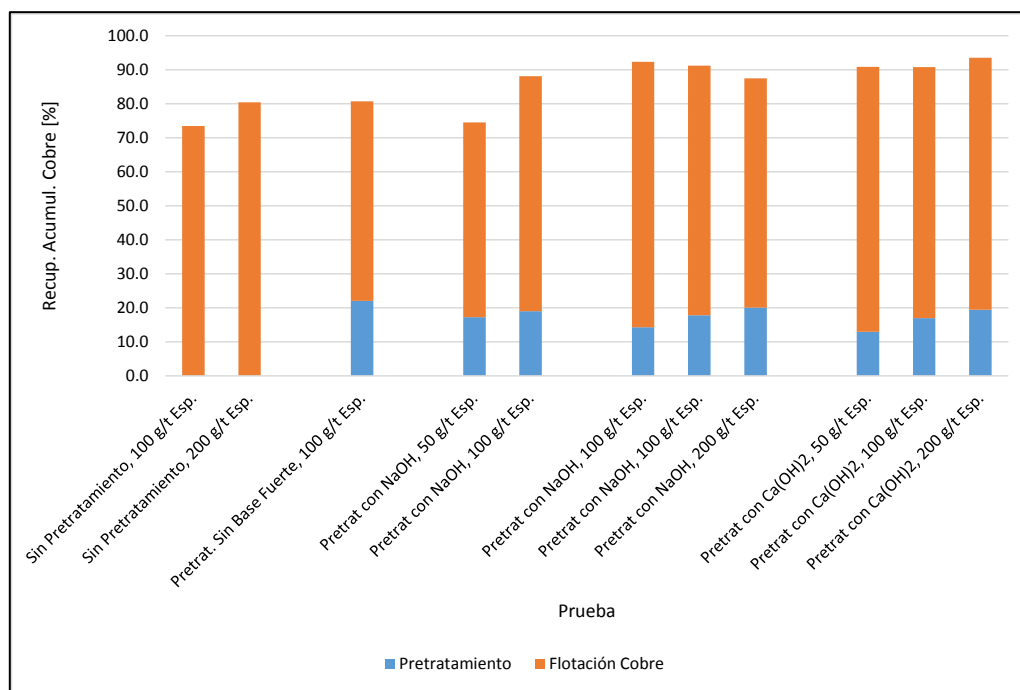


Figura 37: Resumen recuperación global de cobre para muestra CC

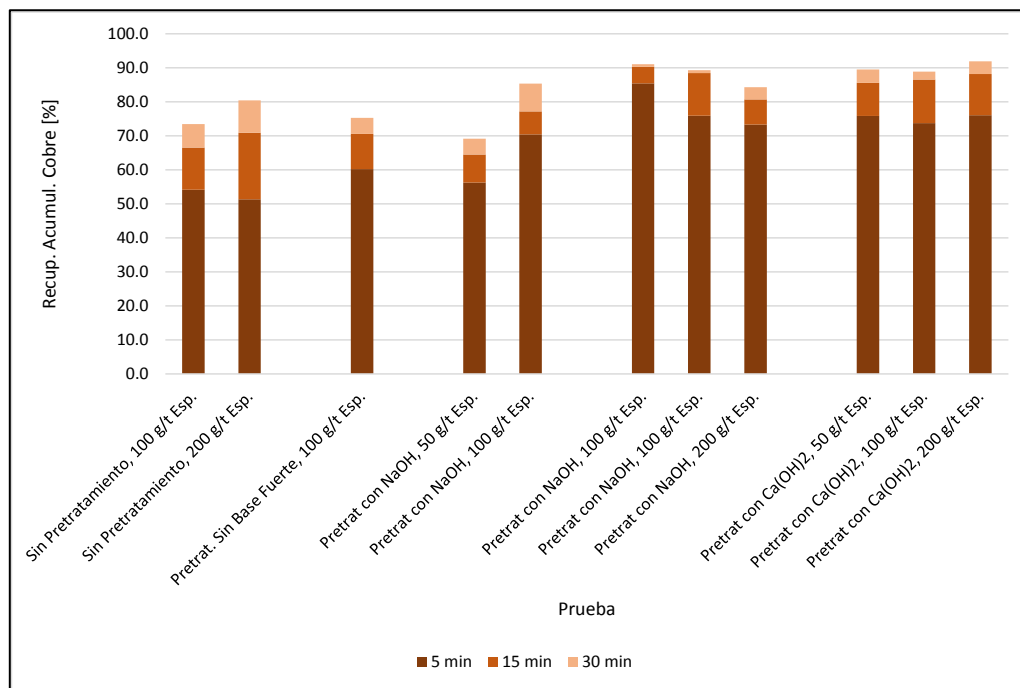


Figura 38: Resumen recuperación de cobre en flotación de cobre (considerada como etapa aislada, es decir calculada a partir de la cola de la preflotación) para muestra CC

## 5.2 Efecto de la preflotación en la ley del concentrado de cobre

A continuación se analiza el efecto que tiene la preflotación en la ley de cobre del concentrado de la flotación de cobre. Dado que las experiencias de flotación realizadas corresponden a una flotación primaria (rougher), se ha estimado como indicador la limpieza (ley) del concentrado el valor obtenido a cinco minutos de flotación.

Al revisar los valores de leyes, se puede deducir que se produce una mayor ley de cobre en el concentrado inicial.

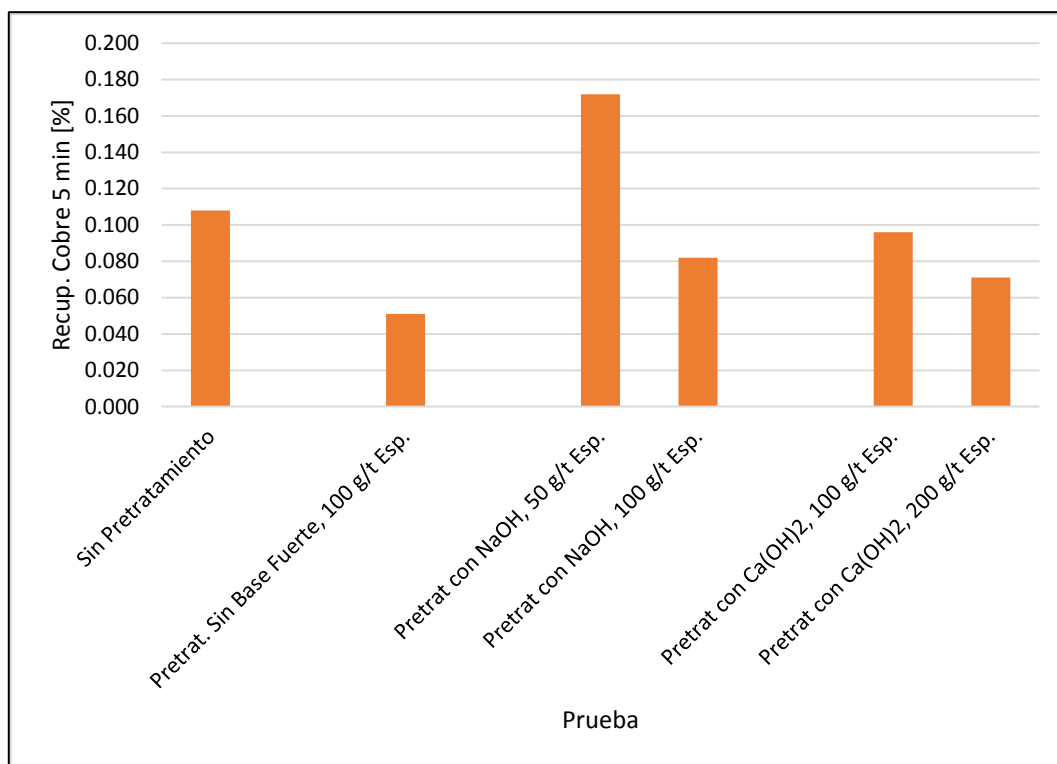
Además, en algunas pruebas se apreció un cambio en el color de la espuma inicial, lo que hace indica un menor contenido de carbono orgánico en este producto en relación al concentrado obtenido que se consigue sin un preflotación previo (ver Figura 48).

### 5.2.1 Resultados de la muestra AC

Para las pruebas realizadas con la muestra AC, se observa una gran dispersión en la ley del concentrado de los primeros cinco minutos (ver Tabla 47 y Figura 39). Esto se explica por la baja ley del mineral, lo que se asocia a un mayor error en el análisis químico.

Tabla 47: Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra AC

Muestra AC						
Test	2	10	13	14	23	24
Descripción	Sin Preflotación	Pretrat. sin Base Fuerte	Pretrat con NaOH	Pretrat con NaOH	Pretrat con Ca(OH) <sub>2</sub>	Pretrat con Ca(OH) <sub>2</sub>
Paquete	AC-14	AC-38	AC-34	AC-16	AC-17	AC-4
Dosis Espumante[g/t]	100	100	50	100	100	200
Ley Cu Flotación 5 min	0.108	0.051	0.172	0.082	0.096	0.071



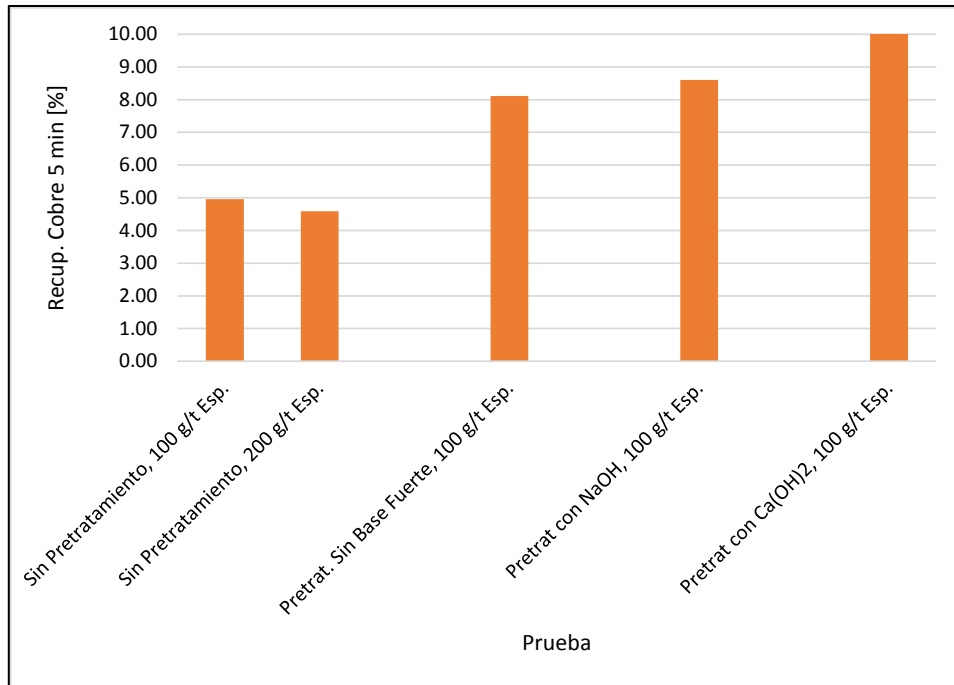
**Figura 39:** Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra BC

## 5.2.2 Resultados de la muestra BC

En el caso de la muestra BC, se observa un incremento significativo (casi se duplica) de la ley del concentrado de los primeros cinco minutos de la flotación de cobre, al comparar con las pruebas con y sin preflotación, tal como se muestra en la Tabla 48 y la Figura 40.

**Tabla 48:** Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra BC

Muestra BC					
Test	4	5	11	17	26
Descripción	Sin Preflotación	Sin Preflotación	Pretrat. sin Base Fuerte	Pretrat con NaOH	Pretrat con Ca(OH) <sub>2</sub>
Paquete	BC-5	BC-2	BC-11	BC-8	BC-17
Dosis Espumante[g/t]	100	200	100	100	100
Ley Cu Flotación 5 min	4,96	4,59	8,11	8,60	10,99



**Figura 40:** Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra BC

### 5.2.3 Resultados de la muestra CC

En el caso de la muestra CC, se observa un incremento, en algunos casos significativo, para casi todas las pruebas en la ley del concentrado de los primeros cinco minutos de la flotación de cobre, al comparar con las pruebas con y sin preflotación, tal como se muestra en la Tabla 48 y la Figura 40.

Las pruebas 20 y 21 (con NaOH como base fuerte) no muestran tal incremento. Incluso la prueba 20-B presenta una ley del concentrado menor a lo observado en las pruebas sin preflotación. Esto se podría explicar debido a derrames de pulpa que se produjeron en la celda de flotación luego de la preflotación, cuando la válvula de aire se cerraba para proceder al acondicionamiento previo a la flotación de cobre. Esto se resolvió en pruebas posteriores regulando el nivel de la celda durante la preflotación mediante la utilización de envases plásticos que se sumergían en la celda, tal como se explicó en la sección 3.4.

**Tabla 49:** Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra CC (parte 1)

Muestra CC					
Test	8	9	12	19	20-A

Descripción	Sin Preflotación	Sin Preflotación	Pretrat. sin Base Fuerte	Pretrat con NaOH	Pretrat con NaOH
Paquete	CC-23	CC-16	CC-17	CC-24	CC-4
Dosis Espumante [g/t]	100	200	100	50	100
Ley Cu Flotación 5 min	3,29	3,14	3,86	8,37	3,93

**Tabla 50: Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra CC (parte 2)**

Muestra CC						
Test	20-B	20-C	21	28	29	30
Descripción	Pretrat con NaOH	Pretrat con NaOH	Pretrat con NaOH	Pretrat con $\text{Ca(OH)}_2$	Pretrat con $\text{Ca(OH)}_2$	Pretrat con $\text{Ca(OH)}_2$
Paquete	CC-19	CC-1	CC-9	CC-20	CC-8	CC-13
Dosis Espumante [g/t]	100	100	200	50	100	200
Ley Cu Flotación 5 min	1,87	3,32	3,84	5,37	5,57	6,02

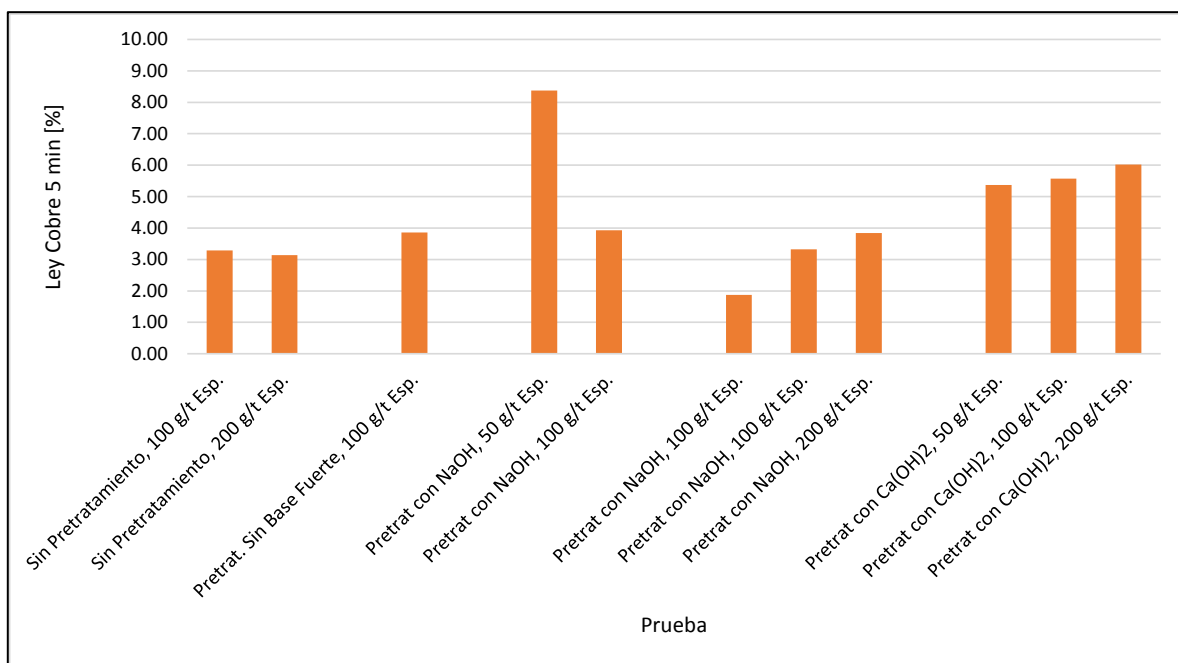


Figura 41: Efecto de la preflotación sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos en la flotación de cobre para la muestra CC

### 5.3 Efecto de la preflotación en el consumo de espumante

Un efecto notorio de la preflotación es que permite a la flotación de cobre trabajar con bajas dosificaciones de espumante: las pruebas sin preflotación y con dosificaciones de 50 g/t de espumante no producen una espuma estable, e incluso en algunas pruebas no se produce espuma. En la gran mayoría de las pruebas de flotación de cobre con preflotación sí se formó una espuma adecuada.

Al comparar la recuperación de cobre de las pruebas sin preflotación, se observa que la recuperación sube al duplicar la dosis de espumante, tal como se muestra en la Tabla 51. Esto explica la alta dosificación de espumante en la instalación industrial (200 g/t).

Tabla 51: Efecto de dosificación de espumante en recuperación de cobre, flotación de cobre. Pruebas sin preflotación

Muestra	Recuperación de cobre en Flotación de Cobre a los 30 minutos [%]	
	Espumante: 100 [g/t]	Espumante: 200 [g/t]
AC	55,6	-
BC	45,4	60,2

CC	73,5	80,5
----	------	------

En el caso de las pruebas de flotación de cobre con preflotación, el efecto en la recuperación de cobre de aumentar la dosis de espumante no es siempre notorio, especialmente al comparar los resultados entre 100 y 200 g/t. Esto se puede observar al comparar los resultados de las pruebas, para una misma muestra y una misma base fuerte, que se muestran en la Tabla 52 y la Tabla 53.

**Tabla 52: Efecto de dosificación de espumante en recuperación de cobre, flotación de cobre. Pruebas con preflotación. Base fuerte: NaOH**

Muestra	Recuperación de cobre en Flotación de Cobre a los 30 minutos [%]. Base fuerte: NaOH		
	Espumante: 50 [g/t]	Espumante: 100 [g/t]	Espumante: 200 [g/t]
AC	65,8	66,7	-
BC	-	83,7	-
CC	69,2	88,6*	84,3

\* Promedio de pruebas 20-A, 20-B y 20-C

**Tabla 53: Efecto de dosificación de espumante en recuperación de cobre, flotación de cobre. Pruebas con preflotación. Base fuerte: Ca(OH)<sub>2</sub>**

Muestra	Recuperación de cobre en Flotación de Cobre a los 30 minutos [%]. Base fuerte: Ca(OH) <sub>2</sub>		
	Espumante: 50 [g/t]	Espumante: 100 [g/t]	Espumante: 200 [g/t]
AC	-	60,2	59,9
BC	-	65,7	-
CC	89,5	88,9	91,9

## 5.4 Efecto de la preflotación en la cinética de la flotación de cobre

Para poder comparar la cinética de flotación de cobre, se ha utilizado el modelo cinético de Klimpel, dado que presentaba un buen ajuste (ver Anexo E). Este modelo toma la forma:

$$\text{Recuperación [\%]} = \mathbf{R_o} [\%] \times (1 - (1/\mathbf{k} \times t) \times (1 - \exp(-\mathbf{k} \times t)))$$

donde  $t$  es el tiempo de flotación [min], y  $k$  [ $\text{min}^{-1}$ ] y  $R_o$  [%] son los dos parámetros del modelo.  $R_o$  representa la recuperación máxima que se podría lograr con un tiempo de flotación infinito, y  $k$  corresponde a la rapidez o cinética de la flotación: a mayor valor de  $k$ , mayor es el incremento inicial de la recuperación en la prueba.

A cada prueba se le determinaron los parámetros del modelo utilizando la herramienta Solver de Excel, minimizando la suma de las diferencias absolutas entre la recuperación experimental y la proyectada por el modelo. Para poder comparar el efecto de la preflotación en la cinética, se compara el parámetro cinético “ $k$ ” del modelo de cada prueba.

Comparando el parámetro cinético de las pruebas con y sin preflotación, se observa que la flotación de cobre es más rápida en todos los casos que incluyen preflotación: sube desde el rango  $0,1-0,7 \text{ min}^{-1}$  al rango  $0,7-1,6 \text{ min}^{-1}$  (ver Tabla 54).

**Tabla 54: Efecto de la preflotación en cinética de recuperación de cobre, flotación de cobre**

Muestra	Parámetro cinético $k$ de modelo de Klimpel [ $\text{min}^{-1}$ ]							
	Sin Pretrat.		Pretrat. Base Fuerte: NaOH			Pretrat. Base Fuerte: $\text{Ca}(\text{OH})_2$		
	Esp. 100 [g/t]	Esp. 200 [g/t]	Esp. 50 [g/t]	Esp. 100 [g/t]	Esp. 200 [g/t]	Esp. 50 [g/t]	Esp. 100 [g/t]	Esp. 200 [g/t]
AC	0,170	-	0,655	1,325	-	-	1,328	0,965
BC	0,099	0,295	-	1,563	-	-	1,238	-
CC	0,656	0,433	0,957	1,621*	1,357	1,151	0,989	1,001

\* Promedio de pruebas 20-A, 20-B y 20-C

Cuando se analiza el efecto de la preflotación sin adición de una base fuerte sobre la cinética, los resultados también muestran una tendencia a aumentar la cinética (ver Tabla 55), aunque el aumento es menor que si se adiciona una base fuerte, para una misma dosificación de espumante.

**Tabla 55: Efecto de la preflotación en cinética de recuperación de cobre, flotación de cobre: Pruebas con preflotación sin una base fuerte**

Muestra	Parámetro cinético $k$ de modelo de Klimpel [ $\text{min}^{-1}$ ]	
	Sin Pretrat.	Con Pretrat. sin base fuerte



	Esp. 100 [g/t]	Esp. 200 [g/t]	Esp. 100 [g/t]
AC	0,170	-	1,229
BC	0,099	0,295	0,123
CC	0,656	0,433	0,875

El hecho que se tenga una cinética de flotación más rápida es equivalente a afirmar que se alcanzan niveles de recuperación mayores para un tiempo dado, cuando se ha aplicado la preflotación. Esto se ha reflejado en que la recuperación de cobre a los cinco minutos de la flotación de cobre es mayor en aquellas pruebas que incluyen preflotación que aquellas sin esta etapa previa, tal como se mostró en la Figura 34, la Figura 36, y la Figura 38.

Corroborando lo anterior, se ha construido el gráfico mostrado en la Figura 42. Esta muestra los valores de recuperación de cobre en la flotación de cobre obtenidos con paquetes preparados a partir de la muestra CC. La recuperación mostrada corresponde a las pruebas sin preflotación, y a las pruebas con preflotación y limpieza del concentrado de la preflotación. Se ha considerado una pérdida de cobre por arrastre junto con el carbono orgánico de 3%, dentro del rango obtenido experimentalmente.

Se puede apreciar que la recuperación es significativamente mayor en las pruebas con preflotación. Además, al notar la asintoticidad de la curva de recuperación, se hace notar que esta alcanza valores similares al máximo alrededor de los 15 minutos. En cambio en las pruebas sin preflotación se observa que la curva de recuperación no ha llegado al máximo al cabo de 30 minutos: se requeriría de más tiempo. Dado que a mayor tiempo de flotación mayor es la contaminación del concentrado de cobre con impurezas, se abre la posibilidad de optimizar el proceso reduciendo el tiempo de flotación de cobre después de la preflotación y con ello mejorando la ley del concentrado. Esto implica una menor exigencia sobre las etapas de limpieza aguas abajo: mejor ley del concentrado primario y menores volúmenes de pulpa en relación con una flotación de cobre sin preflotación.

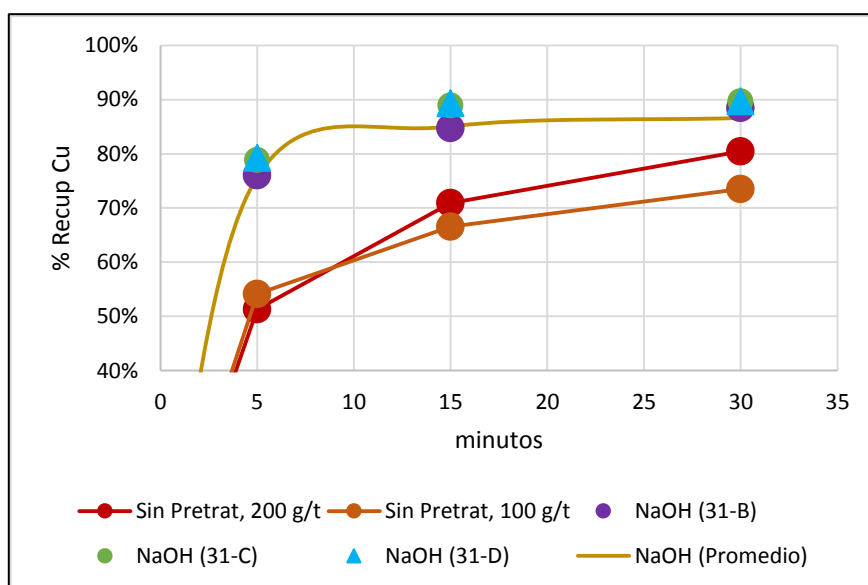


Figura 42: Comparación de resultados de recuperación de flotación de cobre, calculada respecto a mineral alimentado

## 5.5 Diferencias entre las bases fuertes probadas

Las pruebas se realizaron utilizando dos bases fuertes: NaOH y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Queda abierto el estudio del efecto de otras bases fuertes.

Analizando cada uno de los efectos mencionados en las secciones anteriores (secciones 5.1 a 5.4), se puede observar lo siguiente:

### 5.5.1 Efecto sobre la recuperación de cobre

Para las muestras AC y CC se observa que el NaOH produce una mayor recuperación que el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , siendo el efecto menor para la muestra CC.

Para la muestra BC se observa el efecto inverso, que el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  produce una mayor recuperación que el NaOH.

Dado que la cantidad de pruebas realizadas es reducida, se ha concluido que no se puede establecer a priori que una base produzca un mayor aumento de la recuperación que la otra. Se deben realizar más pruebas para tener una mayor certeza en este punto.

Tabla 56: Efecto de la base fuerte utilizada en la recuperación de cobre de la flotación de cobre. Dosificación de espumante: 100 g/t

Muestra	AC		BC		CC	
Base fuerte	NaOH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	NaOH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	NaOH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$

Recup. cobre en flotación de cobre [%]						
5 min	58,6	52,1	73,5	56,6	77,3*	73,7
15 min	66,6	57,3	77,9	63,7	85,3*	86,6
30 min	66,7	60,2	83,7	65,7	88,6*	88,9

\* Promedio de pruebas 20-A, 20-B y 20-C

### 5.5.2 Efecto sobre la ley del concentrado de cobre

Al igual que se hizo en la sección 5.2, se comparan las leyes logradas tras cinco minutos de flotación de cobre.

Para las tres muestras estudiadas (AC, BC y CC), se observa que concentrado de la flotación de cobre a los cinco minutos tiene mayor ley de cobre para las pruebas donde se utilizó  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como base fuerte, en relación con las pruebas donde se utilizó  $\text{NaOH}$  (ver Tabla 57).

Sin embargo, dado que la cantidad de pruebas realizadas es reducida, se ha concluido que no se puede establecer a priori que una base produzca un mayor ley de cobre que la otra. Se deben realizar más pruebas para tener una mayor certeza en este punto.

**Tabla 57: Efecto de la base fuerte utilizada en la ley de cobre obtenida a los 5 minutos de la flotación de cobre. Dosificación de espumante: 100 g/t**

Muestra	AC		BC		CC	
Base fuerte	NaOH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	NaOH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	NaOH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Ley de cobre en flotación de cobre [%]						
5 min	0,082	0,096	8,60	10,99	3,04*	5,57

\* Promedio de pruebas 20-A, 20-B y 20-C

### 5.5.3 Efecto sobre el consumo de espumante

Las pruebas realizadas se ejecutaron con tres niveles de espumante: 50, 100 y 200 g/t. No se probaron los tres niveles de espumante para las tres muestras.

Ambas bases fuertes han permitido flotar con menores concentraciones de espumante. En las pruebas sin preflotación, no se logró formar una espuma estable, y en algunos casos ni siquiera se formó espuma, cuando la dosificación de espumante era de 50 g/t.

Se puede analizar el efecto de la combinación de la dosis de espumante y de la base fuerte utilizada sobre la recuperación de cobre y sobre y la ley de cobre del concentrado.

En el caso de la recuperación de cobre en la flotación de cobre, en las muestras AC y BC la recuperación es mayor cuando se utiliza NaOH como base fuerte. En cambio, para la muestra CC la recuperación es mayor cuando se utiliza Ca(OH)<sub>2</sub> como base fuerte (ver Tabla 58).

**Tabla 58: Efecto de la dosificación de espumante sobre la recuperación de cobre en la flotación de cobre, según la base fuerte utilizada**

Muestra	AC		BC		CC	
Base fuerte	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>
Recuperación de cobre a los 30 minutos						
50 [g/t]	65,8	-	-	-	69,2	89,5
100 [g/t]	66,7	60,2	83,7	65,7	88,6*	88,9
200 [g/t]	-	59,9	-	-	84,3	91,9

\* Promedio de pruebas 20-A, 20-B y 20-C

En el caso de la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos de la flotación de cobre, en las muestras AC y BC la ley es mayor cuando se utiliza Ca(OH)<sub>2</sub> como base fuerte. En cambio, para la muestra CC no se puede establecer una regla (ver Tabla 59).

**Tabla 59: Efecto de la dosificación de espumante sobre la ley de cobre del concentrado de los primeros cinco minutos de la flotación de cobre, según la base fuerte utilizada**

Muestra	AC		BC		CC	
Base fuerte	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>
Ley de cobre a los 5 minutos						
50 [g/t]	0,172	-	-	-	8,37	5,37
100 [g/t]	0,082	0,096	8,60	10,99	3,04*	5,57
200 [g/t]	-	0,071	-	-	3,84	6,02

\* Promedio de pruebas 20-A, 20-B y 20-C

Dada que la cantidad de pruebas realizadas es reducida, se ha concluido que no se puede establecer a priori que una base produzca una mejor recuperación o una mayor ley de cobre que la otra. Se deben realizar más pruebas para tener una mayor certeza en este punto.

#### 5.5.4 Efecto sobre la cinética de la flotación de cobre.

En base a los resultados de las pruebas realizadas, no se puede establecer cuál es el efecto de las bases fuertes utilizadas sobre la cinética de la flotación, expresada a través del parámetro  $k$  del modelo de Klipbell. En algunas pruebas es más rápida la cinética cuando se utiliza NaOH, en otras cuando se utiliza  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (ver Tabla 60). La cantidad de pruebas realizadas es reducida, se deben realizar pruebas adicionales con el fin de poder establecer una tendencia sobre este punto.

Tabla 60: Efecto de la base fuerte utilizada sobre la cinética de la flotación de cobre

Muestra	AC		BC		CC	
	NaOH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	NaOH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	NaOH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Parámetro cinético $k$ [ $\text{min}^{-1}$ ]						
50 [g/t]	0,655	-	-	-	0,957	1,151
100 [g/t]	1,325	1,328	1,563	1,238	1,621*	0,989
200 [g/t]	-	0,965	-	-	1,357	1,001

\* Promedio de pruebas 20-A, 20-B y 20-C

#### 5.6 Preflotación sin adición de una base fuerte

Cuando se analizan los resultados obtenidos al flotar el carbono orgánico sin agregar una base fuerte, se observa una mejora en los resultados obtenidos en la flotación de cobre respecto a las pruebas sin preflotación. Esta mejora es menos significativa que la observada al utilizar una base fuerte.

Se observa visualmente que el carbono orgánico flota y se puede retirar. Es probable que la cinética de flotación del carbono orgánico sea más lenta, y que el tiempo establecido para esta etapa (30 minutos) haya sido insuficiente para apreciar el impacto en la flotación de cobre.

## 5.7 Efecto de una etapa de limpieza del concentrado de la preflotación en la recuperación de cobre

Como se indicó en la sección 4.2, y se muestra en los resultados expuestos en la sección 5.1, una parte del cobre contenido en el mineral sale junto con el concentrado de la preflotación (entre un 14 y un 46%). Desde un punto de vista económico, esto es una pérdida. Este amplio rango se explica por la dificultad encontrada durante la prueba para controlar el rebose de carbono orgánico y pulpa: las pruebas que se realizaron al comienzo de la campaña presentan los valores más altos, y las pruebas realizadas al final de la campaña presentan los valores más bajos.

Se postuló que el cobre que sale con el concentrado de la preflotación lo hace por arrastre mecánico. Esto es, el cobre sale como parte de la pulpa que rebosa de la celda junto con el carbono orgánico. Los resultados de las pruebas (ver Tabla 61 y Tabla 62) apuntaron en esta dirección, dado que:

- Se observó que la recuperación de cobre en la etapa de preflotación es similar a la recuperación de sólidos (ver Figura 43).
- Se observó que la ley de cobre del concentrado de la preflotación es similar a la ley del mineral (ver Figura 44).

**Tabla 61: Comparación de recuperaciones y leyes en preflotación, muestras AC y BC**

Muestra	AC					BC		
Ley Cu mineral [%]	0,0185					2,53		
Test	10	13	14	23	24	11	17	26
Paquete	AC-38	AC-34	AC-16	AC-17	AC-4	BC-11	BC-8	BC-17
Ley Cu Conc. Pretrat. [%]	0,016	0,049	0,021	0,024	0,023	2,37	2,37	2,33
Recup. Sólidos [%]	33,3	34,3	33,8	31,6	25,7	29,9	25,6	27,0
Recup. Cobre en Pretrat. [%]	32,6	46,1	32,8	33,4	24,0	35,7	25,3	23,3

**Tabla 62: Comparación de recuperaciones y leyes en preflotación, muestra CC**

Muestra	CC								
Ley Cu mineral [%]	1,153								
Test	12	19	20-A	20-B	20-C	21	28	29	30

Paquete	CC-17	CC-24	CC-4	CC-19	CC-1	CC-9	CC-20	CC-8	CC-13
Ley Cu Conc. Pretrat. [%]	1,180	1,200	1,150	1,213	1,008	1,170	1,023	1,062	1,034
Recup. Sólidos [%]	21,0	17,5	19,4	10,5	17,6	19,4	15,1	18,8	22,0
Recup. Cobre en Pretrat. [%]	22,1	17,3	19,0	14,3	17,8	20,1	13,0	17,0	19,4

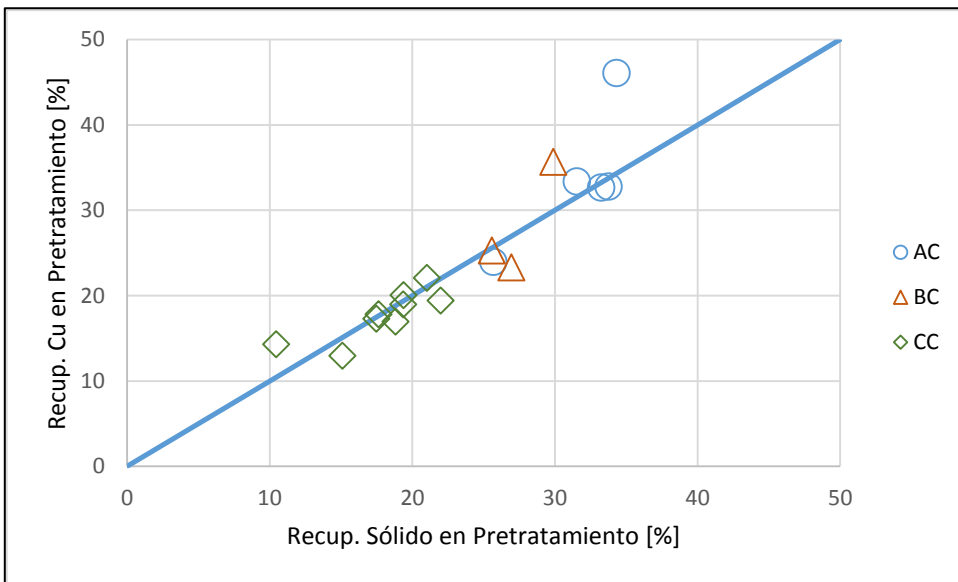
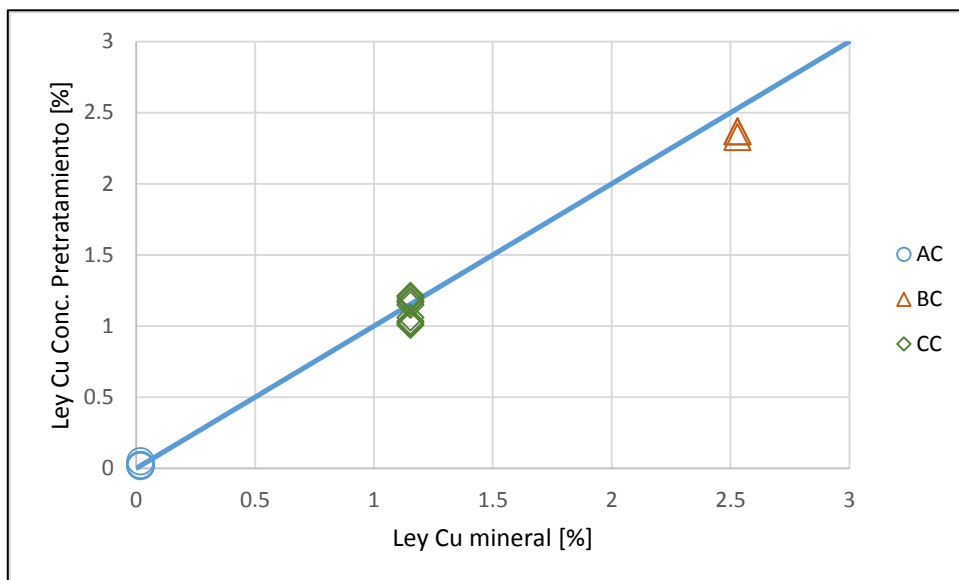


Figura 43: Comparación entre recuperación de sólido y recuperación de cobre en etapa de preflotación.



**Figura 44: Comparación entre ley de cobre de mineral y ley de cobre del concentrado de preflotación.**

Por esta razón, se efectuaron pruebas incluyendo una etapa de limpieza del concentrado de la preflotación, tal como se describen en la sección 3.5.5, y cuyos resultados se mostraron en la sección 4.8. Todas las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones (granulometría, dosificación reactivos).

Los resultados de las pruebas realizadas incluyendo etapa de limpieza permiten concluir que:

- Las pruebas mostraron que se puede reducir la pérdida de cobre en la preflotación mediante etapas de limpieza del concentrado de esta etapa, desde niveles del 15 a 20%, a niveles de 3 a 6% (ver Tabla 63). Mejorando los procedimientos de limpieza, o bien aumentado la cantidad de etapas de limpieza, es esperable que esta pérdida de cobre en el concentrado de carbono orgánico se reduzca aún más.
- El cobre que sale con el carbono orgánico en la etapa de limpieza lo hace por arrastre mecánico, similarmente a lo que ocurre en la etapa de preflotación (ver Figura 45, comparar con Figura 44). Por tanto, minimizando este arrastre se minimiza la pérdida de cobre en el concentrado de carbono orgánico.

**Tabla 63: Comparación de recuperaciones y leyes en pruebas con limpieza del concentrado de la preflotación, muestra CC**

Muestra	CC	CC (pruebas con limpieza)				
Ley Cu mineral [%]	1,153	1,153				
Test	20*	31-A	31-B	31-D	31-C	Promedio
Paquete	-	CC-15	CC-21	CC-7	CC-10	-
Preflotación						
Ley Cu Concentrado [%]	1,124	1,006	1,161	1,048	1,119	1,083
Recup. Sólidos [%]	15,8	2,2	3,6	3,9	4,9	3,6
Recup. Cobre [%]	17,0	2,9	3,6	3,8	6,2	4,1

\* Promedio de pruebas 20-A, 20-B y 20-C



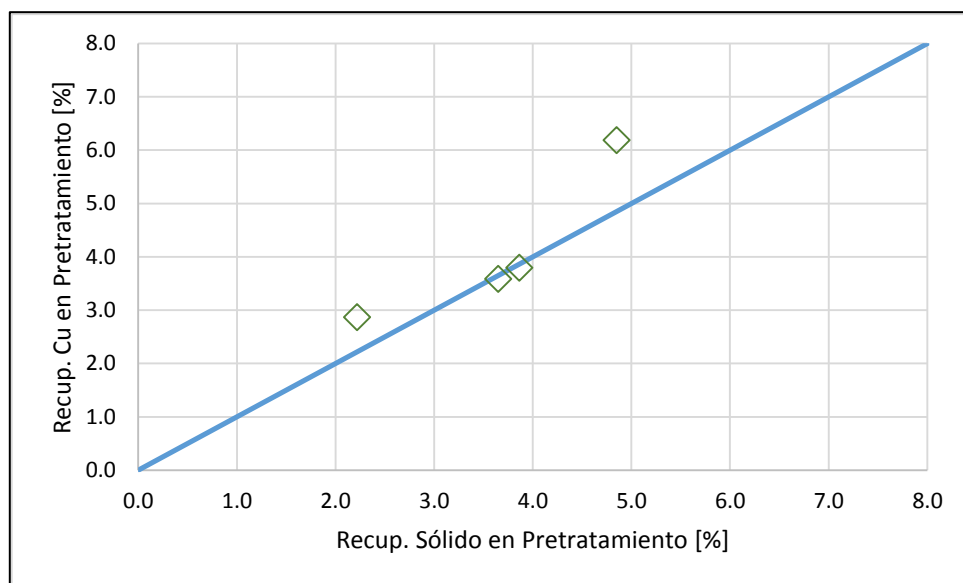


Figura 45: Comparación entre recuperación de sólido y recuperación de cobre en etapa de limpieza de la preflotación

- No se observa un efecto negativo en la flotación de cobre producto de recircular la cola de la etapa de limpieza. Comparando las recuperaciones de cobre, la ley del concentrado de cobre inicial, y la cinética de la flotación de cobre se observan valores similares entre las pruebas donde se recirculó la colas de la etapa de limpieza versus las pruebas anteriores donde no se incluyó una etapa de limpieza (ver Tabla 64).

Tabla 64: Comparación de recuperaciones y leyes en pruebas con limpieza del concentrado de la preflotación, muestra CC

Muestra	CC	CC (pruebas con limpieza)				
Ley Cu mineral [%]	1,153	1,153				
Test	20*	31-A	31-B	31-D	31-C	Promedio
Paquete	-	CC-15	CC-21	CC-7	CC-10	-
Recup. Cu en Flot. de Cobre [%]						
5 min	77,3	79,3	78,8	76,4	76,0	77,6
15 min	85,3	89,3	88,9	89,5	84,8	88,1
30 min	88,6	89,7	89,7	90,2	88,5	89,5

Ley de Cu en Flot. de cobre [%] a los 5 min	3,042	4,108	1,989	1,650	7,154	3,725
Parámetro cinético k [min <sup>-1</sup> ]	1,124	1,048	1,119	1,006	1,161	1,271

\* Promedio de pruebas 20-A, 20-B y 20-C

- No fue posible estudiar el comportamiento del carbono orgánico en la etapa de limpieza por razones presupuestarias, por lo que queda abierto completar este estudio.

### 5.8 Cinética de la extracción de carbono orgánico

Por razones presupuestarias, se debió restringir la cantidad de análisis de carbono orgánico programada. Esto implicó que se analizaron únicamente los tres primeros concentrados de las pruebas realizadas a las muestras AC (1,95% de carbono orgánico) y BC (0,83% de carbono orgánico). En estas muestras, la etapa de preflotación se dividió en dos partes, de 15 minutos cada una, cada etapa con su concentrado. No se analizó por carbono orgánico las pruebas hechas a la muestra CC por razones presupuestarias.

Las pruebas mostraron que en la etapa de preflotación se logra extraer una parte del carbono orgánico, aparentemente presente en la forma de bitumen. Sin embargo, la extracción no es completa, y esta continúa durante la flotación de cobre: el carbono orgánico sale junto con el concentrado de cobre dándole un característico color oscuro. Esto también se observa porque las colas de la flotación de cobre tienen un color gris claro, indicando que se el mineral se ha empobrecido de carbono orgánico y otros elementos de color oscuro (ver Figura 46 y Figura 47).



**Figura 46: Bolsas con producto de pruebas. Notar que el material es más oscuro en las bolsas superiores (concentrado preflotación o primer concentrado de flotación de cobre) y más claro en las bolsas inferiores (colas), indicando que el sólido se va empobreciendo en carbono orgánico.**

Concentrado 0-5 min (C1)	Concentrado Pretratamiento (C1)	Concentrado Pretratamiento (C1)	Concentrado Pretratamiento (C1)	Concentrado 0-5 min (C1)	Concentrado 0-5 min (C1)
Concentrado 5-15 min (C2)	Concentrado 0-5 min (C2)	Concentrado 0-5 min (C2)	Concentrado 0-5 min (C2)	Concentrado 5-15 min (C2)	Concentrado 5-15 min (C2)
Concentrado 15-30 min (C3)	Concentrado 5-15 min (C3)	Concentrado 5-15 min (C3)	Concentrado 5-15 min (C3)	Concentrado 15-30 min (C3)	Concentrado 15-30 min (C3)
Concentrado 15-30 min (C4)	Concentrado 15-30 min (C4)	Concentrado 15-30 min (C4)	Concentrado 15-30 min (C4)	Concentrado 15-30 min (C3)	Concentrado 15-30 min (C3)
Cola Flot. de Cobre	Cola Flot. de Cobre	Cola Flot. de Cobre	Cola Flot. de Cobre	Cola Flot. de Cobre	Cola Flot. de Cobre
Test N° 19 Paquete CC-24	Test N° 20-A Paquete CC-4	Test N° 12 Paquete CC-17	Test N° 21 Paquete CC-9	Test N° 9 Paquete CC-16	Test N° 8 Paquete CC-23

**Figura 47: Distribución de bolsas con productos de pruebas mostradas en la Figura 46**

### 5.8.1 Cinética de la extracción de carbono orgánico para la muestra AC

Para las pruebas hechas con la muestra AC (ver Tabla 65), se logró extraer entre un 26 y un 30% del carbono orgánico del mineral durante los 30 minutos que duró la preflotación. La prueba N° 9 se aleja de las otras pruebas con preflotación, con una extracción de 38%.

**Tabla 65: Recuperación de carbono orgánico en pruebas hechas con muestra AC**

Test	1	7	9	10	16	17
Paquete	AC-14	AC-38	AC-34	AC-16	AC-17	AC-4

Base fuerte	-	-	NaOH	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>
Dosis base fuerte [kg/t]	-	-	4,0	4,0	3,7	3,7
Dosis espumante [g/t]	100	100	50	100	100	200
Recup C Orgán. Acum. [%]						
Preflotación						
15 min	-	12,1	24,6	20,2	10,1	16,7
30 min	-	29,9	37,5	29,5	27,7	26,2
5 min de Flot. de cobre	10,4	50,3	45,2	55,1	45,8	45,7
Recup C Orgán. Acum. en Flot. de cobre [%]						
5 min	10,4	29,1	12,3	36,4	25,1	26,4
15 min	28,9	*	*	*	*	*
30 min	40,5	*	*	*	*	*

\* No se analizaron los productos correspondientes a estos tiempos por razones presupuestarias.

Al analizar la flotación como etapa aislada, se observa que en los primeros cinco minutos se extrae entre un 25 y un 36% del carbono orgánico alimentado, que equivale a un 18 a 26% del carbono orgánico contenido en el mineral. Para el caso de la prueba N° 9 ya mencionada, esta cantidad es menor, 12% del alimentado a la flotación, equivalente al 8% del contenido en el mineral. Se produce una redistribución del carbono extraído, pues en todas las pruebas con preflotación la cantidad de carbono orgánico extraído hasta los primeros cinco minutos de flotación de cobre se ubican en el rango de 45 a 55% del contenido en el mineral (ver Tabla 66). Esto indicaría que en la prueba N° 9 (por alguna razón) se extrajo una mayor cantidad de carbono orgánico durante la preflotación en relación con las otras pruebas, y que durante la flotación de cobre se compensó con una menor extracción.

**Tabla 66: Comparación de resultados de recuperación de carbono orgánico para pruebas con preflotación realizadas con la muestra AC**

Test	7	9	10	16	17
Paquete	AC-38	AC-34	AC-16	AC-17	AC-4
Base fuerte		NaOH	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>

Recup. C orgánico [%]					
Preflotación 30 min	29,9	37,5	29,5	27,7	26,2
Flot. de cobre 5 min	20,4	7,7	25,7	18,1	19,5
Acumulado	50,3	45,2	55,1	45,8	45,7

Al analizar la prueba N° 1, que no incluye preflotación, se observa que en la flotación de cobre también se extrae carbono orgánico. A los 15 minutos de flotación, la fracción de carbono orgánico extraída es semejante a la que se consigue con la preflotación de 30 minutos en la mayoría de las pruebas: 29%. En los 15 minutos restantes de flotación de cobre, la extracción de carbono (40%) alcanza niveles intermedios entre lo alcanzado tras 30 minutos de preflotación (26 a 38%) y lo alcanzado tras cinco minutos de flotación de cobre (45 a 55%). Es decir, se puede afirmar que los reactivos de flotación facilitan que el carbono orgánico salga junto con el concentrado de cobre, aún sin la adición de una base fuerte.

### 5.8.2 Cinética de la extracción de carbono orgánico para la muestra BC

Para las pruebas hechas con la muestra AC (ver Tabla 67), se logró extraer entre un 38 y un 60% del carbono orgánico del mineral durante los 30 minutos que duró la preflotación.

Tabla 67: Recuperación de carbono orgánico en pruebas hechas con muestra BC

Test	5	6	8	13	19
Paquete	BC-5	BC-2	BC-11	BC-8	BC-17
Base fuerte	-	-	-	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>
Dosis base fuerte [kg/t]	-	-	-	4,0	3,7
Dosis espumante [g/t]	100	200	100	100	100
Recup C Orgán. Acum. [%]					
Preflotación					
15 min	-	-	29,5	30,3	19,0
30 min	-	-	48,1	60,6	37,6
5 min de Flot. de cobre	29,0	46,8	48,3	61,5	38,3
Recup C Orgán. Acum. en Flot. de cobre [%]					

5 min	29,0	46,8	0,4	2,4	1,0
15 min	58,5	74,7	*	*	*
30 min	71,1	75,1	*	*	*

\* No se analizaron los productos correspondientes a estos tiempos por razones presupuestarias.

Al analizar la flotación como etapa aislada, se observa que la extracción de carbono orgánico es significativamente más baja que para las pruebas con la muestra AC: 0,4 a 2,4% para la muestra BC. Es decir, se puede pensar que en el caso de la muestra BC la extracción de carbono orgánico alcanzable (aquella fracción que se puede extraer es más completa producto que el contenido de carbono orgánico de la muestra BC (0,83%) es menor que el de la muestra AC (1,95%) y se habría completado casi totalmente durante la preflotación.

Al analizar las pruebas N° 5 y 6, que no incluye preflotación, se observa que en la flotación de cobre algo similar a lo descrito para la muestra AC: se extrae carbono orgánico. A los 15 minutos de flotación, la fracción de carbono orgánico extraída es del mismo orden que la que se consigue con la preflotación de 30 minutos en la mayoría de las pruebas: 29 a 47%. En los 15 minutos restantes de flotación de cobre, la extracción de carbono (59 a 75%) supera los niveles similares a los alcanzados a los cinco minutos de flotación de cobre cuando existe un preflotación (48 a 61%). Nuevamente se puede afirmar que los reactivos de flotación facilitan que el carbono orgánico salga junto con el concentrado de cobre, aún sin la adición de una base fuerte.

### 5.8.3 Cinética de la extracción de carbono orgánico para la muestra CC

Como ya se indicó, no se analizaron los productos de las pruebas realizadas con la muestra CC por razones presupuestarias.

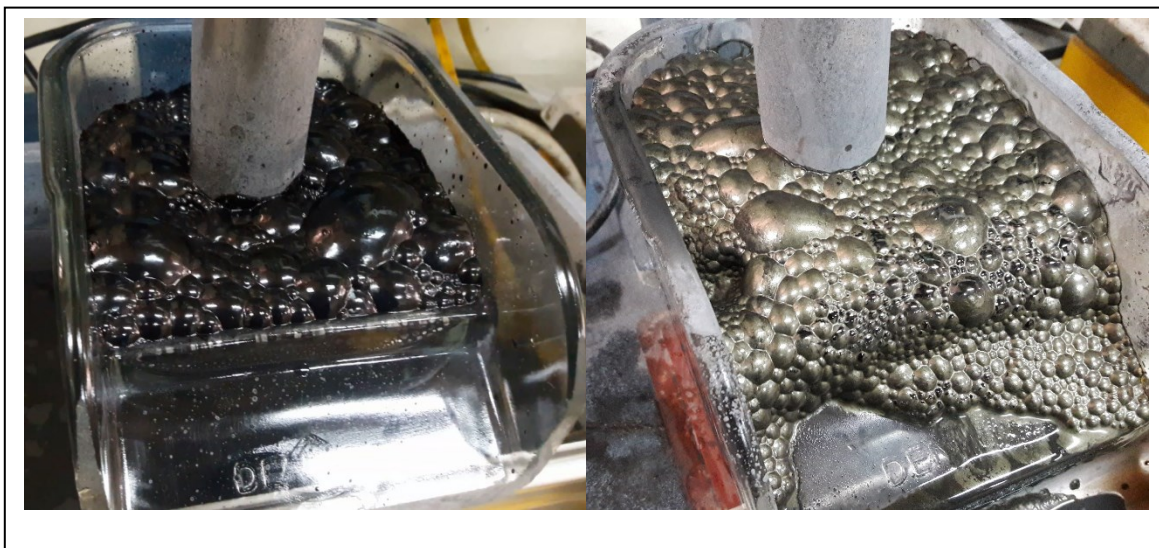
## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS

### 6.1 Conclusiones de la presente tesis

- Se realizaron pruebas de flotación con tres muestras de mineral, las que fueron chancadas bajo 10 mallas y divididas en paquetes de 400 gramos. Las muestras se denominaron:
  - AC: visualmente su contenido de carbono orgánico es alto. Se dividió en 30 paquetes. Su contenido de cobre resultó ser muy bajo (0,0185%), por lo que no se completó el programa de pruebas con esta muestra.
  - BC: visualmente su contenido de carbono orgánico es bajo. Se dividió en 20 paquetes. Durante las pruebas de cinética de molienda se ajustó el compresor asociado al equipo pulverizador. Los resultados de recuperaciones de cobre fueron bajos, se sospecha que esto se debe a una molienda insuficiente, tal como se explica en la sección 3.3. Por ello, no se completó el programa de pruebas con esta muestra.
  - CC: visualmente su contenido de carbono orgánico es alto. Se construyó esta muestra dadas la baja ley de cobre encontrada en la muestra AC. Se dividió en 25 paquetes. Con esta muestra se lograron reproducir los resultados que se obtienen en la instalación industrial y en el laboratorio metalúrgico de la minera. Con esta muestra se completó el programa de pruebas.
- A partir de los resultados experimentales, se puede concluir que la flotación previa de carbono orgánico permite reducir el contenido de bitumen del mineral de cobre probado. Esto permite que una posterior flotación de cobre entregue mejores recuperaciones, cinéticas más rápidas, concentrados más limpios, y un menor consumo de espumante.

Al comparar los resultados de flotar cobre con o sin una flotación previa de carbono orgánico, se observa que:

- Al agregar una base fuerte en el preflotación, se logra una mayor recuperación de cobre en la flotación de cobre (88 a 90% versus 80 a 82% sin preflotación para la muestra CC).
- En la mayoría de las pruebas realizadas, se observa una mejor ley del concentrado de los primeros cinco minutos de la flotación de cobre (sube de 4,7-5,0 a 8-11% para la muestra BC, de 3,0-3,5 a 4,0 a 5,5% de cobre para la muestra CC). Además, visualmente se observa un color más claro en la primera espumación de esta etapa. (ver Figura 48).
- Se requiere una menor dosis de espumante. Se forma una espuma estable con tan solo 50 g/t de espumante. Sin la preflotación, la espuma formada con esta dosis es insuficiente y no permite realizar la flotación de cobre.
- Se observa que la cinética de flotación es más rápida. Al comparar la constante cinética (modelo de Klimpel), esta sube de 0,4 – 0,7 hasta 1,0 – 1,6 min<sup>-1</sup> para las pruebas realizadas con la muestra CC.



**Figura 48: Concentrado de cobre inicial sin preflotación (Test N° 2, paquete AC-14, izquierda) y con preflotación (Test N° 31-D, paquete CC-7, derecha). Nótese la diferencia en el color de la espuma debido a la mayor/menor presencia de bitumen (color negro).**

- Se analizó el efecto de la base fuerte agregada ( $\text{NaOH}$  o  $\text{Ca(OH)}_2$ ) sobre los siguientes aspectos:
  - Recuperación de cobre
  - Ley del concentrado
  - Consumo de espumante
  - Cinética de la flotación de cobre

Excepto en el caso de la ley del concentrado, donde se observó una mejor ley para el concentrado de los primeros cinco minutos en las pruebas que utilizaron  $\text{Ca(OH)}_2$  en lugar de  $\text{NaOH}$ , no se encontraron diferencias significativas entre ambas bases fuertes. E incluso en el caso de la ley del concentrado, dado que la cantidad de pruebas realizadas es reducida, se ha concluido que no se puede establecer a priori que la aplicación de una base u otra produzca mejores resultados. Se deben realizar más pruebas para tener una mayor certeza en este punto.

- Cuando se analizan los resultados obtenidos al flotar el carbono orgánico sin agregar una base fuerte, se observa una mejora en los resultados obtenidos en la flotación de cobre en relación con las pruebas sin preflotación, aunque su efecto es menor cuando se compara con las pruebas donde se agregó una base fuerte.
- Al considerar el efecto de la adición de espumante en la flotación de cobre, se observa en primer lugar que la preflotación permite la formación de una espuma estable con menores dosificaciones de espumante. No se observa una correlación clara entre la recuperación, la ley del concentrado de cobre, o la cinética de flotación, y la dosificación de espumante. Se sabe, a partir de la experiencia industrial, que la recuperación aumenta pero se deteriora la calidad de los concentrados. La cantidad de pruebas realizadas es reducida, y se deben realizar pruebas adicionales con el fin de poder establecer una tendencia sobre este punto.
- La recuperación de carbono orgánico en la preflotación no es completa (entre 30 y 40%). El resto del carbono se continúa recuperando en la flotación de cobre.



- El concentrado de carbono orgánico arrastra pulpa conteniendo cobre, entre un 15 y un 20% en las experiencias de laboratorio. Esto significa que la recuperación de cobre en la flotación de cobre respecto al mineral fresco alimentado es baja (70 a 78%) en relación a lo que se consigue si no hay preflotación (80 a 82%) producto del arrastre de cobre con el carbono orgánico. Esto tiene un impacto directo sobre la economía del negocio minero (se produce menos cobre).

Se ha demostrado que el cobre contenido en el concentrado de carbono no está ligado al carbono sino que es arrastrado mecánicamente junto con la pulpa. Se realizaron algunas pruebas donde este concentrado se limpiaba mediante una nueva flotación, sin adición de reactivos. Las colas de esta etapa de limpieza se unían con las colas de la flotación de carbono orgánico y juntas se flotaban por cobre.

Los resultados de las pruebas confirman la hipótesis que se puede mejorar la recuperación de cobre en el concentrado de cobre mediante etapas de limpieza del concentrado de carbono orgánico. En las pruebas realizadas, se logró reducir el cobre arrastrado desde el rango 15 a 20% a un rango 3 a 6%. Con ello, la recuperación de cobre en la flotación de cobre, tomando como base el mineral alimentado, aumenta desde 70 a 78% hasta valores sobre 88%, superando en 5 a 8 puntos la recuperación lograda sin la preflotación.

- Con etapas de limpieza adicionales, o bien con un equipamiento más adecuado, la pérdida de cobre en la preflotación podría ser aún menor.
- La bibliografía indica que en la industria de las arenas bituminosas se utilizan celdas de flotación convencionales cuando los contenidos de carbono orgánico no son altos. Además, los resultados de las pruebas experimentales muestran que la cinética de flotación se acelera y por ende se reduce el tiempo de flotación. Esto permite visualizar que la implementación de una etapa de preflotación a una instalación industrial que ya esté operando se puede efectuar reconvirtiendo parte de las celdas de flotación utilizadas para la flotación de cobre en celdas dedicadas al preflotación, reduciendo de este modo las inversiones requeridas.
- Considerando una instalación industrial típica, un diagrama de flujos contiene las etapas unitarias de molienda y flotación de cobre. Sus salidas corresponden al concentrado de cobre (producto) y el relave o colas que va a su depositación al tranque. La incorporación de una etapa de preflotación se hace entre las etapas de molienda y de flotación de cobre. Ver Figura 49.

Dado que la preflotación produce un aumento en la cinética de la flotación de cobre, lo que permite una reducción en el tiempo de residencia de esta etapa, es posible considerar la utilización de parte de las celdas de flotación existentes en la instalación industrial para la preflotación, y reducir el tiempo de residencia de la flotación de cobre. Con ello, la inversión requerida para la implementación de la preflotación se puede reducir significativamente.

A modo ilustrativo, para un mineral con una ley de 1%, y considerando un aumento de la recuperación de 8 puntos porcentuales y un precio del cobre de 2,0 US\$/lb, tendría un aumento en sus ingresos de 3,5 US\$/t. Si se utiliza la base fuerte de menor costo de las estudiadas ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), con un precio en el rango de 0,1 US\$/t, el costo de este reactivo sería de 0,7 US\$ por tonelada de mineral. Y el ahorro por concepto de espumante sería de 0,15 US\$ por tonelada de mineral, considerando un ahorro de 100 g/t.

La Tabla 68 muestra estos montos si se considera una planta que procese 40 mil toneladas mensuales de mineral de cobre. Puede verse que se trata de un proyecto muy interesante desde un punto de vista económico, con un beneficio anual cercano a 1,4 millones de dólares.

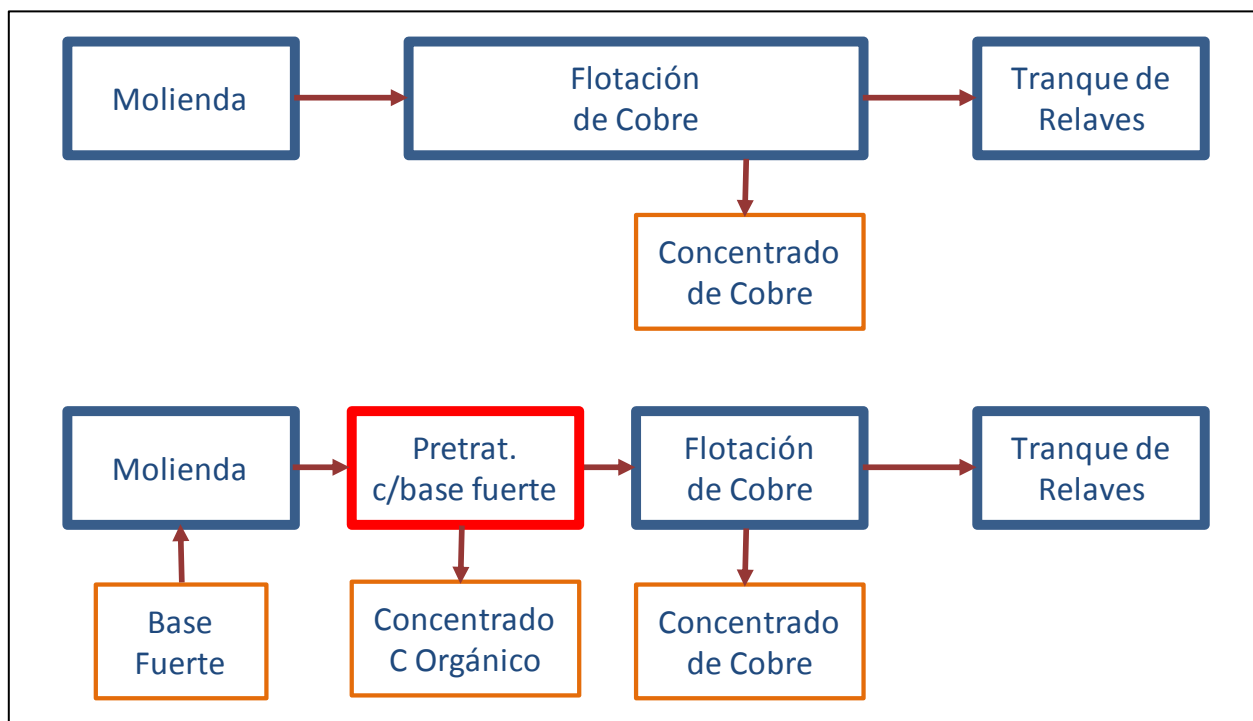


Figura 49: Arriba: circuito industrial de flotación de cobre. Abajo: circuito industrial, donde se ha incorporado una etapa de preflotación.

Tabla 68: Análisis económico para planta existente que procese 40 mil toneladas de mineral de cobre con una ley de 1%

Inversión asociada a equipos adicionales nuevos	A evaluar	
	US\$/t	KUS\$/mes
Ingresos adicionales por concepto de mayor recuperación	3,53	141
Ahorro por menor costo de transporte de concentrado	Depende ley del concentrado	
Ahorro por menor costo de fundición	Depende ley del concentrado	
Aumento costo por base fuerte	0,70	28
Aumento costo energía por equipos adicionales	A evaluar	
Ahorro costo por menor consumo espumante	0,15	6

## 6.2 Recomendaciones para futuros estudios

Este estudio no pretende ser exhaustivo, y quedarán pendientes para estudios posteriores todas las optimizaciones que se puedan realizar. Entre ellas se destacan las siguientes variables:

- La identificación y las características del carbono orgánico. En esta tesis se ha utilizado el nombre genérico de carbono orgánico, pero la literatura indica que podría tener la forma de bitumen, pirobitumen, e incluso grafito. Tanto el bitumen como el pirobitumen son nombres generales, que indican más bien una familia de especies que una composición y una estructura química específica. También es interesante conocer cómo la base fuerte interactúa y/ altera estas especies.
- El mecanismo de cómo el bitumen afecta la formación de espuma en la flotación de cobre.
- Granulometría producto de molienda: ¿es posible moler más grueso sin afectar la recuperación de la flotación? ¿Afecta la preflotación con una base fuerte la distribución granulométrica del mineral que alimenta la flotación?
- Reactivos de flotación: ¿existe una fórmula más adecuada para estos minerales, luego de la preflotación?
- Base fuerte utilizada: En esta tesis se ha estudiado el comportamiento de la preflotación con hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>). Queda abierta la posibilidad de utilizar otras bases fuertes, especialmente cal viva (CaO).
- ¿Cuál es el tiempo de acondicionamiento y el tiempo de extracción del carbono orgánico durante la preflotación óptimos desde un punto de vista económico?
- ¿Qué cambios se producen en el concentrado de cobre y en las colas de la flotación de cobre producto de introducir la preflotación con una base fuerte? ¿Hay especies mineralógicas que son deprimidas/activadas? Fuera del carbono orgánico, ¿hay otras especies que reaccionan con la base fuerte? Estas preguntas se podrían responder mediante una caracterización detallada del concentrado y de las colas.
- ¿Cuál es el mecanismo mediante el cual base fuerte separa el carbono orgánico del mineral? ¿Qué factores físico-químicos, tales como temperatura, concentración, etc., afectan esta reacción, y cómo influyen en su cinética?

Además, hay preguntas por responder relacionadas con el entorno del proceso de flotación de cobre:

- Dado el impacto que tiene el contenido de carbono orgánico en el proceso, ¿es posible establecer alguna metodología simple que permita incorporar esta variable en el modelo de bloques de un yacimiento y, por tanto, en el plan minero?
- ¿Se produce una mejora en la preflotación si la base fuerte se agrega en la molienda húmeda? ¿Se reduce el tiempo de acondicionamiento?
- Efectos aguas abajo: ¿Cómo afecta la preflotación las operaciones unitarias aguas abajo, especialmente la sedimentación y la depositación de los relaves?
- ¿Qué ocurre con el agua de procesos? En el caso de la operación industrial, se observa que el contenido de espumante residual en el agua de procesos es muy alto, hasta el punto que los operadores indican que algunos minerales son “auto-espumantes” (generan espuma), fenómeno explicado por el espumante contenido en el agua de procesos. Esta dificultad operacional debería eliminarse pues la preflotación reduce el consumo de este reactivo. Por otro lado, la incorporación de una base fuerte y la

extracción de carbono orgánico modifican el contenido de impurezas en el agua de procesos, quedando pendiente su evaluación.

- Medioambiente: ¿Qué problemas genera la “liberación” del material orgánico producto de la preflotación? ¿Será necesario un tratamiento especial para el concentrado de bitumen? ¿Qué riesgos implica enviar el concentrado de bitumen junto con el relave hacia el depósito?
- ¿Se puede lograr un subproducto comercializable y que otorgue valor económico al bitumen obtenido en la preflotación, incorporando algún proceso adicional?

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Canada's Oil & Natural Gas Producers (CAPRCA), "Introduction to oil sands", 2016. <http://www.capp.ca/publications-and-statistics/publications/287586>
- [2] Carrigy, M. A., ed., "The K. A. Clark Volume, a collection of papers on the Athabasca Oil Sands presented to K. A. Clark on the 75th anniversary of his birthday", Research Council of Alberta, 1963, p. xi.
- [3] Carrillo-Rosúa, Javier et al, "Extremely negative and inhomogeneous sulfur isotope signature in Cretaceous Chilean Manto-type Cu-(Ag) deposits, Coastal Range of Central Chile", *Ore Geology Reviews*, vol. 56, Elsevier, 2014.
- [4] Chmielewski, Tomasz (2015) "Development of a Hydrometallurgy for production of metals from KGHM Polska Miedz S.A. concentrates", *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 51(1), p. 335–350
- [5] Chmielewski, Tomasz, Konieczny, Andrzej, Kaleta, Rafal, y Luszczykiewicz, Andrzej (2014), "Development concepts for processing of Lubin-Glogow complex sedimentary copper ore" en "*Proceedings of XXVII International Mineral Processing Congress*", Santiago, Chile
- [6] Cisternas, María Eugenia, Frutos, José, Galindo, Eduardo, y Spiro, Baruch (1999), "Lavas con bitumen en el Cretácico Inferior de Copiapó, Región de Atacama, Chile: petroquímica e importancia metalogénica", *Revista Geológica de Chile*, v.26 n.2, Santiago, Chile
- [7] Clark, Karl, "Patente de invención canadiense N° 289058", <http://www.ic.gc.ca/opic-cipo/cpd/eng/patent/289058/summary.html>, tomada en septiembre 2016.
- [8] Conversación privada con el Ingeniero Rafael Sepúlveda S.
- [9] Curialel, J.A., "Occurrence and Significance of Metals in Solid Bitumens: An Organic Geochemical Approach", en Parnell, J., Kucha, H. y Landais, P. eds. "*Bitumen in Ore Deposits*", Springer-Verlag, 1993
- [10] Gize, A.P., "The analysis of organic matter in ore deposits", en Parnell, J., Kucha, H. y Landais, P. eds. "*Bitumen in Ore Deposits*", Springer-Verlag, 1993.
- [11] Gredelj, S.; Zanin, M. y Grano, S.R. (2009), "Selective flotation of carbon in the Pb–Zn carbonaceous sulphide ores of Century Mine, Zinifex", *Minerals Engineering*, vol. 22, 279–288
- [12] Greenpeace, "Tar sands and water", 2010, [http://www.greenpeace.org/canada/Global/canada/report/2010/4/Watershed\\_FS\\_footnote\\_rev\\_5.pdf](http://www.greenpeace.org/canada/Global/canada/report/2010/4/Watershed_FS_footnote_rev_5.pdf), tomada en septiembre de 2016
- [13] <http://datoshistoricosdechile.blogspot.cl/2013/12/minas-de-cobre-de-naltagua-talagante-el.html>, tomada en septiembre de 2016
- [14] <http://www.canadasoilsands.ca/en/explore-topics/water-use>, tomada en septiembre 2016.
- [15] <http://www.energy.alberta.ca/oilsands/791.asp>, tomada en septiembre 2016.
- [16] [http://www.opec.org/opec\\_web/en/data\\_graphs/330.htm](http://www.opec.org/opec_web/en/data_graphs/330.htm), tomada en septiembre de 2016
- [17] <https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/rankorder/2241rank.html>, tomada en septiembre de 2016
- [18] Jacob, H. "Nomenclature, classification, characterization, and genesis of natural solid bitumen (migrabitumen)", en Parnell, J., Kucha, H. y Landais, P. eds. "*Bitumen in Ore Deposits*", Springer-Verlag, 1993.

- [19] Jakobsenl, V.H. y Ohmot, and H.; “Bitumen Associated with Precipitation of Sulphides in Carbonate-Hosted Vein Mineralization, North Greenland”, en Parnell, J., Kucha, H. y Landais, P. eds. “*Bitumen in Ore Deposits*”, Springer-Verlag,, 1993.
- [20] Lagos, Ricardo y González, Rubén (2009), “Informe Proyecto 2009-19/1. Pruebas metalúrgicas mineral Carmen G-2 (versión final). Preparado para Minera Las Cenizas”, Metalquim Ltda., Santiago, Chile.
- [21] Minera Las Cenizas, "Mineral de Mina Carmen", informe interno, 2015
- [22] Parnell, John, “Introduction”, en Parnell, J., Kucha, H. y Landais, P. eds. “*Bitumen in Ore Deposits*”, Springer-Verlag,, 1993.
- [23] Sawlowicz1, Z., “Organic Matter and its Significance for the Genesis of the Copper-Bearing Shales (Kupferschiefer) from the Fore-Sudetic Monocline (Poland)”, en Parnell, J., Kucha, H. y Landais, P. eds. “*Bitumen in Ore Deposits*”, Springer-Verlag,, 1993
- [24] Speight, James, “Oil Sand Production Processes”, capítulo 2, Elsevier, 2013.
- [25] "Thermal in-situ extraction", <http://www.oilsandsmagazine.com>
- [26] Wilson, N.S.F.; Zentilli, M.; Reynolds, P.H. y Boric, R. (2003), “Age of mineralization by basinal fluids at the El Soldado manto-type copper deposit, Chile: 40Ar/39Ar geochronology of K-feldspar”, *Chemical Geology*, vol. 197, p. 161– 176.
- [27] Wilson, Nicholas S.F. (2000), “Organic petrology, chemical composition, and reflectance of pyrobitumen from the El Soldado Cu deposit, Chile”, *International Journal of Coal Geology*, vol. 43, p. 53–82.
- [28] Wilson, Nicholas S.F. y Zentilli, Marcos, "Association of pyrobitumen with copper mineralization from the Uchumi and Talcuna districts, central Chile", *International Journal of Coal Geology*, vol. 65, 2006, p. 158– 169
- [29] Yang, W. y Liu, Y., "Geochemical Data for Organic Matter in Stratabound Sulphide and Other Ore Deposits in China", en Parnell, J., Kucha, H. y Landais, P. eds. “*Bitumen in Ore Deposits*”, Springer-Verlag,, 1993.

## **ANEXOS**

## **ANEXO A**

### **PREPARACIÓN DE PAQUETES**

Cada muestra fue sometida a un proceso de reducción de tamaño mediante un combo y un chancador de mandíbulas. El mineral se pasó repetidas veces por el chancador, hasta conseguir un material 100% bajo 10 mallas. En este proceso hubo pérdida de material. Cuando la fracción residual gruesa era pequeña y no se iba a producir una reducción de tamaño en el chancador, se reservaba.

Con la fracción 100% bajo 10 mallas, se procedió a formar paquetes de aproximadamente 400 g utilizando un carrusel de 10 compartimentos. Se consideró razonable una diferencia menor a 5% entre el peso del paquete y los 400 g. Cuando esta diferencia era mayor, se utilizó un carrusel de 16 compartimentos para separar una fracción ( $1/16$  ó  $2/16$ ), y así tener un peso más cercano a los 400 g definidos para realizar las moliendas.



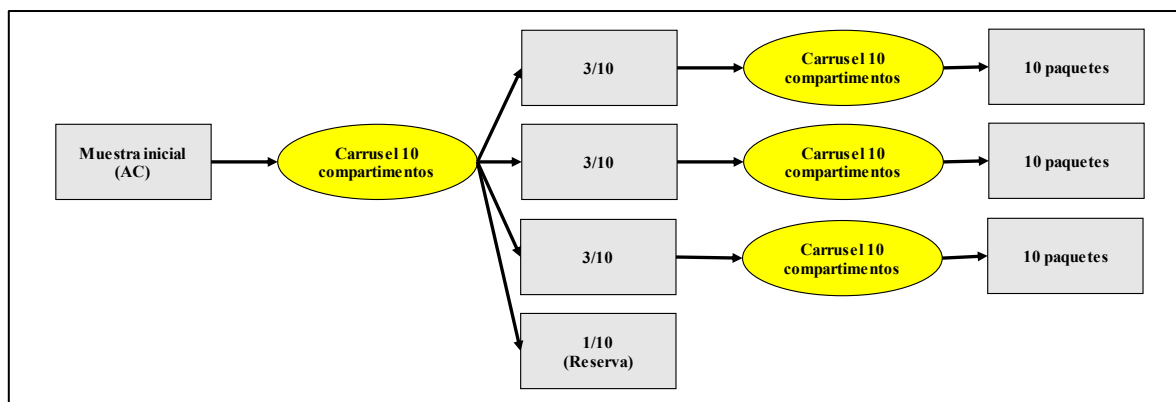
## MUESTRA AC

Peso inicial: 15 415 [g] (Muestras N° 1 y 20)

**Tabla 1: Pesos muestra AC tras chancado 100% - 10#**

Bolsa	Peso [g]
Finos 1 (Bolsa 1)	5 625
Finos 2 (Bolsa 2)	5 650
Finos 3 (Bolsa 3)	3 000
Subtotal	14 275
Gruesos	160
Fragmento sin chancar (reservado)	765
Total	15 199

El total de finos se homogeneizó, y luego se dividió utilizando el carrusel de 10 compartimentos según se muestra en la Figura 1. Los paquetes formados se muestran en la Tabla 2.



**Figura 1: Procedimiento para la formación de paquetes AC**

**Tabla 2: Pesos paquetes formados a partir de muestra AC**

Paquetes	Peso con bolsa [g]	Peso sin bolsa [g]	Peso restando 1/16	Diferencia c/r 400 g [%]
AC-1	422,9	417,8	391,7	2,1
AC-2	425,7	420,6	394,3	1,4
AC-3	431,9	426,8	400,1	0,0
AC-4	438,9	433,8	406,7	-1,7
AC-5	428,4	423,3	396,9	0,8
AC-6	425,5	420,4	394,1	1,5
AC-7	429,4	424,3	397,8	0,5

Paquetes	Peso con bolsa [g]	Peso sin bolsa [g]	Peso restando 1/16	Diferencia c/r 400 g [%]
AC-8	431,3	426,2	399,6	0,1
AC-9	429,7	424,6	398,1	0,5
AC-10	449,8	444,7	389,1 *	2,7
AC-11	429,5	424,4	397,9	0,5
AC-12	456,5	451,4	395,0 *	1,3
AC-13	433,8	428,7	401,9	-0,5
AC-14	443,3	438,2	410,8	-2,7
AC-15	431,5	426,4	399,8	0,1
AC-16	427,7	422,6	396,2	0,9
AC-17	438,6	433,5	406,4	-1,6
AC-18	453,2	448,1	392,1 *	2,0
AC-19	435,7	430,6	403,7	-0,9
AC-20	434,8	429,7	402,9	-0,7
AC-21	433,5	428,4	401,6	-0,4
AC-22	435,4	430,3	403,4	-0,9
AC-23	422,4	417,3	391,2	2,2
AC-24	412,7	407,6	407,6 **	-1,9
AC-25	410	404,9	379,6	-1,2
AC-26	422,7	417,6	391,5	2,1
AC-27	428,9	423,8	397,3	0,7
AC-28	422,2	417,1	391,1	2,2
AC-29	423,9	418,8	392,6	1,8
AC-30	431,8	426,7	400,1	0,0
Saldo reservado	1 444,5	1 439,4	-	-
Total		14 228,6		

Notas: \* Se retiraron 2/16 para aproximarse a los 400 [g]

\*\* No fue necesario retirar nada para aproximarse a los 400 [g]

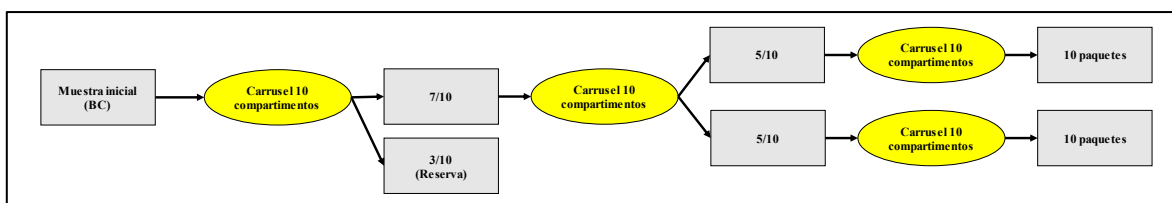
## MUESTRA BC

Peso inicial: 15 415 [g] (Muestras 5 y 11)

**Tabla 3: Pesos muestra BC tras chancado 100% - 10#**

Bolsa	Peso [g]
Finos 1 (Bolsa 1)	5 265
Finos 2 (Bolsa 2)	5 580
Finos 3 (Bolsa 3)	580
Subtotal	11 425
Gruesos	80
Total	11 505

El total de finos se homogeneizó, y luego se dividió utilizando el carrusel de 10 compartimentos según se muestra en la Figura 2. Los paquetes formados se muestran en la Tabla 4.



**Figura 2: Procedimiento para la formación de paquetes BC**

**Tabla 4: Pesos paquetes formados a partir de muestra BC**

Paquetes	Peso con bolsa [g]	Peso sin bolsa [g]	Diferencia c/r 400 g [%]
1	415,5	410,4	-2,6
2	411,2	406,1	-1,5
3	400,0	394,9	1,3
4	407,9	402,8	-0,7
5	399,6	394,5	1,4
6	407,0	401,9	-0,5
7	408,2	403,1	-0,8
8	399,9	394,8	1,3
9	401,2	396,1	1,0
10	398,6	393,5	1,6
11	415,2	410,1	-2,5
12	404,8	399,7	0,1
13	400,6	395,5	1,1
14	397,9	392,8	1,8
15	402,8	397,7	0,6
16	411,4	406,3	-1,6

Paquetes	Peso con bolsa [g]	Peso sin bolsa [g]	Diferencia c/r 400 g [%]
17	392,1	387,0	3,2
18	393,5	388,4	2,9
19	400,2	395,1	1,2
20	413,5	408,4	-2,1
Saldo reservado	3 409,5	3 404,4	-
Total		11 383,9	

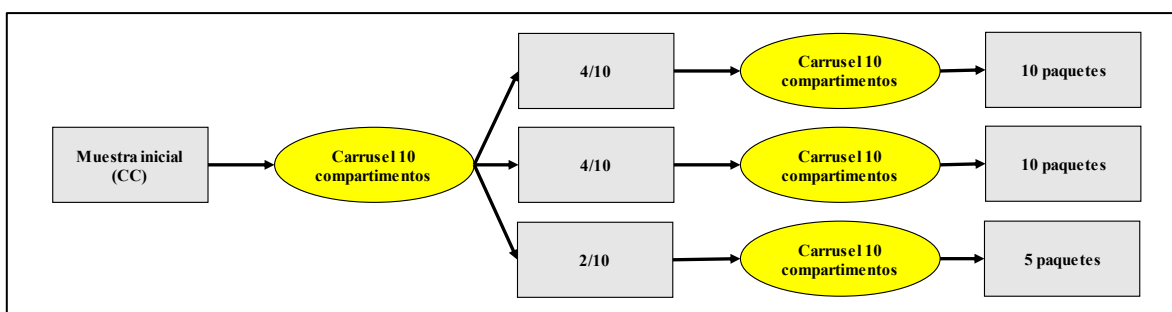
## MUESTRA CC

Peso inicial: 15 415 [g] (Muestras N° 6 y 15)

**Tabla 5: Pesos muestra CC tras chancado 100% - 10#**

Bolsa	Peso [g]
Finos 1 (Bolsa 1)	4 617,6
Finos 2 (Bolsa 2)	5 367,2
Total	9 984,9

El total de finos se homogeneizó, y luego se dividió utilizando el carrusel de 10 compartimentos según se muestra en la Figura 3. Los paquetes formados se muestran en la Tabla 6.



**Figura 3: Procedimiento para la formación de paquetes CC**

**Tabla 6: Pesos paquetes formados a partir de muestra CC**

Paquetes	Peso con bolsa [g]	Peso sin bolsa [g]	Peso restando 1/16	Diferencia c/r 400 g [%]
CC-1	401,0	397,1	397,1 **	-0,7
CC-2	399,7	395,8	395,8 **	-1,0
CC-3	398,7	394,8	394,8 **	-1,3
CC-4	426,2	422,3	395,9	-1,0
CC-5	393,0	389,1	389,1 **	-2,7
CC-6	402,6	398,7	398,7 **	-0,3
CC-7	406,8	402,9	402,9 **	0,7
CC-8	410,5	406,6	406,6 **	1,7
CC-9	428,5	424,6	398,1	-0,5
CC-10	391,1	387,2	387,2 **	-3,2
CC-11	392,9	389,0	389,0 **	-2,7
CC-12	395,3	391,4	391,4 **	-2,1
CC-13	395,2	391,3	391,3 **	-2,2
CC-14	391,9	388,0	388,0 **	-3,0
CC-15	408,1	404,2	404,2 **	1,1

Paquetes	Peso con bolsa [g]	Peso sin bolsa [g]	Peso restando 1/16	Diferencia c/r 400 g [%]
CC-16	392,3	388,4	388,4 **	-2,9
CC-17	392,1	388,2	388,2 **	-2,9
CC-18	393,6	389,7	389,7 **	-2,6
CC-19	394,7	390,8	390,8 **	-2,3
CC-20	429,8	425,9	399,3	-0,2
CC-21	406,1	402,2	402,2 **	0,6
CC-22	402,9	399,0	399,0 **	-0,2
CC-23	398,5	394,6	394,6 **	-1,3
CC-24	404,7	400,8	400,8 **	0,2
CC-25	390,1	386,2	386,2 **	-3,4
Total		9 949,8	9 870,2	

Notas: \*\* No fue necesario retirar mineral para aproximarse a los 400 [g]

## **ANEXO B**

### **ANÁLISIS CON HI-LOGGER**

A continuación se muestran los análisis realizados a los cortes de las muestras de alto contenido de carbono orgánico (muestra N° 10) y de bajo contenido de carbono orgánico (muestra N° 13). Para ello, se utilizó el equipo Hi-Logger disponible en el Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (ATMC) de la Universidad de Chile.

Los cortes de estas muestras fueron analizados seis veces, modificando su orientación. En cada análisis, el haz recorre tres veces la bandeja, interceptando las muestras una o dos veces.

Análisis 1

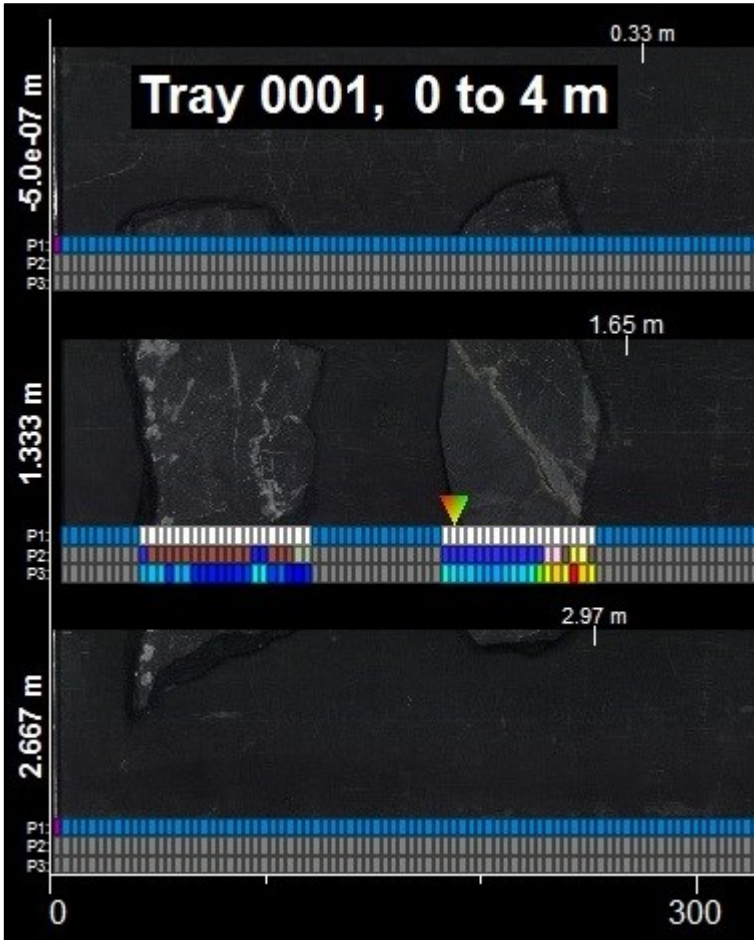


Figura 4: Trazado del haz hecho por Hi-Logger, análisis N° 1. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.

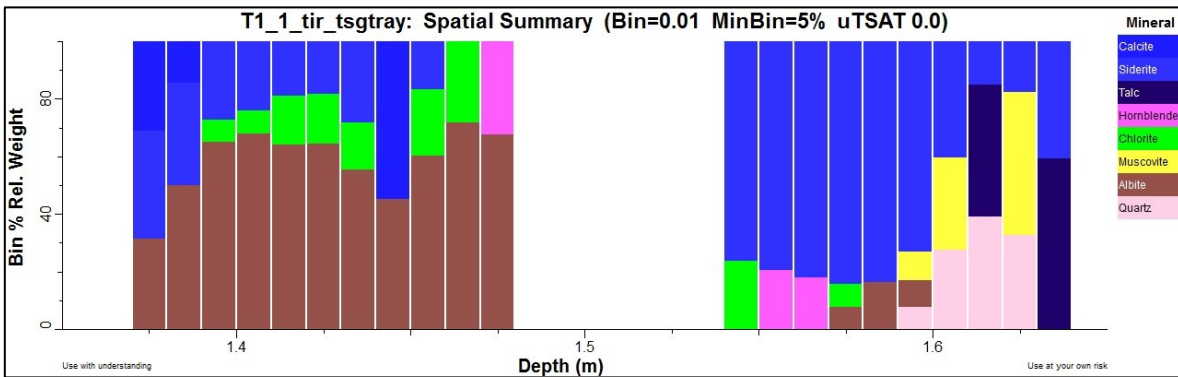


Figura 5: Análisis espectral N° 1 con Hi-Logger. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.







Análisis 2

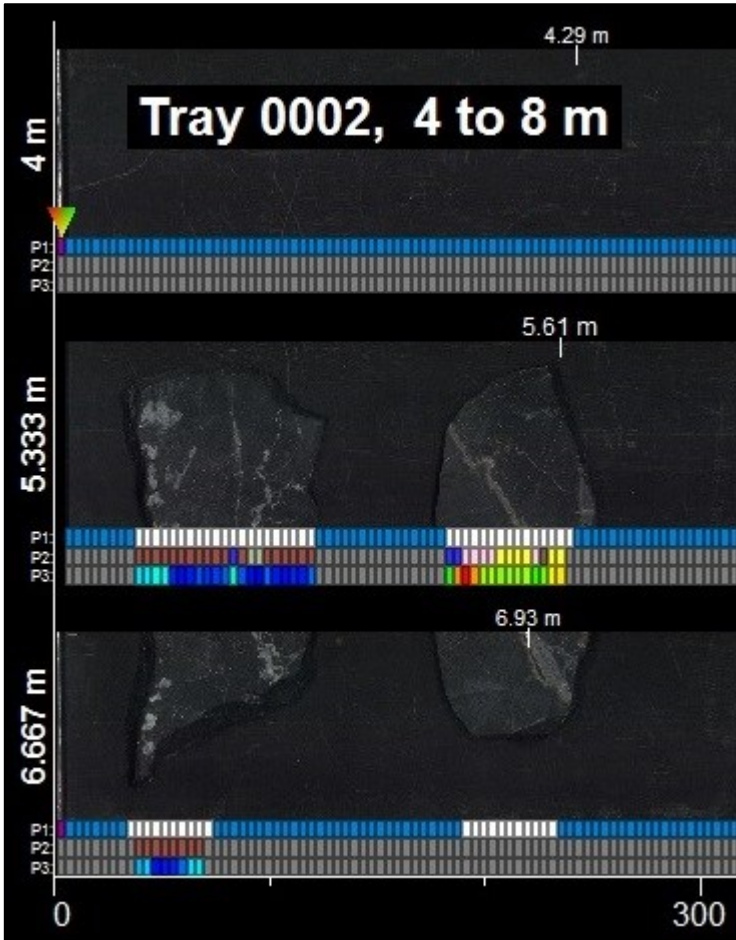


Figura 6: Trazado del haz hecho por Hi-Logger, análisis N° 2. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha. Notar que las muestras son barridos por dos de los tres haces.

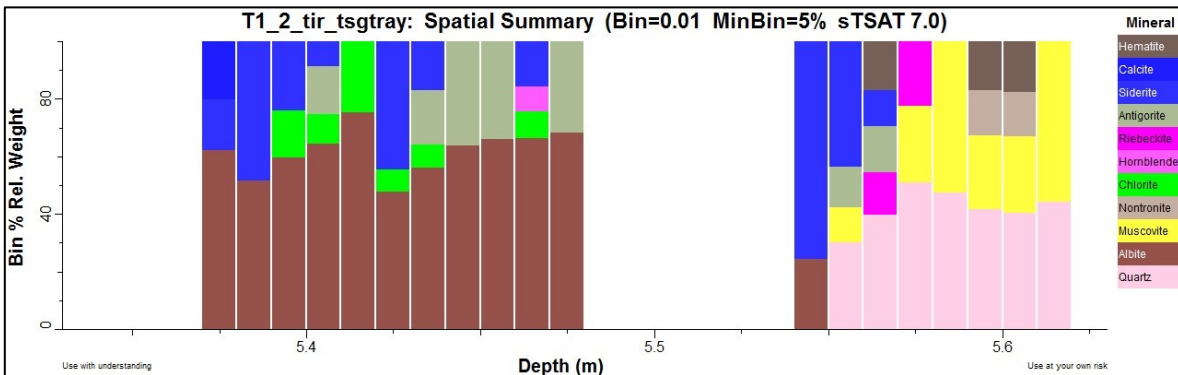


Figura 7: Análisis espectral N° 2 con Hi-Logger, primer barrido. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.

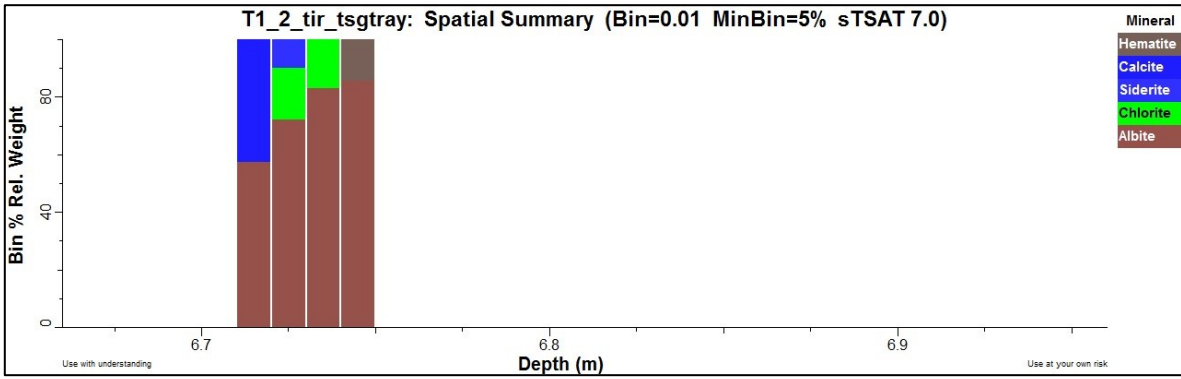


Figura 8: Análisis espectral N° 2 con Hi-Logger, segundo barrido. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.





Análisis 3

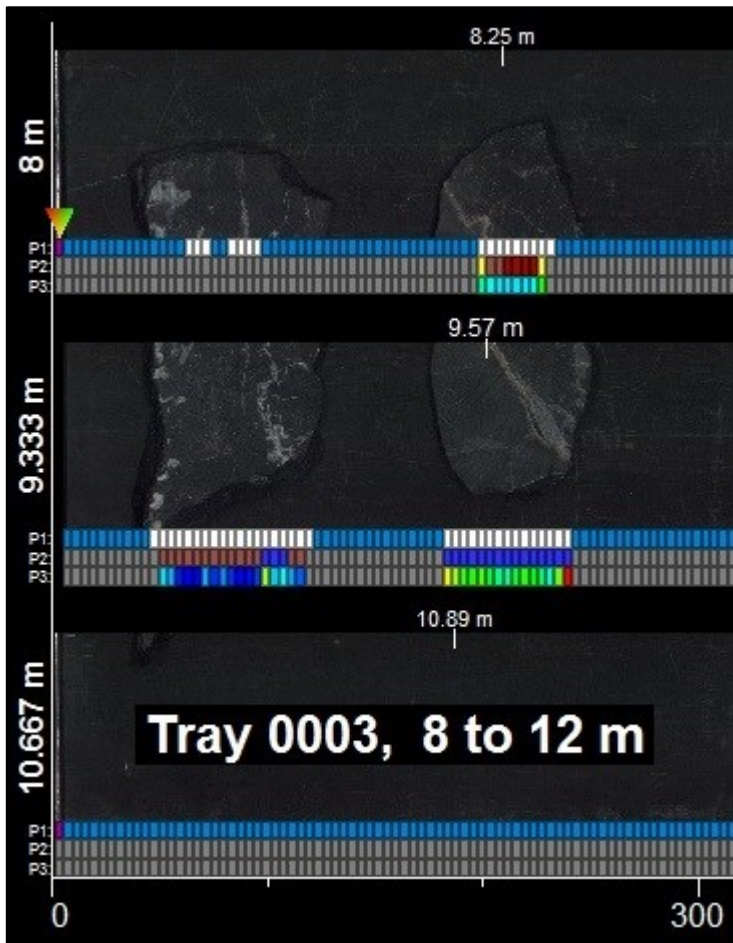


Figura 9: Trazado del haz hecho por Hi-Logger, análisis N° 3. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha. Notar que las muestras son barridas por dos de los tres haces.

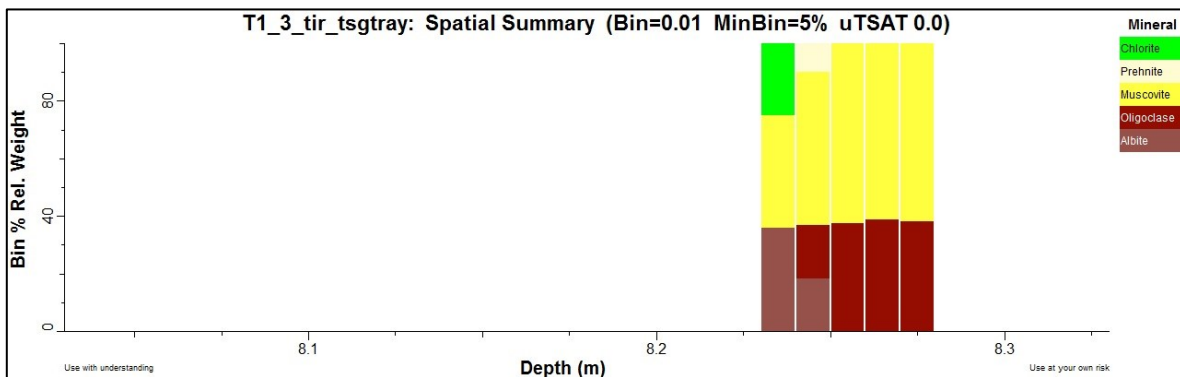


Figura 10: Análisis espectral N° 3 con Hi-Logger, primer barrido. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.

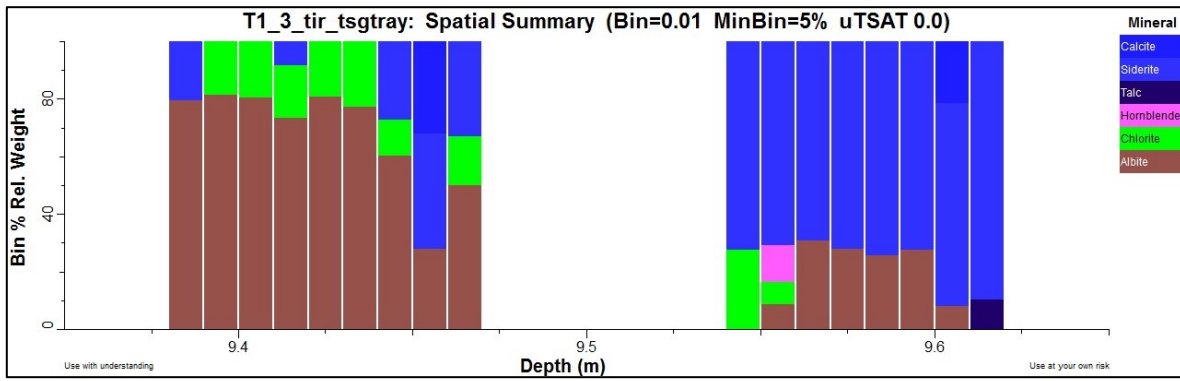


Figura 11: Análisis espectral N° 3 con Hi-Logger, segundo barrido. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.







Análisis 4

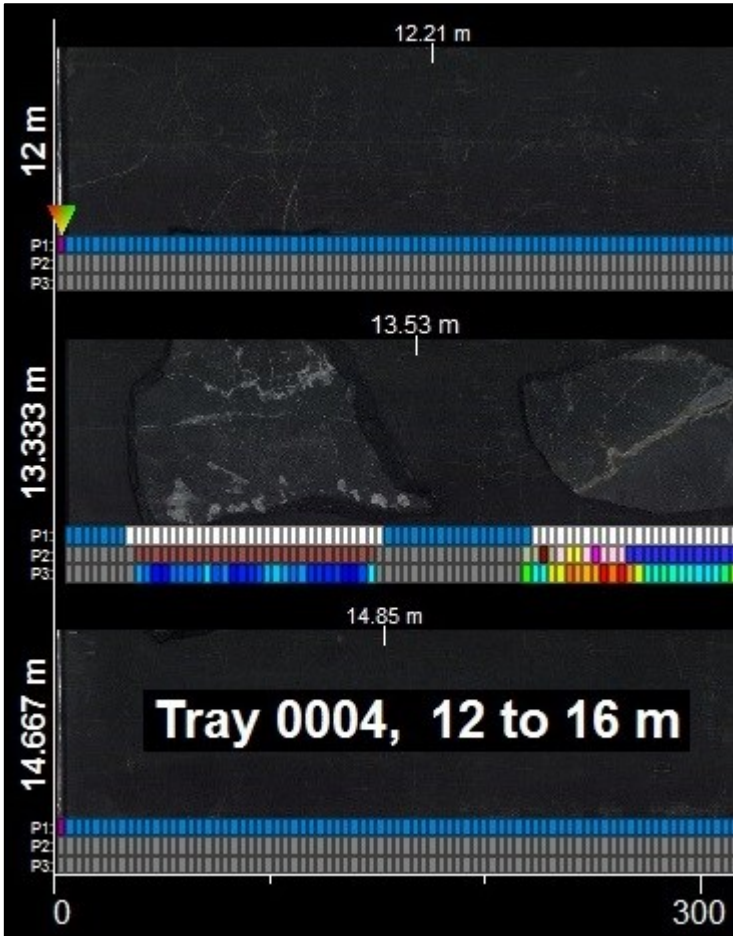


Figura 12: Trazado del haz hecho por Hi-Logger, análisis N° 4. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.

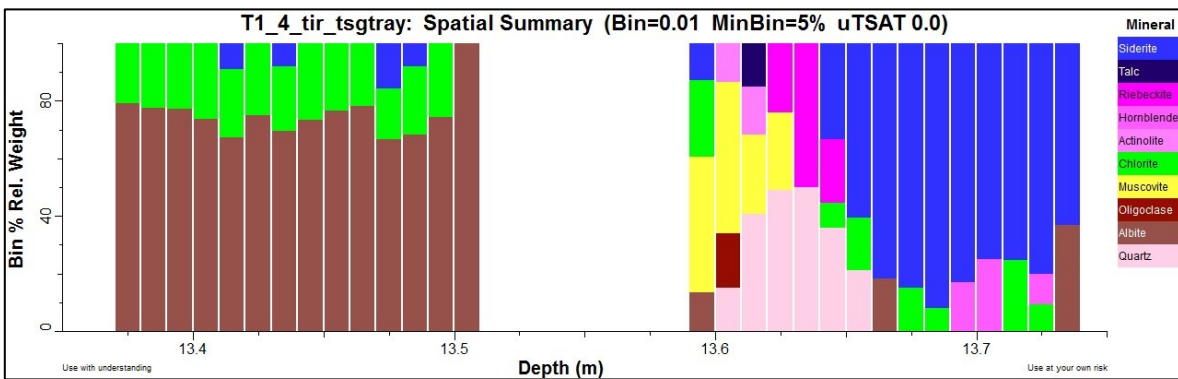


Figura 13: Análisis espectral N° 4 con Hi-Logger. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.





Análisis 5

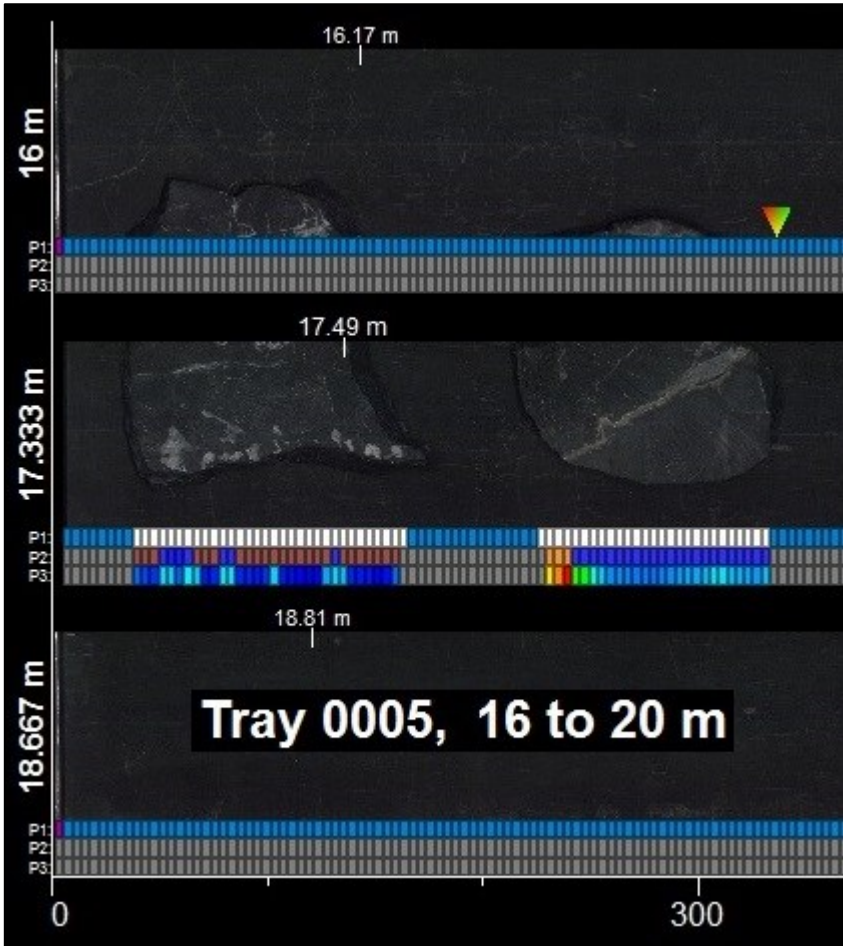


Figura 14: Trazado del haz hecho por Hi-Logger, análisis N° 5. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.

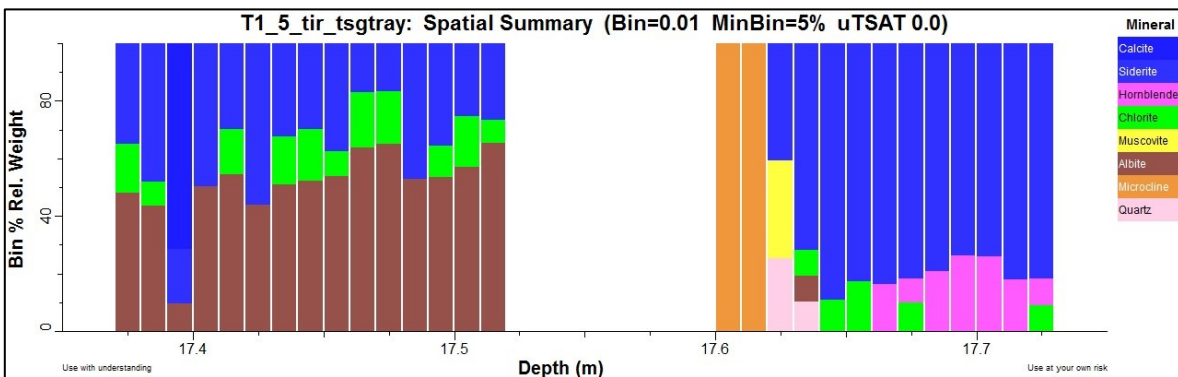


Figura 15: Análisis espectral N° 5 con Hi-Logger. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.







Análisis 6

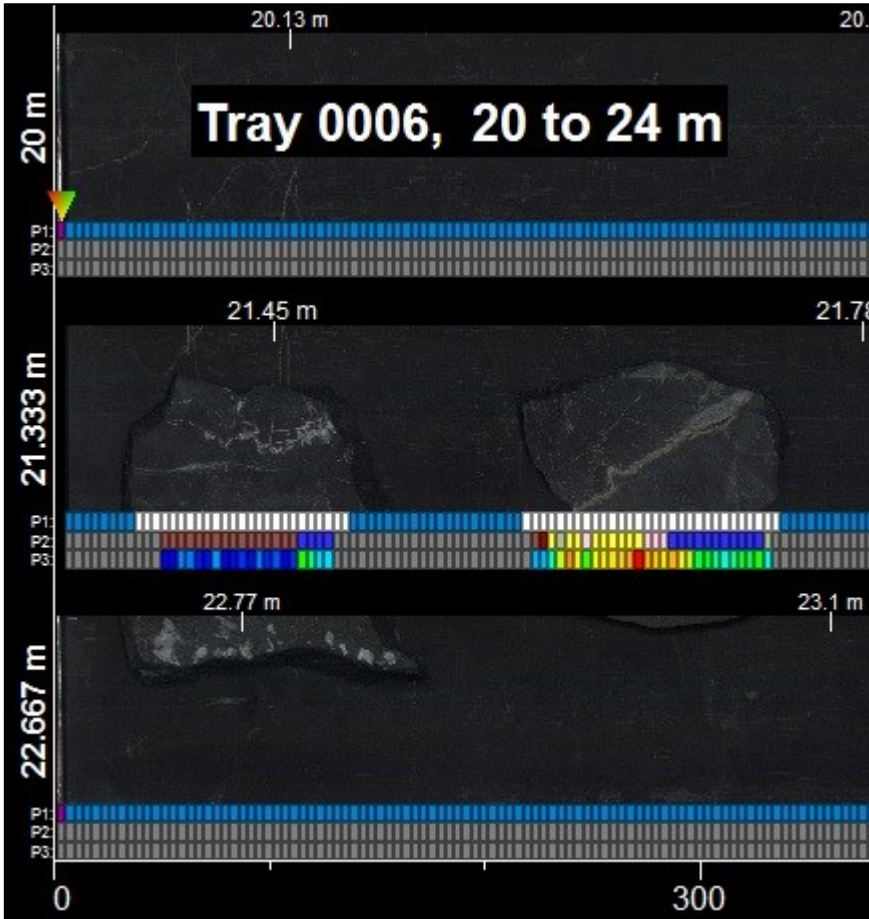


Figura 16: Trazado del haz hecho por Hi-Logger, análisis N° 6. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.

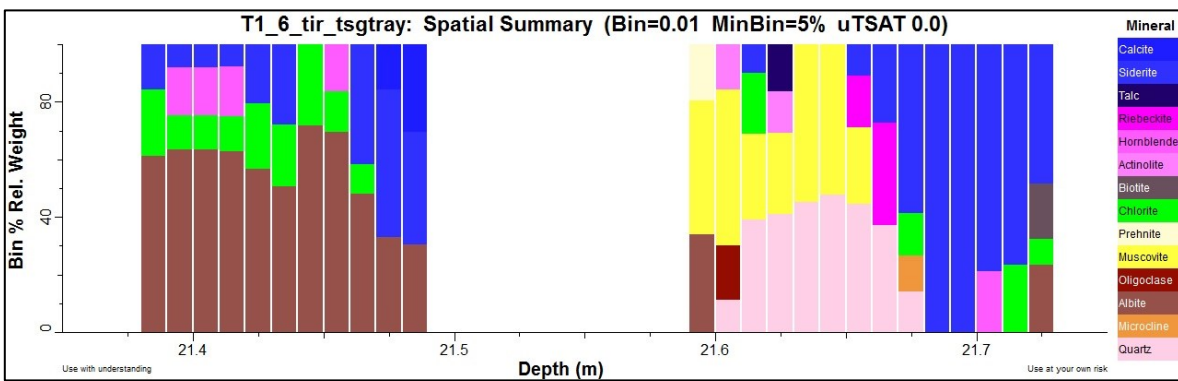


Figura 17: Análisis espectral N° 6 con Hi-Logger. Muestra N° 10 (AC) a la izquierda, y muestra N° 13 (BC) a la derecha.





## **ANEXO C**

### **CINÉTICAS DE MOLIENDA**

A continuación se muestran las pruebas hechas para establecer el tiempo requerido para lograr un producto 80% bajo 140 mallas (106  $\mu\text{m}$ ) para cada una de las muestras estudiadas: AC, BC y CC.

Entre los días 10 y 21 de octubre de 2016, se efectuó un mantenimiento del compresor del laboratorio. Es posible que se haya producido algún cambio en el punto de operación de este equipo, lo que podría explicar algún ruido en el comportamiento del pulverizador ya que este es un equipo neumático. Esto podría ser una explicación de las bajas recuperaciones encontradas para las muestras AC y BC. En el caso de la muestra CC, esto no se habría producido, pues todas las pruebas de molienda se realizaron después del mantenimiento del compresor.

MUESTRA AC

Paquete	AC-15			Fecha	10/Oct/16	
	Tiempo [s]	0				
	Peso inicial [g]	403,6	Peso seco [g]	403,2		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	350,1	611,0	260,9	64,7	35,3
100	150	351,5	371,6	20,1	5,0	30,3
140	106	346,0	364,3	18,3	4,5	25,8
200	75	340,9	355,7	14,8	3,7	22,1

Paquete	AC-5			Fecha	10/Oct/16	
	Tiempo [s]	0				
	Peso inicial [g]	404,6	Peso seco [g]	404,2		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,9	605,9	266,0	65,8	34,2
100	150	299,4	319,9	20,5	5,1	29,1
140	106	344,4	362,4	18,0	4,5	24,7
200	75	303,3	316,1	12,8	3,2	21,5

Paquete	AC-7			Fecha	11/Oct/16	
	Tiempo [s]	60				
	Peso inicial [g]	399,62	Peso seco [g]	399,2		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	361,8	369,4	7,6	1,9	98,1
100	150	332,9	362,2	29,3	7,3	90,8
140	106	302,7	342,7	40,0	10,0	80,7
200	75	309,1	341,4	32,3	8,1	72,6

Paquete	AC-20			Fecha	13/Oct/16	
	Tiempo [s]	55				
	Peso inicial [g]	403,5	Peso seco [g]	403,1		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	351,7	380,7	29,0	7,2	92,8
100	150	333,1	364,5	31,4	7,8	85,0
140	106	302,9	341,0	38,1	9,5	75,6
200	75	308,5	343,9	35,4	8,8	66,8
270	53	342,1	369,8	27,7	6,9	59,9
400	38	323,4	346,7	23,3	5,8	54,1

Paquete	AC-10			Fecha	11/Nov/16	
	Tiempo [s]	59				
	Peso inicial [g]	356,5	Peso seco [g]	356,2		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,6	352,4	12,8	3,6	96,4
100	150	299,4	328,4	29,0	8,1	88,3
140	106	344,1	384,2	40,1	11,3	77,0
200	75	303,1	335,0	31,9	9,0	68,0
270	53	334,6	361,3	26,7	7,5	60,6
400	38	315,2	334,2	19,0	5,3	55,2

Paquete	AC-22			Fecha	11/Nov/16	
	Tiempo [s]	90				
	Peso inicial [g]	405,5	Peso seco [g]	405,1		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	361,3	362,0	0,7	0,2	99,8
100	150	332,6	338,4	5,8	1,4	98,4
140	106	302,5	327,0	24,5	6,0	92,3
200	75	308,1	345,2	37,1	9,2	83,2
270	53	341,5	378,4	36,9	9,1	74,1
400	38	322,9	352,8	29,9	7,4	66,7

**Tabla 19: Cinética de molienda para paquetes AC**

Paquete	AC-15	AC-5	AC-20	AC-10	AC-7	AC-32
Fecha	6/Oct	6/Oct	12/Oct	11/Nov	11/Oct	11/Nov
Tiempo [s]	0	0	55	59	60	90
Malla	% Pasante					
70	35,3	34,2	92,8	96,4	98,1	99,8
100	30,3	29,1	85,0	88,3	90,8	98,4
140	25,8	24,7	75,6	77,0	80,7	92,3
200	22,1	21,5	66,8	68,0	72,6	83,2
270	-	-	59,9	60,6	-	74,1
400	-	-	54,1	55,2	-	66,7

Se observa una buena reproducibilidad de los resultados.

Con el fin de obtener un producto 80% bajo 140 mallas, se selecciona un tiempo de 60 segundos (dos veces 30 segundos en el pulverizador) para los paquetes AC.

MUESTRA BC

Paquete	BC-3			Fecha	10/Oct/16	
	Tiempo [s]	120				
	Peso inicial [g]	394,9	Peso seco [g]	394,5		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	361,5	362,1	0,6	0,2	99,8
100	150	332,7	333,2	0,5	0,1	99,7
140	106	302,7	304,6	1,9	0,5	99,2
200	75	308,6	316,5	7,9	2,0	97,2

Paquete	BC-9			Fecha	11/Oct/16	
	Tiempo [s]	0				
	Peso inicial [g]	396,1	Peso seco [g]	395,7		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,8	587,6	247,8	62,6	37,4
100	150	299,4	319,5	20,1	5,1	32,3
140	106	344,8	361,2	16,4	4,1	28,2
200	75	303,6	318,3	14,7	3,7	24,4

Paquete	BC-16			Fecha	11/Oct/16	
	Tiempo [s]	60				
	Peso inicial [g]	406,3	Peso seco [g]	405,9		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	350,6	356,0	5,4	1,3	98,7
100	150	351,4	375,0	23,6	5,8	92,9
140	106	346,6	388,9	42,3	10,4	82,4
200	75	341,7	378,7	37,0	9,1	73,3



Paquete	BC-13			Fecha	12/Oct/16	
	Tiempo [s]	55				
	Peso inicial [g]	396,0	Peso seco [g]	395,6		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	340,0	349,2	9,2	2,3	97,7
100	150	299,5	333,0	33,5	8,5	89,2
140	106	344,5	379,4	34,9	8,8	80,4
200	75	303,4	337,8	34,4	8,7	71,7
270	53	335,4	365,4	30,0	7,6	64,1
400	38	316,0	337,7	21,7	5,5	58,6

Paquete	BC-6			Fecha	25/Oct/16	
	Tiempo [s]	50				
	Peso inicial [g]	401,9	Peso seco [g]	401,5		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,9	360,7	20,8	5,2	94,8
100	150	229,7	338,5	108,8	27,1	67,7
140	106	344,4	384,0	39,6	9,9	57,9
200	75	303,4	334,1	30,7	7,6	50,2
270	53	335,4	361,0	25,6	6,4	43,8
400	38	316,0	337,6	21,6	5,4	38,5

Paquete	BC-20			Fecha	9/Nov/16	
	Tiempo [s]	50				
	Peso inicial [g]	406,5	Peso seco [g]	406,1		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,7	361,9	22,2	5,5	94,5
100	150	229,5	335,2	105,7	26,0	68,5
140	106	344,1	388,8	44,7	11,0	57,5
200	75	303,0	333,5	30,5	7,5	50,0
270	53	334,7	362,5	27,8	6,8	43,1
400	38	315,2	337,3	22,1	5,4	37,7

Paquete	BC-10			Fecha	10/Nov/16	
	Tiempo [s]	55				
	Peso inicial [g]	393,3	Peso seco [g]	392,9		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,7	352,8	13,1	3,3	96,7
100	150	229,5	331,0	101,5	25,8	70,8
140	106	344,1	385,9	41,8	10,6	60,2
200	75	303,0	336,5	33,5	8,5	51,7
270	53	334,7	362,4	27,7	7,0	44,6
400	38	315,2	337,6	22,4	5,7	38,9

Paquete	BC-4			Fecha	14/Nov/16	
	Tiempo [s]	90				
	Peso inicial [g]	401,5	Peso seco [g]	401,1		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,7	340,2	0,5	0,1	99,9
100	150	299,4	304,1	4,7	1,2	98,7
140	106	344,1	363,9	19,8	4,9	93,8
200	75	303,0	338,0	35,0	8,7	85,0
270	53	334,7	376,6	41,9	10,4	74,6
400	38	315,2	344,6	29,4	7,3	67,3

Paquete	BC-18			Fecha	18/Nov/16	
	Tiempo [s]	75				
	Peso inicial [g]	387,8	Peso seco [g]	387,4		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,6	341,0	1,4	0,4	99,6
100	150	299,5	310,2	10,7	2,8	96,9
140	106	344,1	375,6	31,5	8,1	88,7
200	75	303,1	342,1	39,0	10,1	78,7
270	53	334,8	369,1	34,3	8,9	69,8
400	38	315,3	339,8	24,5	6,3	63,5

Paquete	BC-15			Fecha	16/Nov/16	
	Tiempo [s]	67				
	Peso inicial [g]	369,8	Peso seco [g]	369,4		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,6	342,3	2,7	0,7	99,3
100	150	299,3	314,2	14,9	4,0	95,2
140	106	344,0	378,4	34,4	9,3	85,9
200	75	303,1	340,6	37,5	10,2	75,8
270	53	334,7	364,8	30,1	8,1	67,6
400	38	315,2	337,6	22,4	6,1	61,6

Paquete	BC-19			Fecha	19/Nov/16	
	Tiempo [s]	60				
	Peso inicial [g]	394,0	Peso seco [g]	393,6		
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,6	348,4	8,8	2,4	97,6
100	150	299,3	326,1	26,8	7,3	90,4
140	106	344,1	385,3	41,2	11,2	79,2
200	75	303,0	338,8	35,8	9,7	69,5
270	53	334,7	356,1	21,4	5,8	63,7
400	38	315,2	332,3	17,1	4,6	59,1

Tabla 20: Cinética de molienda para paquetes BC

Paquete	BC-9	BC-6	BC-20	BC-13	BC-10	BC-16	BC-19	BC-15	BC-18	BC-4	BC-3
Fecha	11/Oct	25/Oct	9/Nov	12/Oct	10/Nov	11/Oct	17/Nov	16/Nov	14/Nov	14/Nov	6/Oct
Tiempo [s]	0	50	50	55	55	60	60	67	75	90	150
Malla	% Pasante										
70	37,4	94,8	94,5	97,7	96,7	98,7	97,6	99,3	99,6	99,9	99,8
100	32,3	67,7	68,5	89,2	70,8	92,9	90,4	95,2	96,9	98,7	99,7
140	28,2	57,9	57,5	80,4	60,2	82,4	79,2	85,9	88,7	93,8	99,2
200	24,4	50,2	50,0	71,7	51,7	73,3	69,5	75,8	78,7	85,0	97,2
270	-	43,8	43,1	64,1	44,6	-	63,7	67,6	69,8	74,6	-
400	-	38,5	37,7	58,6	38,9	-	59,1	61,6	63,5	67,3	-

Se observa una buena reproducibilidad de los resultados. Sin embargo, la cinética hecha al paquete BC-10 se escapa a la tendencia general.

Se hizo una verificación de la cinética de molienda cuando se conocieron los primeros análisis químicos y se vio que las recuperaciones asociadas a la muestra BC eran bajas. Dado que se realizó una mantención del compresor – el pulverizador es neumático – entre los días 20 y 25 de octubre del 2016, se quiso descartar que hubiese un cambio en el perfil granulométrico del producto de molienda.

Analizando las granulometrías logradas a diferentes tiempos de molienda (comparar por ejemplo los resultados obtenidos a 50 segundos y los resultados obtenidos a 60 segundos), se concluyó que lo ocurrido con la muestra BC-10 no se debería a la mantención del compresor. No se consideró esta prueba dentro del análisis.

Con el fin de obtener un producto 80% bajo 140 mallas, se selecciona un tiempo de 60 segundos (dos veces 30 segundos en el pulverizador) para los paquetes BC.

MUESTRA CC

Paquete	CC-6			Fecha	30/Nov/16	
	Tiempo [s]	60				
	Peso inicial [g]	398,5	Peso seco [g]			
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,8	367,4	27,6	6,9	93,1
100	150	299,4	334,6	35,2	8,8	84,2
140	106	344,2	385,5	41,3	10,4	73,9
200	75	303,2	332,5	29,3	7,4	66,5
270	53	334,8	360,6	25,8	6,5	60,1
400	38	315,3	335,4	20,1	5,0	55,0

Paquete	CC-12			Fecha	30/Nov/16	
	Tiempo [s]	55				
	Peso inicial [g]	391,2	Peso seco [g]			
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	361,4	392,2	30,8	7,9	92,1
100	150	332,8	373,5	40,7	10,4	81,7
140	106	302,7	337,1	34,4	8,8	72,9
200	75	308,3	335,9	27,6	7,1	65,9
270	53	341,7	366,7	25	6,4	59,5
400	38	323,1	345,1	22	5,6	53,9

Paquete	CC-18			Fecha	1/Dic/16	
	Tiempo [s]	70				
	Peso inicial [g]	389,5	Peso seco [g]			
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,7	351,8	12,1	3,1	96,9
100	150	299,4	328,9	29,5	7,6	89,3
140	106	344,2	387,3	43,1	11,1	78,3
200	75	303,1	335,7	32,6	8,4	69,9
270	53	334,7	363,1	28,4	7,3	62,6
400	38	315,2	335,7	20,5	5,3	57,3

Paquete	CC-22			Fecha	1/Dic/16	
	Tiempo [s]	75				
	Peso inicial [g]	398,9	Peso seco [g]			
		Peso tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso Retenido	Fracción Retenida	Fracción Pasante
		g	g	g	%	%
70	212	339,7	347,9	8,2	2,1	97,9
100	150	299,4	326,6	27,2	6,8	91,1
140	106	344,2	384,9	40,7	10,2	80,9
200	75	303,2	338,7	35,5	8,9	72,0
270	53	334,8	364,4	29,6	7,4	64,6
400	38	315,3	337,4	22,1	5,5	59,1

**Tabla 21: Cinética de molienda para paquetes CC**

Paquete	CC-12	CC-6	CC-18	CC-22
Fecha	30/Nov	30/Nov	1/Dic	1/Dic
Tiempo	55	60	70	75
Malla	% Pasante			
70	92,1	93,1	96,9	97,9
100	81,7	84,2	89,3	91,1
140	72,9	73,9	78,3	80,9
200	65,9	66,5	69,9	72,0
270	59,5	60,1	62,6	64,6
400	53,9	55,0	57,3	59,1

Con el fin de obtener un producto 80% bajo 140 mallas, se selecciona un tiempo de 74 segundos (dos veces 30 segundos más 14 segundos en el pulverizador) para los paquetes CC.

## ANEXO D

### ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Para realizar este análisis multielemento, que entrega una aproximación al análisis químico, se utilizó un equipo portátil marca Olympus, modelo Delta Premium, existente en el Laboratorio de Pirometalurgia de la Universidad de Chile.

Las lecturas de cobre entregadas por el equipo se correlacionaron con los análisis químicos efectuados a muestras de cabeza, concentrados y colas de las pruebas hechas a muestras BC y CC. La correlación encontrada es alta, por lo que este equipo se utilizó para analizar por cobre las muestras correspondientes a las últimas pruebas realizadas.

Se consideró que las muestras se podían agrupar en tres grupos, según el rango de su contenido de cobre, y a cada grupo se le ajustó un modelo lineal del tipo:

$$\text{Análisis químico [\%]} = M \times \text{Lectura fluorescencia [\%]} + N$$

Donde M y N son dos constantes para cada modelo. Algunas lecturas de fluorescencia se hicieron varias veces a la misma muestra. Las tablas y gráficos se muestran a continuación.

**Tabla 22: Correlación entre lectura de fluorescencia de rayos X y análisis químico de cobre para muestras de cabeza y concentrado de pretratamiento**

Paquete	Tipo muestra	Lectura fluorescencia	Análisis químico
BC-11	Cabeza	2,9957	2,53
BC-11	Cabeza	2,9935	2,53
BC-1	Cabeza	2,9656	2,53
BC-1	Cabeza	2,9963	2,53
BC-1	C1 pretrat.	2,9832	2,405
BC-1	C2 pretrat.	2,8888	2,40
BC-8	C1 pretrat.	3,0352	2,375
BC-8	C2 pretrat.	2,8912	2,37
BC-11	C1 pretrat.	2,9428	2,36
BC-11	C2 pretrat.	2,9318	2,37
BC-17	C1 pretrat.	2,9163	2,32
BC-17	C2 pretrat.	2,9559	2,33
CC-16	Cabeza	1,5071	1,153
CC-4	Cabeza	1,4987	1,153
CC-1	Cabeza	1,4425	1,153
CC-1	Cabeza	1,5183	1,153
CC-4	C1 pretrat.	1,4853	1,15
CC-4	C1 pretrat.	1,4896	1,15
CC-9	C1 pretrat.	1,4648	1,17

Paquete	Tipo muestra	Lectura fluorescencia	Análisis químico
CC-17	C1 pretrat.	1,5129	1,18
CC-24	C1 pretrat.	1,5057	1,20
M		0.85796	
N		-0.11717	
Coef. correlación		0.9922	

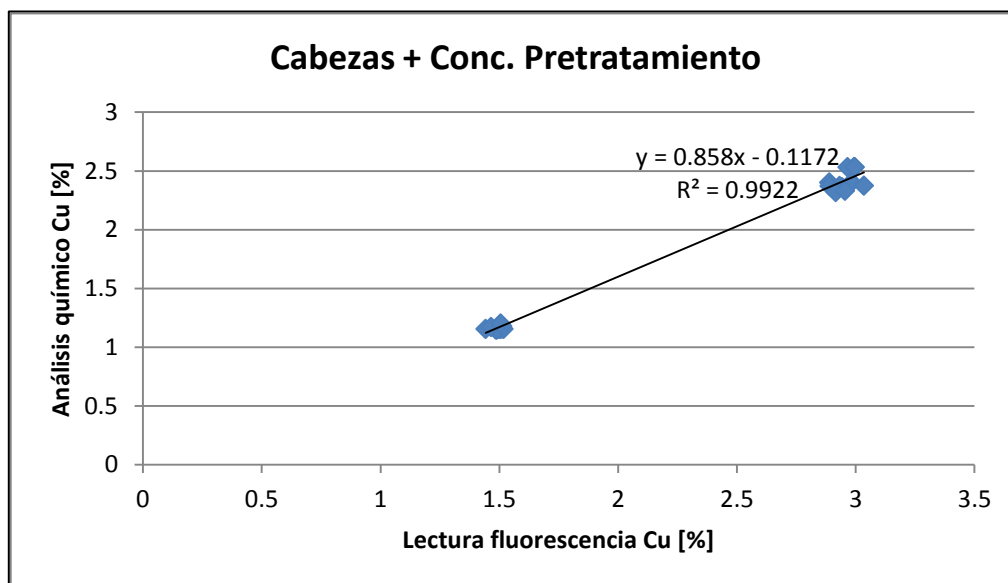


Figura 18: Correlación entre lectura de fluorescencia de rayos X y análisis químico de cobre para muestras de cabeza y concentrado de pretratamiento

Tabla 23: Correlación entre lectura de fluorescencia de rayos X y análisis químico de cobre para muestras de concentrado de la flotación de cobre

Paquete	Tipo muestra	Lectura fluorescencia	Análisis químico
BC-1	C3	10,1000	9,59
BC-1	C4	3,7097	2,90
BC-1	C5	2,0838	1,68
BC-8	C3	9,1754	8,60
BC-8	C4	3,4084	2,58
BC-8	C5	1,7872	1,40
BC-11	C3	8,8132	8,11
BC-11	C4	3,6030	2,81
BC-11	C5	2,3861	1,935
BC-11	C5	2,4156	1,935
BC-17	C3	11,8300	10,99
BC-17	C4	3,4541	2,765
BC-17	C5	1,8445	0,815



Paquete	Tipo muestra	Lectura fluorescencia	Análisis químico
BC-17	C5	1,9202	0,815
BC-17	C5	1,8767	0,815
CC-4	C2	4,5705	3,93
CC-4	C2	4,6761	3,93
CC-4	C3	0,9387	0,747
CC-4	C3	0,9666	0,747
CC-4	C4	0,9725	0,825
CC-4	C4	0,9777	0,825
CC-9	C2	4,7180	3,84
CC-9	C2	4,6701	3,84
CC-9	C2	4,7739	3,84
CC-9	C3	1,2337	0,892
CC-9	C3	1,2107	0,892
CC-9	C4	0,6615	0,508
CC-9	C4	0,6321	0,508
CC-17	C2	4,9332	3,86
CC-17	C3	1,9134	1,51
CC-17	C4	1,2687	1,02
CC-24	C2	8,9800	8,37
CC-24	C3	2,5798	1,99
CC-24	C4	1,1667	0,905
CC-24	Cola	0,5387	0,466
M		0,95359	
N		-0,40000	
Coef. correlación		0,9906	

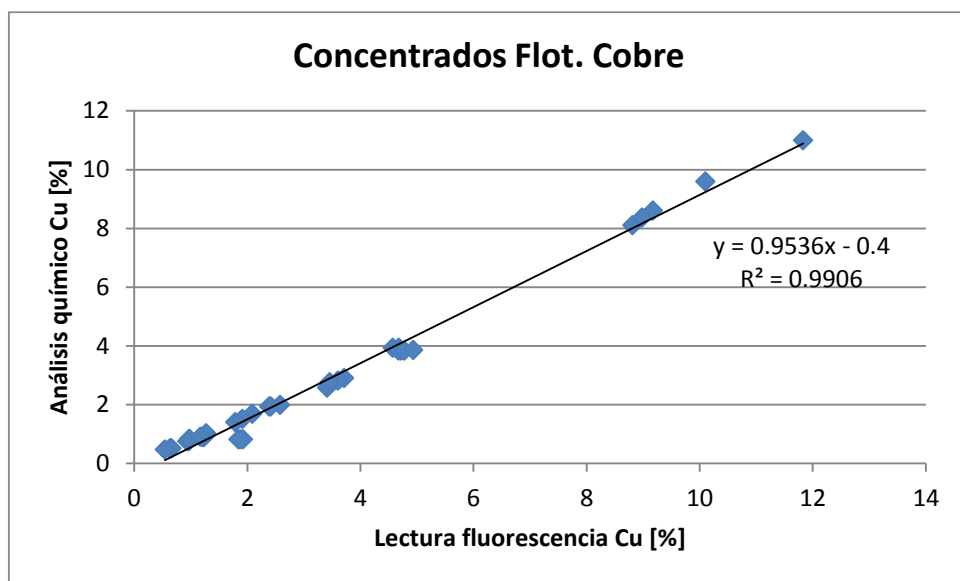
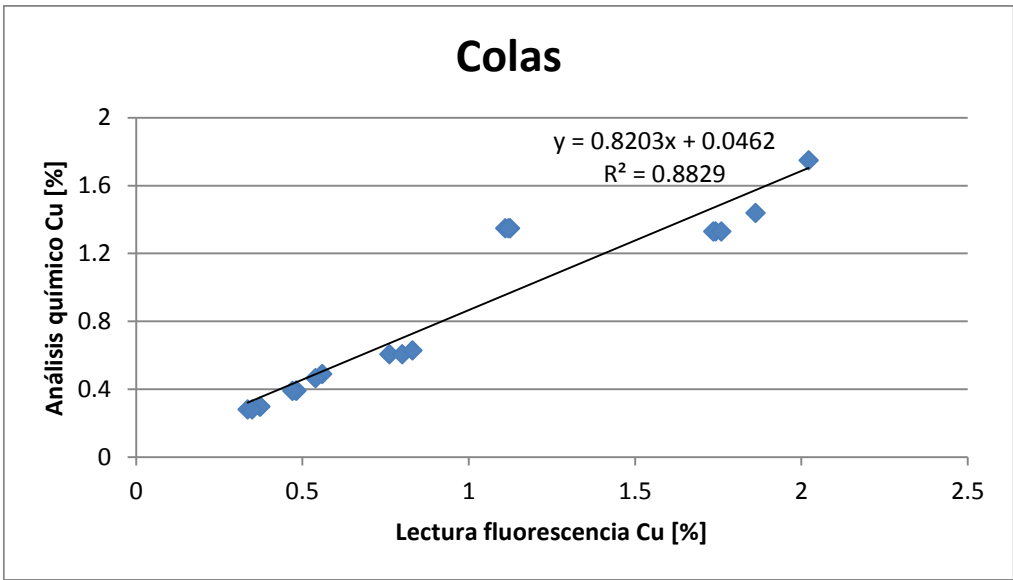


Figura 19: Correlación entre lectura de fluorescencia de rayos X y análisis químico de cobre para muestras de concentrado de la flotación de cobre

Tabla 24: Correlación entre lectura de fluorescencia de rayos X y análisis químico de cobre para muestras de colas de la flotación de cobre

Paquete	Tipo muestra	Lectura fluorescencia	Análisis químico
BC-1	Cola	0,7613	0,607
BC-1	Cola	0,8000	0,607
BC-2	Cola	1,8626	1,44
BC-5	Cola	2,0223	1,75
BC-8	Cola	0,8306	0,63
BC-11	Cola	1,7424	1,33
BC-11	Cola	1,7350	1,33
BC-11	Cola	1,7590	1,33
BC-17	Cola	1,1244	1,35
BC-17	Cola	1,1102	1,35
BC-17	Cola	1,1190	1,35
CC-4	Cola	0,3717	0,299
CC-4	Cola	0,3740	0,299
CC-9	Cola	0,3349	0,282
CC-9	Cola	0,3484	0,282
CC-16	Cola	0,4804	0,392
CC-16	Cola	0,4820	0,392
CC-17	Cola	0,4694	0,391
CC-23	Cola	0,5596	0,491
CC-24	Cola	0,5387	0,466
M		0,82032	
N		0,04623	

Coef. correlación	0,8829
-------------------	--------



**Figura 20: Correlación entre lectura de fluorescencia de rayos X y análisis químico de cobre para muestras de colas de la flotación de cobre**

En el caso de los concentrados de la flotación de cobre, la correlación se considera adecuadamente conservadora, pues castiga ligeramente la predicción de las leyes altas.

La lectura de los otros elementos que entrega el equipo de fluorescencia de rayos X se debe considerar referencial, no absoluta. No se utilizaron estas lecturas en la presente tesis.

## ANEXO E

### AJUSTE MODELO DE KLIMPEL

Modelo de Klimpel para cinética de flotación:

$$\text{Recuperación [\%]} = \mathbf{R_o} [\%] \times (1 - (1/k \times t) \times (1 - \exp(-k \times t)))$$

donde  $t$  es el tiempo de flotación [min], y  $k$  [min<sup>-1</sup>] y  $\mathbf{R_o}$  [%] son los dos parámetros del modelo.  $\mathbf{R_o}$  representa la recuperación máxima que se podría lograr con un tiempo de flotación infinito, y  $k$  corresponde a la rapidez o cinética de la flotación: a mayor valor de  $k$ , mayor es el incremento inicial de la recuperación en la prueba.

A continuación se muestran los parámetros del modelo correspondientes a cada una de las pruebas de flotación de cobre realizadas. Los parámetros se encontraron utilizando la herramienta Solver disponible en el programa de planillas de cálculo Excel.

**Muestra AC**

Paquete	AC-4	AC-10	AC-14	AC-16	AC-17	AC-34	AC-38
NaOH / Ca(OH) <sub>2</sub>	3,7	-	-	4,0	3,7	4,0	-
AF-70+	200	200	100	100	100	50	100
	0	0	0	0	0	0	0
Ro %	62,2	0,0	70,1	69,2	61,1	67,2	72,6%
k min <sup>-1</sup>	0,965	0,412	0,170	1,325	1,328	0,655	1,229
Tiempo min							
Rec modelo	5	0,0	22,8	58,8	51,9	47,5	60,8%
	15	0,0	44,7	65,7	58,0	60,4	68,7%
	30	0,0	56,4	67,5	59,6	63,8	70,7%
Rec real	5	0,0	21,5	58,6	52,1	48,1	61,2%
	15	0,0	46,3	66,6	57,3	57,7	66,9%
	30	0,0	55,6	66,7	60,2	65,8	72,1%
Dif (Real-Modelo) <sup>2</sup>	0,00	0,00	0,05	0,01	0,01	0,12	0,05

**Muestra BC**

Paquete	BC-2	BC-5	BC-8	BC-11	BC-17
NaOH / Ca(OH) <sub>2</sub>	-	-	4,0	-	3,7
AF-70+	200	100	100	100	100
	0	0	0	0	0
Ro %	62,7	66,0	80,4	42,5	72,8
k min <sup>-1</sup>	0,2953	0,0993	15,632	0,1232	12,380
Tiempo min					
Rec modelo	5	14,0	70,1	10,8	61,1%
%	15	31,7	77,0	23,1	68,9%
	30	44,9	78,7	31,3	70,9%
	5	15,3	73,5	19,5	56,6%
Rec real %	15	30,5	77,9	29,0	63,7%
	30	45,4	83,7	46,5	65,7%
Dif (Real-Modelo) <sup>2</sup>	0,45	0,03	0,37	3,41	0,74

### Muestra CC

	CC-1	CC-4	CC-7	CC-8	CC-9	CC-10	CC-13	CC-15	CC-16	CC-17	CC-19	CC-20	CC-21
NaOH / Ca(OH) <sub>2</sub>	4,0	4,0	4,0	3,7	4,0	4,0	3,7	4,0	-	-	4,0	3,7	4,0
AX-343	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
AF-70+	100	100	100	100	200	100	200	100	200	100	100	50	100
Ro %	93,0	85,5	92,7	92,3	85,8	92,6	94,8	94,1	85,8	77,5	92,4	91,6	90,3
k min <sup>-1</sup>	10,998	10,843	14,026	0,9893	13,567	13,563	10,005	10,742	0,4330	0,8749	26,798	11,513	12,526
Tiempo min													
Rec modelo %	5	69,8	79,5	73,8	73,1	79,0	76,0	76,7	50,7	60,0	85,5	75,7	75,9
	15	80,3	88,3	86,1	81,6	88,1	88,5	88,3	72,7	71,6	90,1	86,3	85,5
	30	82,9	90,5	89,2	83,7	90,4	91,7	91,2	79,2	74,5	91,2	88,9	87,9
	5	70,5	79,3	73,7	73,3	78,8	76,1	76,4	51,3	60,2	85,4	75,9	76,0
Rec real %	15	77,2	89,3	86,6	80,7	88,9	88,2	89,5	70,9	70,6	90,3	85,6	84,8
	30	85,4	89,7	88,9	84,3	89,7	91,9	90,2	80,5	75,3	91,1	89,5	88,5
Dif (Real-Modelo) <sup>2</sup>	0,02	0,16	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,05	0,02	0,00	0,01	0,01