



**UNIVERSIDAD DE TALCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS**

**EVALUACIÓN DEL USO DE ACEITE VEGETAL RECICLADO COMO  
REACTIVO COLECTOR EN LA FLOTACIÓN DE MINERALES  
SULFURADOS DE COBRE UTILIZANDO AGUA DE MAR**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**FELIPE ANDRÉS ARCOS GÓMEZ**

PROFESOR GUÍA

DRA. LINA MARCELA URIBE VÉLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MSc. CARLOS MORAGA CRUZ

MSc. FRANCISCO RIVAS SALDAÑA

**CURICÓ – CHILE**

**2020**

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA  
DIRECCIÓN  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS  
CAMPUS CURICO

Curicó, 2022

## RESUMEN

Considerando una minería sustentable, el uso de agua de mar en el procesamiento de minerales en reemplazo del agua convencional resulta una alternativa atractiva, especialmente en aquellos casos en donde este recurso es limitado. Sin embargo, el uso de este medio acuoso genera una serie de desafíos tales como evitar la corrosión generada en los equipos expuestos a este medio y lograr una eficiencia en los procesos de concentración igual o superior a la obtenida en agua convencional. Específicamente, en el proceso de flotación con agua de mar se tiene la necesidad de lograr adaptar los reactivos tradicionales a este medio acuoso o proponer nuevos reactivos que logren mejores rendimientos y sean a la vez amigables con el medio ambiente.

En esta investigación se estudió la factibilidad técnica de la utilización de aceite vegetal reciclado (AVR) como colector de minerales sulfurados de cobre en el proceso de flotación empleando agua de mar, esto con el fin de evaluar si el AVR puede ser un reactivo capaz de ser selectivo con los minerales de cobre durante las primeras etapas de flotación y a la vez consigue deprimir pirita a valores de pH cercanos al pH natural del agua de mar. El estudio consideró la fijación de variables operacionales, como tiempo de flotación y velocidad superficial del gas, y la evaluación del flujo de aire más adecuado para el proceso y de diferentes concentraciones de reactivo colector y espumante respecto a los índices metalúrgicos obtenidos, considerando como colectores el AVR, el xantato amílico de potasio (PAX) y mezclas de estos, además del metil isobutil carbinol (MIBC) como agente espumante.

Los resultados indicaron que utilizando un flujo de aire de 5 L/min y un tiempo de flotación de 12 minutos se favorecía la recuperación de cobre en agua de mar. Asimismo, se evidenció que utilizando una concentración de AVR de 40 g/t y 15 g/t de MIBC se lograban los mejores índices metalúrgicos, que correspondieron a una razón de enriquecimiento de 6,29, una razón de concentración de 7,01, una recuperación de cobre de 90,06% y un índice de selectividad con respecto a la pirita de 4,03 y con respecto a la sílice de 12,89. Finalmente, en relación al estudio de las

mezclas de colector AVR y PAX, se encontró que, una mezcla de 60 g/t de AVR y 40 g/t de PAX en ausencia de espumante presentaba los mejores resultados en términos de recuperación de cobre (98,66%) y del índice de selectividad con respecto a la sílice (14,65), mejorando la selectividad del PAX y la recuperación en comparación con el uso de AVR como único colector.

De acuerdo con estos resultados, es posible concluir que el AVR puede ser considerado como un colector selectivo en la flotación *rougher* para sulfuros de cobre en agua de mar. Esta declaración representa una gran oportunidad para la industria a fin de minimizar los costos del proceso de flotación y generar un menor impacto ambiental.

**Palabras clave:** Flotación, Agua de mar, Colectores, Aceite vegetal, Aceite vegetal reciclado.

## ABSTRACT

Considering sustainable mining, the use of seawater in mineral processing to replace conventional water is an attractive alternative, especially in cases where this resource is limited. However, the use of this aqueous medium generates a series of challenges, such as, prevent corrosion generated in equipment exposed to the medium and achieve an efficiency in concentration processes equal to or greater than that obtained in conventional water. Specifically, in the seawater flotation process, it is necessary to adapt traditional reagents to the aqueous medium or to propose new reagents that achieve better performance and are environmentally friendly at the same time.

In this research, the technical feasibility of using vegetable recycled oil (RVO) as a collector of copper sulphides minerals in the flotation process using seawater was studied to evaluate whether the RVO can be a reagent capable of being selective with copper minerals during the first stages of flotation and, at the same time, it manages to depress pyrite at a pH close to that of seawater. The study considered the setting of operational variables, such as, flotation time and superficial gas velocity, and the analysis of the metallurgical indexes when different concentrations of collector and foaming reagent were used, considering as collectors the RVO, potassium amyl xanthate (PAX) and mixtures of these, in addition to the methyl isobutyl carbinol (MIBC) as foaming agent.

The results indicated that using an air flow of 5 L/min and a floating time of 12 minutes, the recovery of copper in seawater was favored. Also, it was evidenced that, using 40 g/t of RVO and 15 g/t of MIBC the best metallurgical indexes were achieved, which corresponded to an enrichment ratio of 6.29, a concentration ratio of 7.01, a copper recovery of 90.06% and a selectivity index with respect to pyrite of 4.03 and with respect to silica of 12.89. Finally, in relation to the study of the RVO and PAX collector mixtures, it was found that a mixture of 60 g/t of AVR and 40 g/t of PAX in the absence of foaming agent presented the best results in terms of copper recovery (98.66%) and the selectivity index with respect to silica (14.65), improving PAX selectivity and recovery compared to the use of RVO as the only collector.

According to these results, it is possible to conclude that RVO can be considered as a selective collector in the rougher flotation for copper sulphides in seawater. This declaration represents a great opportunity for the industry in order to minimize the costs of the flotation process and generate a lower environmental impact.

**Keywords:** Flotation, Seawater, Collectors, Vegetable oil, Vegetable recycled oil.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, José y Verónica, por entregarme sus valores, su cariño, su confianza y su dedicación día a día, además de todo lo que he necesitado y mucho más. No tengo dudas de que, sin ellos, esto no hubiera sido posible.

A mis hermanos, José Leandro y Vicente, por estar siempre presentes en mi vida con su cariño y apoyo en todo sentido.

A mis abuelas y abuelos, Fresia, Fideliza, Leandro y José, por su preocupación, sus consejos y sus constantes palabras de aliento.

A mi polola Catherine y a mis amigos Miguel, Ian, Camila y Julia por siempre acompañarme desinteresadamente en este proceso universitario y en la vida. A Cristian, Felipe, Eduardo, Jorge y a los demás compañeros/as que estuvieron presentes en las distintas etapas de este camino.

A mis tíos, primos y el resto de los familiares que han estado presentes a lo largo de mi vida y de este proceso con algún detalle y con sus buenos deseos.

A la profesora Lina por sus consejos, su motivación, por ser la guía de este trabajo de investigación y por sus buenas intenciones académicas conmigo, aportándome sus conocimientos metalúrgicos.

A la profesora Cristina por su apoyo en el laboratorio y por su buena onda siempre.  
A los pescadores que me ayudaron a conseguir agua de mar.

A Dios por brindarnos salud y contención en los momentos complicados.

*"Lo que sabemos es una gota de agua;*

*lo que ignoramos es el océano"*

*(Isaac Newton)*



# ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Objetivo general .....	6
1.2	Objetivos específicos .....	6
1.3	Alcances .....	7
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1	Fundamentos teóricos del proceso de flotación.....	8
2.1.1	Descripción del proceso .....	8
2.1.2	Equipos utilizados.....	9
2.2	Reactivos de flotación .....	11
2.2.1	Colectores .....	12
2.2.2	Espumantes.....	12
2.2.3	Modificadores .....	13
2.2.4	Efectos negativos de los reactivos de flotación .....	13
2.2.5	Reactivos de flotación alternativos .....	14
2.3	Agua de mar en flotación de minerales de cobre.....	20
2.3.1	Propiedades y características del agua de mar .....	20
2.3.2	Limitantes en la flotación de sulfuros de cobre y molibdeno.....	23
3	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	28
3.1	Equipos utilizados .....	28
3.1.1	Trituradora de mandíbula Chipmunk VD .....	28
3.1.2	Molino de bolas Labtech Hebro .....	28
3.1.3	Tamizadora Ro-tap RX-29.....	29
3.1.4	Celda de flotación Edemet.....	30
3.1.5	Filtro de presión Edemet.....	31

3.1.6	Horno de secado Bellhor .....	32
3.1.7	Analizador portátil de fluorescencia de rayos X .....	32
3.1.8	Balanza Boeco.....	33
3.2	Muestra mineral .....	34
3.3	Reactivos químicos .....	35
3.3.1	Colectores .....	35
3.3.2	Espumantes.....	35
3.3.3	Modificadores .....	35
3.3.4	Medio acuoso .....	35
3.4	Procedimiento experimental.....	36
3.4.1	Reducción de tamaño de la muestra mineral .....	36
3.4.2	Análisis granulométrico.....	37
3.4.3	Pruebas de flotación .....	37
3.4.4	Pruebas cinéticas de flotación colectiva .....	38
3.4.5	Pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de los colectores PAX y AVR en agua de mar .....	40
3.4.6	Pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de espumante MIBC en agua de mar .....	42
3.5	Cálculos y métodos de análisis empleados .....	44
3.5.1	Índices metalúrgicos .....	44
3.5.2	Ajuste de Klimpel .....	46
3.5.3	Velocidad superficial del gas .....	47
3.5.4	Suposiciones aplicadas .....	47
4	RESULTADOS .....	49
4.1	Caracterización de la muestra mineral.....	49
4.2	Pruebas cinéticas de flotación colectiva.....	50

4.2.1	Efecto del flujo de aire en la cinética de flotación .....	51
4.2.2	Cinéticas de flotación colectiva en agua de mar.....	56
4.3	Resultados de flotación en agua de mar en función de la concentración de colectores PAX y AVR .....	61
4.3.1	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de colector PAX .....	61
4.3.2	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de colector AVR .....	64
4.3.3	Resultados de las pruebas de flotación colectiva utilizando mezclas de colectores AVR/PAX en diferentes proporciones .....	68
4.4	Resultados de flotación en agua de mar en función de la concentración de espumante MIBC .....	71
4.4.1	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de 40 g/t de PAX.....	72
4.4.2	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de 40 g/t de AVR .....	75
4.4.3	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de 80 g/t de AVR .....	78
4.4.4	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de la mezcla AVR/PAX 60/40 .....	81
5	CONCLUSIONES .....	85
6	RECOMENDACIONES .....	89
7	BIBLIOGRAFÍA .....	90
8	APÉNDICE A: PLANILLAS DE DATOS DE RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO .....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1: Uso del agua de mar en la minería del cobre 2010-2018 (m<sup>3</sup>/s) (Cochilco, 2019).</i> .....	1
<i>Figura 1.2: Distribución porcentual del consumo de agua de mar en la minería del cobre según su forma de uso, periodo 2010-2018 (Cochilco, 2019).</i> .....	2
<i>Figura 1.3: Distribución porcentual del consumo de agua en la minería del cobre según origen, periodo 2019-2030 (Cochilco, 2020).</i> .....	3
<i>Figura 2.1: Etapas del proceso de flotación (Yianatos, 2005).</i> .....	9
<i>Figura 2.2: Celda de flotación mecánica (Vallebuona et al., 2007).</i> .....	10
<i>Figura 2.3: Celda de flotación neumática (Vallebuona et al., 2007).</i> .....	11
<i>Figura 2.4: Resultados obtenidos a partir de las pruebas de flotación con distintas dosis de aceite de canola (Owusu, 2016).</i> .....	18
<i>Figura 2.5: Recuperaciones de calcopirita y pirita para cada colector utilizado en función del tiempo de flotación (Owusu, 2016).</i> .....	19
<i>Figura 2.6: Recuperación de cobre a partir de calcosina en función del pH (Castro, 2012).</i> .....	22
<i>Figura 2.7: Comparación ley de concentrado con agua de mar y agua dulce en función del pH (Quinteros, 2012).</i> .....	22
<i>Figura 2.8: Diagrama de formación de especies de calcio (Liu et al., 2015).</i> .....	25
<i>Figura 2.9: Diagrama de formación de especies de magnesio (Liu et al., 2015).</i> ...	25
<i>Figura 2.10: Consumo de cal en función del pH para agua dulce y agua de mar (Castro, 2012).</i> .....	27
<i>Figura 3.1: Trituradora de mandíbula Chipmunk VD.</i> .....	28

<i>Figura 3.2: Molino de bolas Labtech Hebro.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.3: Tamizadora Ro-tap RX-29. ....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.4: Celda de flotación Edemet. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.5: Filtro de presión Edemet. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.6: Horno de secado Bellhor.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.7: Analizador portátil de fluorescencia de rayos X. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.8: Balanza Boeco. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.9: Distribución inicial de tamaños de la muestra utilizada. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.1: Curva granulométrica del mineral producto de la molienda. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.2: Cinéticas de flotación obtenidas en agua convencional a diferentes flujos de aire en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.3: Cinéticas de flotación obtenidas en agua convencional a diferentes flujos de aire en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.4: Cinéticas de flotación obtenidas en agua convencional a diferentes flujos de aire en presencia de 20 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.5: Cinéticas de flotación obtenidas en agua de mar a diferentes flujos de aire en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC. ....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.6: Cinéticas de flotación obtenidas en agua de mar a diferentes flujos de aire en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC. ....</i>	<i>58</i>

<i>Figura 4.7: Cinéticas de flotación obtenidas en agua de mar para 60 g/t de colector PAX y 100 g/t de colector AVR a un flujo de 5 L/min de aire y 15 g/t de espumante MIBC.</i>	60
<i>Figura 4.8: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	62
<i>Figura 4.9: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	63
<i>Figura 4.10: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	65
<i>Figura 4.11: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	66
<i>Figura 4.12: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	69
<i>Figura 4.13: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	70
<i>Figura 4.14: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.</i>	73
<i>Figura 4.15: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.</i>	74

<i>Figura 4.16: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.17: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.18: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar. ....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.19: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar. ....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.20: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar. ....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.21: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar. ....</i>	<i>83</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1: Composición típica del agua convencional de proceso (Aaltonen et al., 2011, citado en Uribe, 2017, p.43) y del agua de mar (Floor, 2006, citado en Uribe, 2017, p.43).</i> .....	20
<i>Tabla 3.1: Condiciones de operación de la celda de flotación Edemet.</i> .....	30
<i>Tabla 3.2: Set de pruebas cinéticas de flotación con PAX para análisis de flujo de aire.</i> .....	38
<i>Tabla 3.3: Primer set de pruebas cinéticas de flotación con AVR para análisis de flujo de aire.</i> .....	38
<i>Tabla 3.4: Segundo set de pruebas cinéticas de flotación con AVR para análisis de flujo de aire.</i> .....	39
<i>Tabla 3.5: Set de pruebas cinéticas de flotación en agua de mar con PAX.</i> .....	40
<i>Tabla 3.6: Set de pruebas cinéticas de flotación en agua de mar con AVR.</i> .....	40
<i>Tabla 3.7: Set de pruebas de flotación en función de la dosis de colector PAX....</i>	41
<i>Tabla 3.8: Set de pruebas de flotación en función de la dosis de colector AVR. ..</i>	41
<i>Tabla 3.9: Set de pruebas de flotación en función de diferentes dosis de mezclas de reactivos colectores.</i> .....	42
<i>Tabla 3.10: Definición de cada uno de los casos a estudiar en las pruebas en función de la concentración de espumante MIBC.</i> .....	43
<i>Tabla 3.11: Set de pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC para el caso PAX 40 g/t.</i> .....	43
<i>Tabla 4.1: Resultados del análisis FRX de la muestra mineral.</i> .....	50
<i>Tabla 4.2: Resultados del análisis DRX de la muestra mineral.</i> .....	50



<i>Tabla 4.3: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 16 de flotación con agua convencional en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4.4: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 16 de flotación con agua convencional en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 4.5: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 16 de flotación con agua convencional en presencia de 20 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 4.6: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 8 y 16 de flotación con agua de mar en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 4.7: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 8 y 16 de flotación con agua de mar en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 4.8: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 8 y 16 de flotación con agua de mar para 60 g/t de colector PAX y 100 g/t de colector AVR a un flujo de 5 L/min de aire y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 4.9: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4.10: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar. ....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.11: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de mezclas de colectores AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar. ....</i>	<i>70</i>

<i>Tabla 4.12: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 4.13: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar. ....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 4.14: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar. ....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 4.15: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar. ....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla A. 1: Análisis granulométrico final obtenido luego de molienda de 50 minutos en agua de mar. ....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla A. 2: Datos obtenidos de la cinética de flotación con 60 g/t de PAX a 5 L/min en agua de mar. ....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla A. 3: Datos obtenidos de la cinética de flotación con 100 g/t de AVR a 5 L/min en agua de mar. ....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla A. 4: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar. ....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla A. 5: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar. ....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla A. 6: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.....</i>	<i>95</i>

<i>Tabla A. 7: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i> .....	96
<i>Tabla A. 8: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i> .....	96
<i>Tabla A. 9: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i> .....	96
<i>Tabla A. 10: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i> .....	97
<i>Tabla A. 11: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i> .....	97
<i>Tabla A. 12: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i> .....	97
<i>Tabla A. 13: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.</i> .....	98
<i>Tabla A. 14: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.</i> .....	98
<i>Tabla A. 15: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.</i> .....	98

<i>Tabla A. 16: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	99
<i>Tabla A. 17: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	99
<i>Tabla A. 18: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	99
<i>Tabla A. 19: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	100
<i>Tabla A. 20: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	100
<i>Tabla A. 21: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	100
<i>Tabla A. 22: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.</i>	101
<i>Tabla A. 23: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.</i>	101
<i>Tabla A. 24: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.</i>	101

# 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, pensando en el desarrollo de la minería sostenible, la utilización de agua de mar en algunos de los procesos asociados a ella, como por ejemplo la flotación, surge como una alternativa atractiva en reemplazo del agua convencional que cada vez se halla más escasa. En Chile, específicamente, la minería se concentra principalmente en la zona norte del país, la cual tiene recursos hídricos limitados por lo que se trabaja de manera constante en busca de nuevas opciones de abastecimiento, de tal manera que el uso del agua de mar en las operaciones mineras proporciona una solución viable a este problema (Cochilco, 2019).

En el informe de Cochilco del año 2019 denominado “Consumo de agua en la minería del cobre al 2018”, se puede apreciar la evolución del consumo de agua de mar en la minería del cobre desde el año 2010 hasta el 2018 (Figura 1.1), con una tasa de crecimiento promedio anual del orden de 48%.

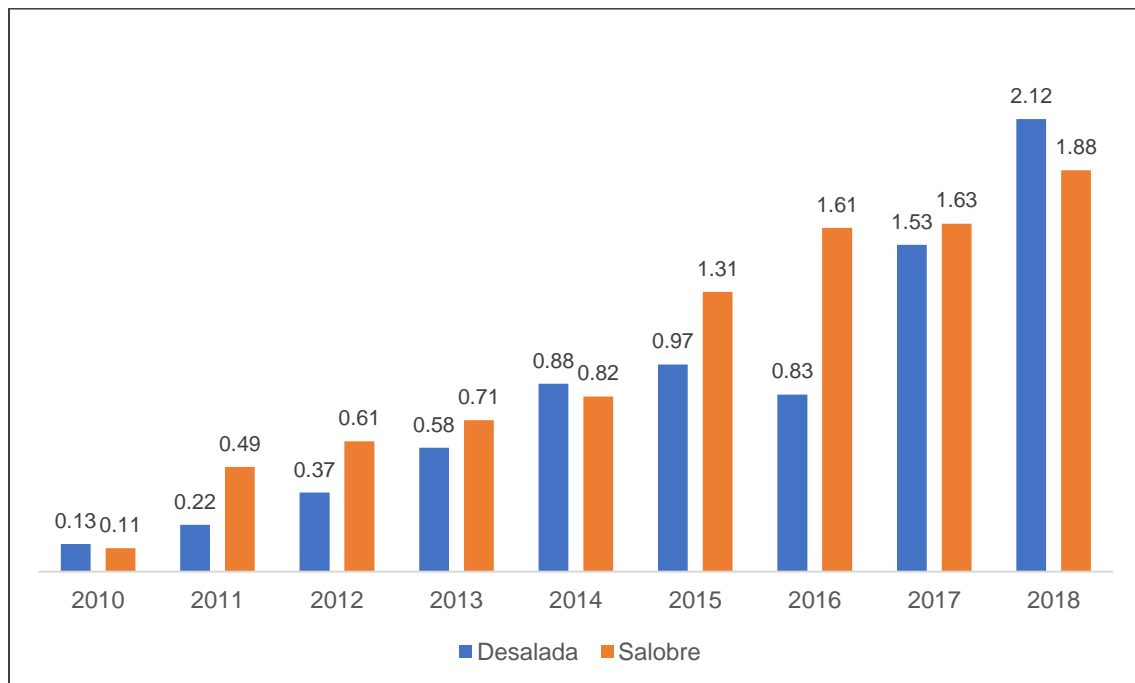
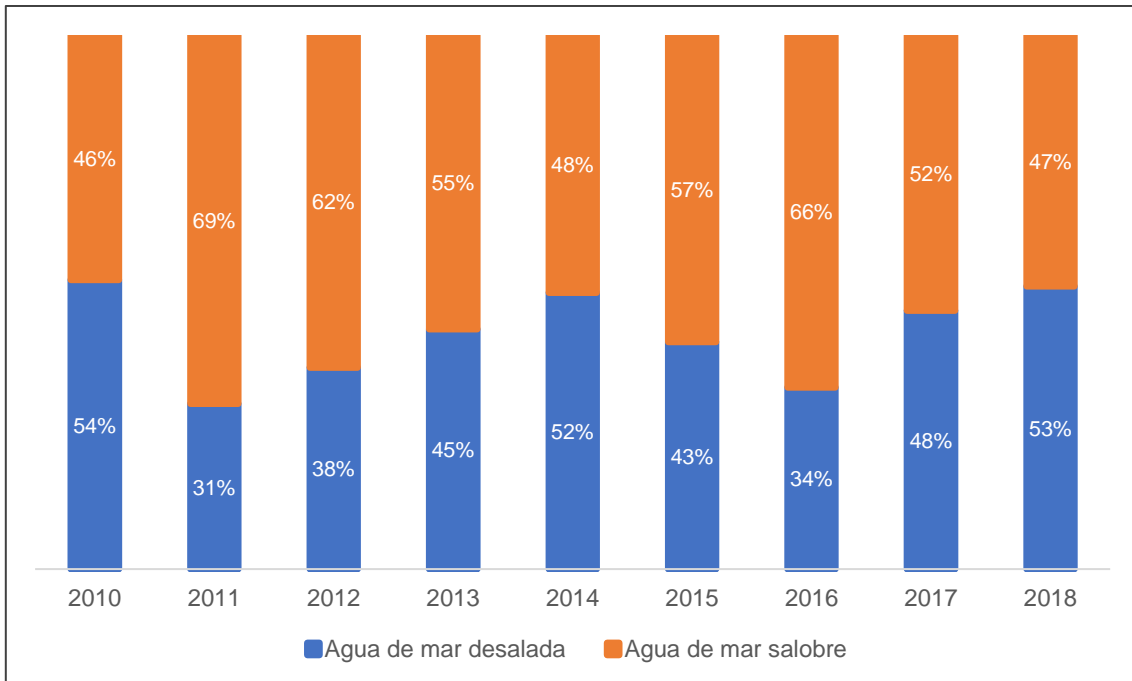


Figura 1.1: Uso del agua de mar en la minería del cobre 2010-2018 (m³/s) (Cochilco, 2019).

En el año 2018 el agua de mar en la minería del cobre alcanzó los 3,99 m³/s, representando un 23% del agua total utilizada en minería, de los cuales 2,12 m³/s

corresponden a agua de mar desalinizada y 1,88 m<sup>3</sup>/s a agua de mar utilizada directamente.

En este mismo contexto, la Figura 1.2 muestra la distribución porcentual entre el agua desalada y salobre de la totalidad del agua de mar consumida entre los años 2010 y 2018, en la cual se observa que en dicho periodo se ha utilizado, en promedio, mayor cantidad de agua de mar salobre, es decir, utilizada directamente en los distintos procesos aplicados en la minería del cobre.



*Figura 1.2: Distribución porcentual del consumo de agua de mar en la minería del cobre según su forma de uso, periodo 2010-2018 (Cochilco, 2019).*

Por otro lado, igualmente Cochilco en su informe denominado “Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2019-2030” manifiesta que se espera que al 2030 el consumo de agua de mar aumente un 156% respecto al 2019, representando un 47% del agua total requerida por la minería del cobre a nivel nacional, tal como se observa en la Figura 1.3.

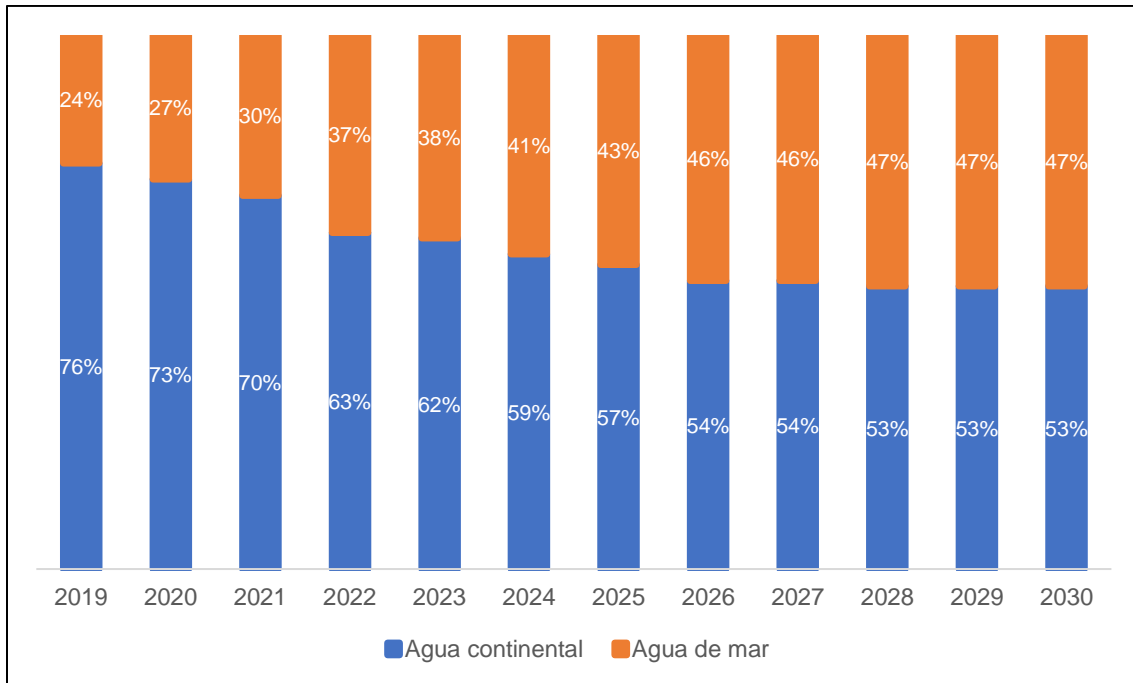


Figura 1.3: Distribución porcentual del consumo de agua en la minería del cobre según origen, periodo 2019-2030 (Cochilco, 2020).

Una gran cantidad de los nuevos proyectos mineros considera la utilización de agua de mar en sus operaciones, sin embargo, esto genera importantes desafíos en términos de costos debido a la fuerte inversión que se requiere para la instalación de una planta desalinizadora y el alto consumo energético tanto para desalinizar el agua como para bombearla desde el borde costero hasta la faena minera. Por otro lado, con respecto al uso de agua de mar directo, se deben buscar alternativas que permitan hacer frente a ciertas problemáticas generadas al utilizar este medio acuoso, tales como la corrosión generada en los equipos expuestos al agua de mar y la disminución de las tasas de eficiencia de algunos procesos como los de concentración, afectando finalmente la producción (Morales, 2017). Dentro de este marco, como posibles soluciones a dichos inconvenientes se ha planteado utilizar algunos revestimientos de materiales con alta resistencia química y mecánica (Minería Chilena, 2012), utilizar aleaciones de materiales que resistan de mejor modo el fenómeno de corrosión (Marulanda et al., 2017) y estudiar nuevas condiciones de operación en los diferentes procesos asociados a la minería que

permitan lograr recuperaciones y leyes metalúrgicas sin afectar la obtención de subproductos ni la producción global (Uribe, 2017).

La flotación es uno de los métodos de concentración de minerales más utilizados actualmente en la industria minera debido a la gran capacidad y eficiencia que ofrece dentro del proceso de obtención de los metales (Cochilco, 2017). En líneas generales, es un proceso fisicoquímico, cuyo objetivo es separar los minerales valiosos de los minerales de ganga. Los reactivos más importantes que se utilizan son los colectores, quienes se adsorben selectivamente en la superficie de las partículas minerales, haciéndolas hidrofóbicas y facilitando su adhesión a burbujas de gas inyectadas al proceso que ascienden a través de la pulpa formando un concentrado rico en el mineral de interés (Rezaei, 2018).

Cuando se utiliza agua de mar para llevar a cabo este proceso de concentración se generan una serie de problemáticas debido, principalmente, a la alta concentración de iones que esta posee. En primer lugar, se encuentra el ajuste de pH ya que el agua de mar actúa como una solución buffer, lo cual genera un aumento significativo del consumo de cal para lograr alcanzar los valores de pH requeridos en el proceso para deprimir la pirita (Castro, 2012). Adicionalmente, el agua de mar genera un efecto depresante sobre minerales secundarios como la molibdenita a valores de pH superiores a 9,5. Esto debido principalmente a la presencia de cationes de calcio y magnesio en solución, lo cual genera precipitados coloidales a pH superiores a este valor, impidiendo la recuperación de este mineral (Laskowski et al., 2013).

Por estas razones, surge la necesidad de hallar nuevos reactivos que logren recuperar los minerales de cobre en agua de mar, sin afectar la recuperación de minerales secundarios, e idealmente que consigan deprimir pirita a valores de pH cercanos al del agua de mar o que sean más selectivos con los minerales de cobre durante las primeras etapas de flotación generando una menor cantidad de pirita en las fases posteriores. En este sentido, surge como una potente alternativa el uso de aceites vegetales. Dentro de este marco, se ha estudiado que el aceite de canola ofrece ventajas significativas cuando se usa agua de mar ya que la depresión de pirita se logra a valores de pH en los cuales se produce una mínima precipitación



de cationes demostrando que este reactivo puede actuar como un exitoso depresante de este sulfuro de hierro en presencia de aguas salinas. Además, se destaca que este colector alternativo tiene una especificidad de adsorción más alta para la calcopirita que para la pirita, generando una alta selectividad para recuperar minerales de cobre y sugiriendo que tiene un gran potencial para ser considerado como un reactivo colector en la flotación de sulfuros de cobre en agua de mar (Owusu, 2016).

Atendiendo a estas consideraciones, en esta investigación se plantea estudiar un aceite vegetal reciclado como colector de minerales sulfurados de cobre en el proceso de flotación en presencia de agua de mar de tal modo de establecer algunas de sus características en función de los resultados que se obtengan en las pruebas de laboratorio planificadas.

## 1.1 Objetivo general

Evaluar a nivel de laboratorio, la factibilidad técnica de la utilización de aceite vegetal reciclado (AVR) como colector de minerales sulfurados de cobre en el proceso de flotación empleando agua de mar, mediante pruebas comparativas de flotación con colector convencional xantato amílico de potasio (PAX) y colector AVR, bajo distintas condiciones.

## 1.2 Objetivos específicos

- Estudiar el efecto del flujo de aire en la flotación de minerales de cobre en agua de mar en presencia de colector AVR y PAX esto con el fin de fijar la condición de flujo que favorece su recuperación.
- Comparar la cinética de flotación obtenida en función de la recuperación de minerales de cobre en presencia de AVR y colector PAX en agua de mar, esto con el fin de fijar tiempos de flotación que favorecen la recuperación de cobre en presencia de AVR.
- Determinar mediante pruebas de flotación *batch* la concentración de colector PAX, AVR y mezclas de ambos, a las cuales se logra la mayor recuperación y selectividad de mineral de cobre en agua de mar y comparar los resultados obtenidos para cada caso.
- Estudiar el efecto de la concentración de espumante metil isobutil carbinol (MIBC) sobre la recuperación, ley de cobre y selectividad del proceso de flotación de minerales de cobre usando las mejores concentraciones de colector PAX, AVR y mezclas de ambos, esto con el fin de determinar la dosis de espumante que maximiza estos índices metalúrgicos.

### 1.3 Alcances

Los estudios que se realizaron en este trabajo fueron únicamente a nivel de laboratorio y se basaron exclusivamente en el desarrollo experimental de pruebas de flotación *batch* mediante el empleo de agua de mar directamente, intentando simular el contexto industrial para la concentración de minerales mediante el proceso de flotación.

Debido a lo anterior, es importante indicar lo siguiente:

- La caracterización mineralógica se realizó buscando representar únicamente la muestra total de mineral utilizada en el proyecto, sin perjuicio de la procedencia que haya tenido.
- Se utilizó un rango de granulometría determinado acorde con los requerimientos y la aplicación del proceso real.
- Se establecieron algunas condiciones de operación precisas de la celda de flotación como velocidad de agitación, pH de la pulpa, tiempo de acondicionamiento, tiempo de flotación, entre otros.
- El estudio solo contempló variaciones en el tipo de colector y espumante, pero no se evaluaron reactivos modificadores.
- El proyecto no contempló la realización de una evaluación económica tanto de los productos obtenidos como de la posible implementación del proceso a escala industrial.

## **2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Fundamentos teóricos del proceso de flotación**

#### **2.1.1 Descripción del proceso**

La flotación es uno de los métodos de concentración de minerales más utilizados actualmente en la industria minera debido a la gran capacidad y eficiencia que ofrece dentro del proceso de obtención de los metales. En la minería del cobre, la flotación se puede aplicar desde el tratamiento de sus minerales sulfurados hasta en complejos sistemas de separación de variados metales como es el caso del cobre, plomo y zinc (Cochilco, 2017).

Este proceso se realiza para separar o concentrar minerales valiosos de otros minerales con poco interés técnico o económico desde una pulpa o suspensión, y se basa principalmente en las diferencias de las propiedades fisicoquímicas presentes en las superficies de las partículas, específicamente en la característica de hidrofobicidad. En la flotación intervienen principalmente tres elementos: una fase sólida representada por las partículas minerales que se desean separar, una fase líquida que universalmente es agua y una fase gaseosa, por lo general aire o nitrógeno, que se inyecta en la pulpa para formar burbujas. Básicamente, esta técnica consiste en adherir selectivamente burbujas de gas a las partículas de mineral valioso, generalmente de granulometría entre 5 y 180 micrones, con el objetivo de apartarlas de las partículas de ganga, tal que se forme un concentrado rico en el mineral de interés. Por otra parte, las partículas que no fueron colectadas dentro del concentrado se descartan en una corriente designada como relave o cola de flotación (Uribe, 2017).

El proceso de flotación consta de dos etapas. La primera se denomina “Captura selectiva de partículas”, en la cual se forma el agregado partícula-burbuja, lo cual se logra añadiendo reactivos químicos que modifican las propiedades superficiales de los minerales, tanto valioso como ganga. Existen minerales afines al agua, es decir, son hidrofílicos y otros que repelen el agua, conocidos como minerales hidrofóbicos. En la segunda etapa de “Separación de burbujas”, el agregado

partícula-burbuja es separado de la pulpa por levitación de tal forma que se forma una capa de espuma, la cual finalmente rebalsa generando la corriente de concentrado. Idealmente las burbujas no deben ser arrastradas hacia las colas, sin embargo, en la práctica existe arrastre de burbujas finas, arrastre de mineral valioso a las colas, arrastre de ganga al concentrado y retorno de mineral valioso a la pulpa debido a que el proceso y los equipos no son perfectos (Yianatos, 2005). A continuación, en la Figura 2.1, se muestra un esquema de flotación, en el cual se pueden apreciar las etapas del proceso descritas anteriormente.

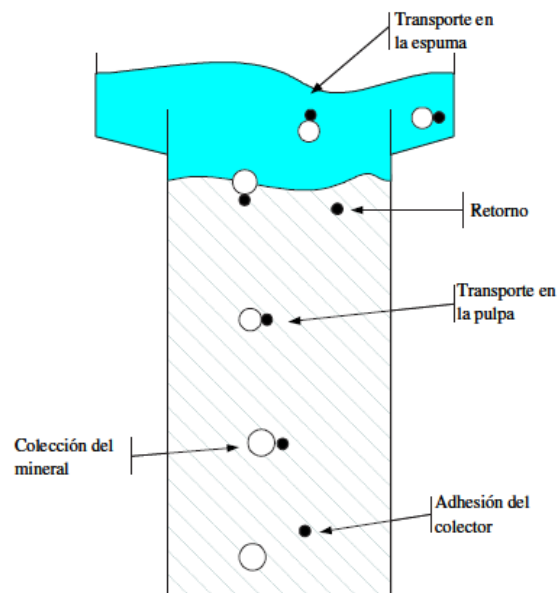


Figura 2.1: Etapas del proceso de flotación (Yianatos, 2005).

### 2.1.2 Equipos utilizados

Para realizar este proceso se requieren equipos industriales de gran tamaño que reciben el nombre de celdas de flotación, cuyo objetivo es cumplir con una serie de funciones simultáneas como la suspensión de partículas sólidas, aspiración y dispersión de aire en forma de pequeñas burbujas y finalmente, el contacto y mezclado de las partículas con el aire. En las celdas de flotación se le debe suministrar al fluido un ambiente en el cual existan principalmente dos zonas, una con alta intensidad de mezclado y otra de relativa tranquilidad, de tal forma que el

agregado partícula-burbuja pueda pasar a una región de calma para la separación, ingresando finalmente a la fase espuma (Yianatos, 2005).

Existen dos grandes familias de estos reactores, las celdas mecánicas (Figura 2.2) y las celdas neumáticas (Figura 2.3). Las primeras son las más comunes y las más utilizadas en la industria ya que en ellas se realiza la flotación *rougher* o primaria. Se caracterizan por tener un impulsor o agitador mecánico, alrededor del cual existe un tubo concéntrico hueco que sirve como conducto para el ingreso y dispersión del gas hacia la pulpa. Según el tipo de aireación se tienen celdas auto aspirantes y con aire forzado. El valor ideal para la velocidad superficial del gas ( $J_g$ ) en este tipo de celdas debe estar entre 0,5 cm/s y 2,5 cm/s (Moraga, 2018). No existe una forma o geometría estándar para estas celdas, pudiendo ser cuadradas, rectangulares o circulares, con fondo plano o curvo y su objetivo fundamental es maximizar la recuperación de mineral valioso (Yianatos, 2005).



Figura 2.2: Celda de flotación mecánica (Vallebuona et al., 2007).

Por otro lado, las celdas neumáticas o columnares son utilizadas en las etapas de limpieza de concentrados debido a que son capaces de producir mejores leyes que las anteriores. Usualmente, tienen una altura de 9 a 15 metros y están compuestas de secciones cuadradas o rectangulares con lados generalmente de 1 metro. El aire

ingresa a las columnas a través de inyectores o *spargers*, ubicados horizontalmente en la parte baja, mientras que la pulpa se alimenta en la parte superior, bajo la interfase pulpa-espuma, de tal forma que las partículas de mineral a medida que descienden se encuentran en contra corriente con las burbujas de gas en la región denominada como zona de colección (Yianatos, 2005). El valor ideal para la velocidad superficial del gas ( $J_g$ ) en este tipo de celdas debe estar entre 0,8 cm/s y 1,9 cm/s (Moraga, 2018).

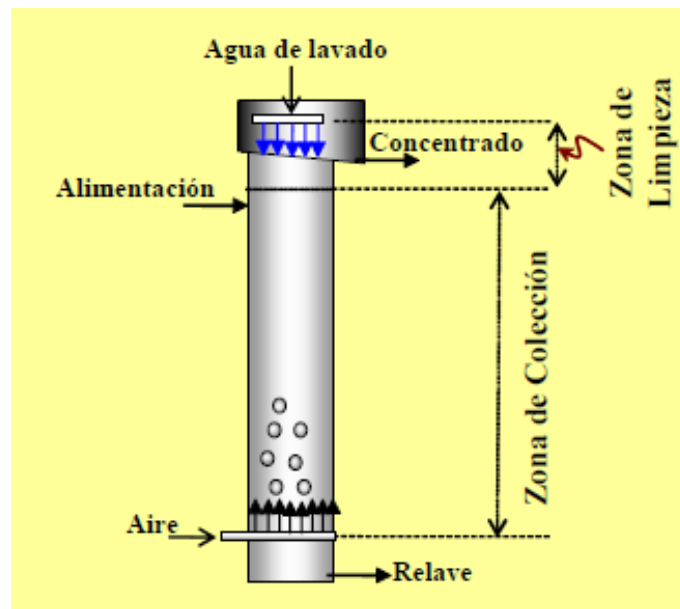


Figura 2.3: Celda de flotación neumática (Vallebuona et al., 2007).

## 2.2 Reactivos de flotación

Para que se lleve a cabo el proceso de flotación, es necesario que las condiciones del sistema sean apropiadas para lograr que las partículas de mineral valioso se adhieran a las burbujas y formen un agregado estable capaz de llegar a la superficie. Existen diferentes reactivos que se agregan al proceso y que optimizan estas condiciones para que sea efectivo, dentro de los cuales tenemos colectores, espumantes y modificadores.

### **2.2.1 Colectores**

Son los reactivos más importantes del proceso de flotación ya que son quienes se adsorben en las superficies de los minerales de interés idealmente, proporcionándole propiedades hidrofóbicas de forma de favorecer la fijación de burbujas (Rezaei, 2018).

La adición de los colectores (y de todos los demás reactivos) se regula en forma manual o automática en distintos puntos del proceso, desde la molienda húmeda hasta la flotación propiamente tal, de acuerdo con los tonelajes y flujos que se posea (Martínez, 2018; Yianatos, 2005).

Los colectores, tienen la función de inducir hidrofobicidad a partículas minerales que no lo poseen en forma natural. Estos se adsorben selectivamente en la superficie de las partículas formando un recubrimiento colector que incrementa fuertemente el ángulo de contacto, mejorando la flotación. Los colectores se pueden clasificar dependiendo de su carga en no polares, aniónicos y catiónicos. Los colectores no polares son aceites de hidrocarburos simples, mientras que los aniónicos y catiónicos, poseen una parte polar que se adsorbe selectivamente sobre la superficie de las partículas y una parte no polar que se extiende hacia la solución generando un recubrimiento hidrofóbico. Los colectores aniónicos o catiónicos pueden adherirse químicamente a la superficie del mineral (quimisorción) o a través de fuerzas físicas (adsorción física) (Leja, 1982).

Los xantatos son los colectores más utilizados en la industria para la flotación de sulfuros de cobre debido a su alta selectividad. Estos reactivos son colectores aniónicos que consisten en un hidrocarburo no polar radial y un grupo polar. Se preparan mediante la reacción de un alcohol, un hidróxido alcalino y disulfuro de carbono (Wills and Finch, 2016).

### **2.2.2 Espumantes**

Son reactivos que tienen diversas funciones, pero principalmente son quienes se encargan de generar una espuma estable, reducir el tiempo de inducción y generar



burbujas pequeñas proporcionando un área mayor de contacto partícula-burbuja (Uribe, 2018).

Además, presentan otras acciones que influyen en el proceso de flotación, como, por ejemplo:

- Prevenir la coalescencia de las burbujas de aire
- Disminuir la velocidad de ascenso de las burbujas hasta la fase espuma en la superficie
- Mejorar la dispersión de aire en la celda
- No tener efecto colector sobre partículas minerales de ganga

### **2.2.3 Modificadores**

Estos reactivos tienen la función de modificar las propiedades fisicoquímicas del sistema para optimizar el proceso. Dentro de ellos podemos encontrar los reguladores de pH, que generalmente es cal y que tienen la función de controlar la acidez o alcalinidad de la pulpa para promover o evitar la adsorción de colectores según corresponda, depresantes, que se utilizan para prevenir que los colectores interactúan con partículas no deseadas, y activadores, que acondicionan la superficie de las partículas del mineral de interés de tal forma que ocurra la adsorción efectiva del colector (Uribe, 2018).

### **2.2.4 Efectos negativos de los reactivos de flotación**

Vinculado a este concepto, Rezaei (2018) señala que, según estimaciones, aproximadamente solo la mitad de los reactivos que se agregan a un circuito de flotación se consumen en el proceso, mientras que la mitad restante se descarga en la planta de relaves. Estos reactivos residuales en los relaves de flotación pueden causar problemas ambientales al contaminar los recursos hídricos cercanos. En este sentido en relación con los colectores, se conoce que el xantato residual en los relaves puede tener grandes consecuencias ambientales, ya que puede causar contaminación de las aguas subterráneas como resultado de un diseño inadecuado de la presa de relaves. Además, el agua de proceso reciclada de las presas de

relaves puede tener efectos perjudiciales sobre la selectividad de flotación debido a los muchos compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos (Rezaei, 2018).

Por otro lado, es sabido que algunos de los colectores convencionales como los xantatos, además de ser costosos, introducen muchos riesgos a la salud e impactos negativos al medio ambiente, debido a que poseen gran toxicidad, son altamente inflamables y pueden descomponerse en gases tóxicos como el disulfuro de carbono ( $CS_2$ ) durante la fabricación, transporte y uso, documentándose efectos adversos en múltiples órganos del cuerpo (Ellis, 2011). También se han reportado incendios relacionados con xantato, como uno en Mount Isa, Queensland, Australia en 1994 y uno en O'Connor, Western Australia en 1994 (Singh et al., 2011). Además, se sabe que los xantatos son tóxicos para la vida acuática (Boening, 1998).

Recientemente, los organismos reguladores de Ontario, Canadá, redujeron el promedio de tiempo ponderado del disulfuro de carbono a 1 ppm, una décima parte del límite anterior (Williams et al., 2013). En Chile, también se están gestionando normativas ambientales para regular las emisiones de contaminantes a la atmósfera, para tal efecto, en el año 2018, entró en vigor la norma de fundiciones impuesta por el decreto N°28 del Ministerio de Medio Ambiente que obliga a limitar a 95% la emisión de material particulado (MP), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), arsénico (As) y mercurio (Hg) (Reporte minero, 2018).

Por estas razones, es que existe un gran impulso por parte de la industria minera y metalúrgica para minimizar estos efectos negativos generados tanto para el medio ambiente como para la salud ocupacional de los participantes del proceso productivo en general. Ante esto, surge la necesidad de encontrar nuevos agentes químicos capaces de cumplir con los requerimientos técnicos y económicos de los distintos procesos empleados actualmente (Rezaei, 2018).

### **2.2.5 Reactivos de flotación alternativos**

Anastas y Warner desarrollaron "Los doce principios de la química verde", que se usan ampliamente como pautas de referencia para los químicos e ingenieros en el desarrollo y la evaluación de qué tan verde o amigable ambientalmente es una

síntesis, un compuesto, un proceso o una tecnología (Anastas y Warner, 1998). De acuerdo con estos principios, un colector debe ser básicamente ecológico, rentable, renovable, seguro y eficiente para ser catalogado como ambientalmente amigable, por lo tanto, los aceites vegetales reciclados pueden considerarse un colector verde para el proceso de flotación debido principalmente a que son renovables, están disponibles y son una materia prima no contaminante. En este sentido, los aceites vegetales son cada vez más investigados para usos alternativos como la producción de biodiesel y como materia prima para la industria química y otras industrias (Valdés y García, 2006). También, se planteó la hipótesis de que los aceites vegetales formados por ácidos grasos de cadena larga podrían actuar como colector y/o espumante (Klimpel y Hansen, 1987).

Benn et al. (1996) patentaron el uso de aceite de colza como colector selectivo para la recuperación de galena (PbS) en presencia de pirita. Una prueba de flotación de laboratorio donde se utilizó un mineral de sulfuros complejos de plomo, zinc, cobre y hierro con 240 g/t de aceite de colza como colector arrojó una mayor recuperación de minerales de plomo, cobre y zinc que cuando se usaban los típicos colectores (xantato, ditiofosfato, etc.), manteniendo recuperaciones de pirita similares a las obtenidas con los colectores convencionales.

Bauer et al. (2000) y Greene et al. (2012) patentaron el uso de varios aceites como colectores para la recuperación de calcopirita y molibdenita de un mineral que contenía 0,579% de Cu y 0,010% de Mo. Uno de los aceites utilizados fue el de canola y las condiciones estándar de flotación incluían 5,5 g/t de colector tiofosfato, 7,7 g/t de diesel y 10 g/t de espumante Nalco 9743 a un pH de 10,4 usando cal para elevar y controlar este parámetro. En condiciones estándar, las leyes del concentrado logradas en ausencia aceite eran 4,94% de Cu y 0,071% de Mo y recuperaciones de 88,3% de Cu y 79,2% de Mo. Mientras que, cuando se añadía cal, 24 g/t de aceite de canola y 10 g/t de espumante a la molienda, en la flotación llevada a cabo con dicha pulpa se lograban leyes de concentrado de 8,43% de Cu y 0,130% de Mo de y recuperaciones de 82% de Cu y 80,6% de Mo. Lo anterior demuestra que el uso de aceite de canola como colector, logra una ley de cobre

más alta y una recuperación un poco menor a la estándar y, en cuanto al molibdeno, se observa que la ley aumenta significativamente mientras que la recuperación presenta un ligero aumento.

Otra aplicación de aceites como colectores se había realizado en el año 1915, cuando un mineral de calcopirita, oro, pirita y cuarcita se procesó para la recuperación de cobre y oro con aproximadamente 450 g/t de aceites de eucalipto en la mina Mount Morgan, Queensland, Australia. En este estudio se obtuvo un concentrado que presentaba 10,7% de Cu, 40 g/t de Au y una recuperación de cobre y oro del 80% y 68%, respectivamente, de una muestra de alimentación analizada al 2% de Cu y 9,3 g/t de Au (Shellshear, 1916).

El impulso actual está relacionado con la búsqueda de reactivos colectores no perjudiciales para la salud, que sean amigables ambientalmente y adecuados para minerales de tipo sulfuros que reduzcan o eliminen la generación de sustancias peligrosas en la industria de procesamiento de minerales. Por lo tanto, existe la necesidad de una operación de procesamiento de minerales de sulfuro de cobre, mejorada, que emplee reactivos de flotación alternativos de alta selectividad con el fin de evitar la presencia de ganga sulfurosa como la pirita en el concentrado, a un costo competitivo y una toxicidad reducida, en comparación a los reactivos utilizados de manera convencional (Owusu, 2016).

De esta manera, el uso de los aceites comestibles y/o reciclados se presenta como una alternativa amigable con el medio ambiente y rentable para la flotación de sulfuros metálicos.

En el año 2016, Clement Owusu realizó una investigación relacionada con el uso de aceites de canola y de palma como colectores de flotación, en la cual se concluyó que la recuperación de la calcopirita y molibdenita se veía favorecida de forma más selectiva en comparación con la pirita que los colectores convencionales como el xantato isopropílico de sodio (SIPX) o xantato amílico de potasio (PAX) (Owusu, 2016). En dicha investigación, se utilizaron muestras de calcopirita y pirita con un 75% y 90% de pureza, respectivamente, las cuales fueron estudiadas de manera individual y mezcladas entre sí a una proporción 50/50. De la misma manera, se

utilizaron SIPX y aceite de canola como colectores por separado o mezclados en proporción 1/1. En cada prueba se agregaron 100 g de muestra de mineral a un molino de barras junto con 0,3 L de agua produciendo una pulpa con un P80 de 45  $\mu\text{m}$ , que posteriormente fue vertida en una celda de flotación de 0,75 L, para llevar a cabo el proceso de concentración a un pH de 10,5. Dentro de los resultados obtenidos a partir de las pruebas de flotación realizadas en esta investigación se puede resumir lo siguiente:

- La recuperación de calcopirita y pirita puras en las mismas condiciones de operación, pero sin adición de colector fueron de 80% y 3%, respectivamente. Sin embargo, con adición de aceite de canola estos valores aumentaron en un 17% y 4% aproximadamente. Con estos resultados se puede aseverar que la calcopirita presenta una buena flotación en ausencia de colector. Además, se aprecia claramente que el aceite de canola funciona como un reactivo colector para la flotación de minerales.
- Cuando se realizaron pruebas de flotación con mezclas de calcopirita y pirita se observa que la recuperación y ley de estos minerales se ve fuertemente influenciada por la dosis de reactivo aplicada. Estos resultados se pueden apreciar en la Figura 2.4, donde se observa que la recuperación de calcopirita aumentó con el aumento de la dosis de aceite de canola hasta un máximo, lográndose una recuperación aproximadamente constante de 97% a partir de los 200 g/t de colector. Por otro lado, la ley de calcopirita aumentó desde 84% (0 g/t de aceite de canola) a 93% (200 g/t), sin embargo, a mayores concentraciones de aceite la ley de calcopirita se vio comprometida, disminuyendo a 81% y 76% cuando se emplearon dosis 10.000 g/t y 20.000 g/t, respectivamente. Esta disminución en la ley de calcopirita, se vio relacionada con el aumento de la recuperación de pirita que fue sistemática desde 4% a 28% al aumentar la dosificación de aceite de canola de 0 g/t a 20.000 g/t. Por lo tanto, se evidencia que la tasa de adición de este colector podría afectar la selectividad de la recuperación de calcopirita sobre la pirita.

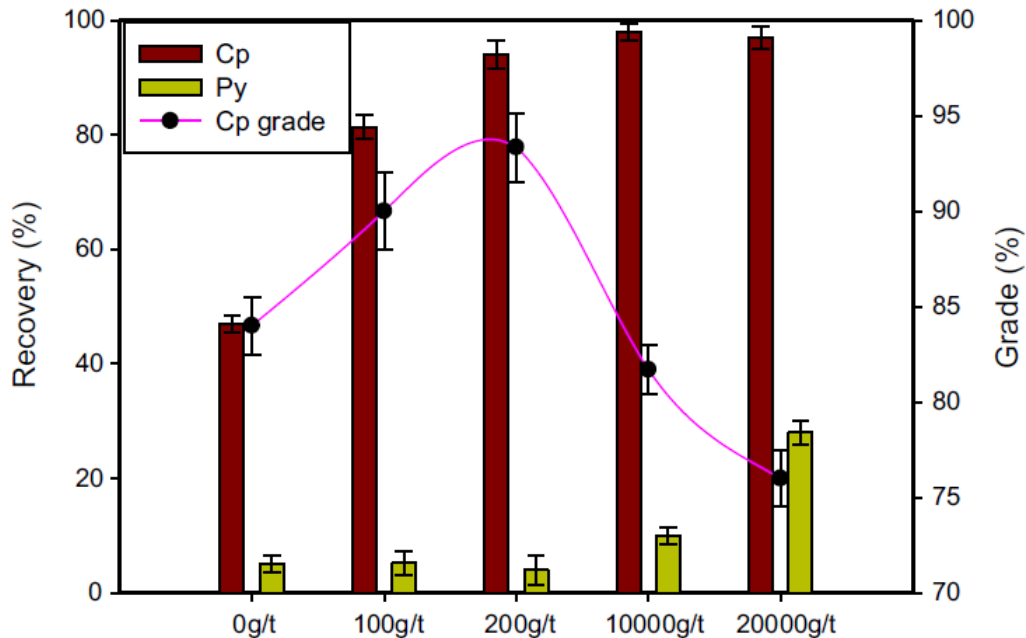


Figura 2.4: Resultados obtenidos a partir de las pruebas de flotación con distintas dosis de aceite de canola (Owusu, 2016).

- Para determinar si el uso del aceite de canola ofrece o no ventajas sobre colectores convencionales, en el estudio se utilizó SIPX para establecer una comparación entre los resultados obtenidos a las mismas condiciones de operación. Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que la recuperación de calcopirita con este colector a 200 g/t fue del 98%, existiendo una diferencia marginal con respecto a la recuperación obtenida con el aceite de canola. Sin embargo, en términos de ley, se destaca que existió una mayor ley con el colector alternativo que con el colector convencional SIPX, obteniéndose una ley de calcopirita de 71% con SIPX versus el 93% obtenido con aceite de canola.
- Cuando se utilizaron mezclas de ambos reactivos (100 g/t de cada uno), se produjo un efecto sinérgico, logrando un 86% de ley de calcopirita y una recuperación de 97%. De esta manera se vio favorecida tanto la ley de calcopirita obtenida cuando se usó solo SIPX, como la recuperación conseguida cuando se utilizó solo aceite de canola.

- Adicionalmente se realizaron réplicas de las pruebas de flotación anteriores con muestras individuales de cada mineral utilizando agua de mar y manteniendo un pH con un valor cercano a pH 8,5 (Figura 2.5), con el fin de validar la hipótesis en la que se plantea la posibilidad de conseguir buenos resultados en términos de recuperación, ley y selectividad para el cobre cuando se utiliza este medio líquido y aceite de canola como colector. Los resultados presentados en la Figura 2.5 indican que aproximadamente, se obtuvo la misma recuperación de calcopirita cuando se usó SIPX o aceite de canola como colector, las recuperaciones correspondieron a 73% para el aceite de canola y 74% para SIPX. Sin embargo, cabe destacar que la recuperación de pirita disminuyó drásticamente cuando se usó aceite de canola en lugar de SIPX, obteniéndose una recuperación de pirita del 87% en presencia de SIPX y de 6% en presencia de aceite de canola.

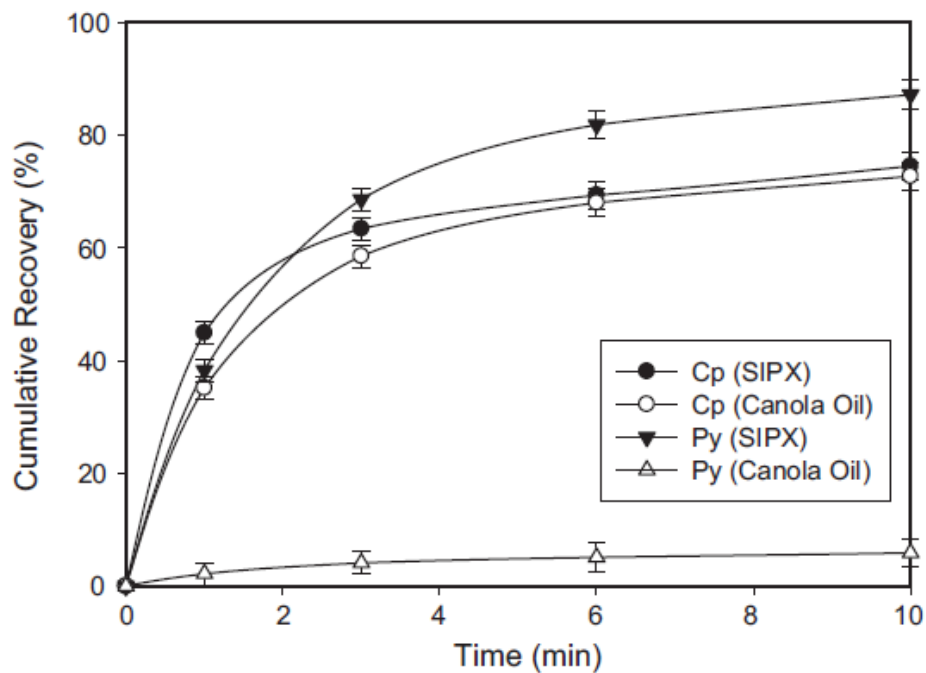


Figura 2.5: Recuperaciones de calcopirita y pirita para cada colector utilizado en función del tiempo de flotación (Owusu, 2016).

De acuerdo a lo anterior, es posible observar que el aceite de canola ofrece ventajas significativas cuando se usan aguas salinas, ya que la depresión de pirita se puede lograr a valores de pH donde se produce una precipitación mínima de cationes.

Estos hallazgos preliminares sugieren que el uso de aceite de canola tiene el potencial de agregarse a la gama existente de colectores de flotación con características favorables adicionales y muy deseables para las propiedades de salud ocupacional y medioambientales (Owusu, 2016).

## 2.3 Agua de mar en flotación de minerales de cobre

### 2.3.1 Propiedades y características del agua de mar

El agua de mar tiene una composición química muy diferente al agua convencional. Por un lado, el agua convencional está compuesta principalmente por sulfatos, nitratos, magnesio, calcio y sodio y tiene un pH que normalmente oscila entre 6,7 y 7,5. En cambio, el agua de mar posee una mayor complejidad ya que tiene una alta concentración de iones disueltos y valor de pH entre 7,8 y 8,2. Se compone esencialmente de 96,4% de agua pura y 3,6% de minerales disueltos, de los cuales tres cuartas partes corresponden a cloruro de sodio (NaCl). En la Tabla 2.1, se presenta la composición más común tanto del agua convencional como del agua de mar utilizadas en el procesamiento de minerales (Uribe, 2017).

*Tabla 2.1: Composición típica del agua convencional de proceso (Aaltonen et al., 2011, citado en Uribe, 2017, p.43) y del agua de mar (Floor, 2006, citado en Uribe, 2017, p.43).*

<b>Agua convencional</b>	
<b>Especie iónica</b>	<b>Concentración (ppm)</b>
Nitrato, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	21,3
Tiosulfato, S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	<5
Sulfato, SO <sub>4</sub>	330,5
Amonio, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<1
Aluminio, Al <sup>3+</sup>	<1
Magnesio, Mg <sup>2+</sup>	47,4
Calcio, Ca <sup>2+</sup>	77,0
Hierro, Fe <sup>2+</sup>	<0,8
Sodio, Na <sup>+</sup>	31,5
<b>Agua de mar</b>	
Cloruro, Cl <sup>-</sup>	19.345
Sodio, Na <sup>+</sup>	10.755
Sulfato, SO <sub>4</sub>	2.701



Magnesio, Mg <sup>2+</sup>	1.295
Calcio, Ca <sup>2+</sup>	416
Potasio, K <sup>+</sup>	390
Bicarbonato, HCO <sup>3-</sup>	145
Bromuro, Br <sup>-</sup>	66
Borato, BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	27
Estroncio, Sr <sup>2+</sup>	13
Fluoruro, F <sup>-</sup>	1

Desde el punto de vista de la concentración de minerales y en particular para minerales de cobre, los estudios existentes apuntan que la concentración de los minerales de enriquecimiento primario, como la calcopirita, responde bien en agua de mar en un amplio rango de pH, es decir, la variabilidad de la recuperación no es tan significativa. Mientras que, en el caso de los minerales de enriquecimiento secundario, como la calcosina y covelina, su respuesta en términos de recuperación es fuertemente dependiente del pH y su óptimo valor es alrededor de 10 (Castro, 2012).

En general, en los estudios revisados de Castro, se concluye que la recuperación de minerales de cobre y las leyes en el concentrado son mayores en agua convencional que en agua de mar, para cualquier condición de pH. Por otra parte, con relación al hierro, se ha establecido que las recuperaciones son similares utilizando ambos tipos de agua, lo que explicaría una menor ley de cobre en los concentrados alcanzados con el uso de agua de mar.

En la Figura 2.6 se pueden apreciar los resultados experimentales de la recuperación de calcosina en función del pH para diferentes fases líquidas. Se puede concluir de la gráfica que a pH menores o iguales a pH 11 la recuperación de cobre siempre es mayor en agua convencional que en los distintos medios salinos. Respecto a las leyes de cobre, la Figura 2.7 muestra dichos índices para un concentrado *cleaner* de un mineral de Mantos Blancos flotado con agua de mar y agua dulce a diferentes condiciones de pH, siendo siempre mayores en agua convencional.

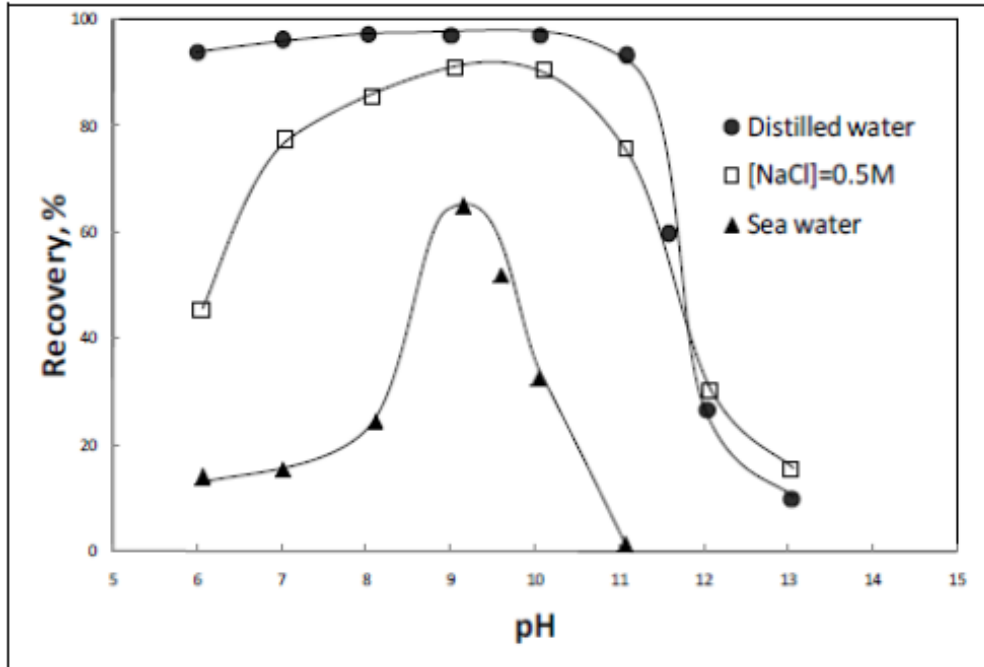


Figura 2.6: Recuperación de cobre a partir de calcosina en función del pH (Castro, 2012).

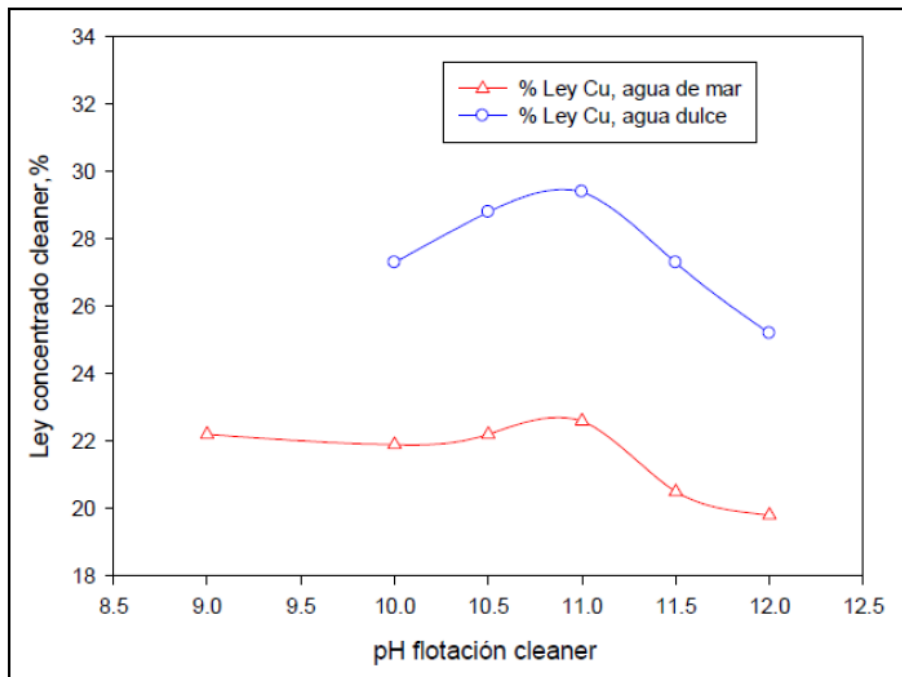


Figura 2.7: Comparación ley de concentrado con agua de mar y agua dulce en función del pH (Quinteros, 2012).

Algunas soluciones concentradas de electrolitos, como el agua de mar, mejoran de manera significativa la flotabilidad de partículas minerales que por naturaleza son

hidrofóbicos. Por este motivo, el empleo de agua de mar puede verse como un aspecto positivo para la flotación ya que favorece la adhesión partícula-burbuja (Castro y Laskowski, 2011). Además, los electrolitos pueden actuar como espumantes previniendo la coalescencia de burbujas y mejorando la espumabilidad de las soluciones, permitiendo la generación de burbujas finas incluso en ausencia de espumante al utilizar agua de mar en el proceso de flotación (Castro et al., 2010).

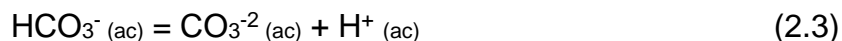
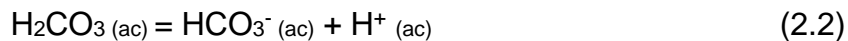
Con respecto a la espuma generada en el proceso con agua de mar, esta es más estable que con agua convencional y, además, el incremento de la fuerza iónica disminuye la altura de la fase de espuma. Lo anterior conlleva a coleccionar grandes cantidades de ganga, comprometiendo la ley del concentrado (Castro et al., 2010).

### **2.3.2 Limitantes en la flotación de sulfuros de cobre y molibdeno**

El uso de agua de mar trae consigo una serie de limitantes en el proceso de flotación debido a la alta concentración de iones que ésta posee. Dentro de las principales limitantes se encuentran el efecto buffer, la depresión de minerales por efecto de la precipitación de ciertos iones y adsorción de sales en la superficie de partículas minerales de carga opuesta, lo que afecta la adsorción del colector en el mineral de interés o puede inducir heterocoagulación entre partículas de mineral valioso y partículas finas de mineral arcilloso (Martínez, 2018).

La capacidad buffer representa cuanto ácido o base puede ser añadido a la solución sin presentar ésta una notable variación en el pH. El agua de mar tiene un pH natural que varía entre pH 7,8 y 8,2. El pH es función de la temperatura, la salinidad y la presión parcial del CO<sub>2</sub> en la atmósfera. El agua de mar es una solución buffer debido a las sales de ácidos débiles que contienen carbono, boro, fósforo, arsénico y sílice. Los ácidos carbónico y bórico presentes en el agua de mar son suficientes para afectar la alcalinidad del medio y las altas dosis de cal empleadas para modificar el pH en el agua de mar se deben principalmente al efecto del par bicarbonato/carbonato (HCO<sub>3</sub>/CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) proveniente del dióxido de carbono disuelto (CO<sub>2(ac)</sub>) en el agua de mar (Uribe, 2017).

Las reacciones químicas asociadas a este efecto se describen en las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3.



Si la relación bicarbonato/carbonato disminuye, aumentará el pH, y si esta relación aumenta, el pH disminuirá. Esto se debe a que si aumenta la concentración de  $\text{H}^+$  este ion será neutralizado por el carbonato, desplazándose el equilibrio de la ecuación 2.3 hacia la izquierda y por el contrario si se reduce la concentración de  $\text{H}^+$  se producirá la disociación del bicarbonato desplazándose el equilibrio de la ecuación 2.3 hacia la derecha formando carbonato, produciéndose leves variaciones en el pH (Castro, 2012).

El uso de agua de mar en la flotación de minerales sulfurados como, por ejemplo, molibdenita y calcopirita, tiene efectos adversos sobre la recuperación. Si se tiene un pH superior a 10 se manifiesta una fuerte depresión (disminución de la recuperación) debido a la formación de precipitados coloidales, principalmente, hidróxidos y carbonatos. De la Figura 2.8 y Figura 2.9 se observa que el  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  se forma a un pH aproximado de 9,6, mientras que  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  comienza a precipitar a pH 12,5. Además, como existen iones  $\text{CO}_3^{2-}$  en solución también es favorable la formación de las especies  $\text{MgCO}_3$  y  $\text{CaCO}_3$ . Según lo propuesto actualmente, los precipitados se adsorben sobre la superficie de las partículas de minerales y burbujas volviendo la superficie de éstas hidrofílica (Alarcón, 2018).

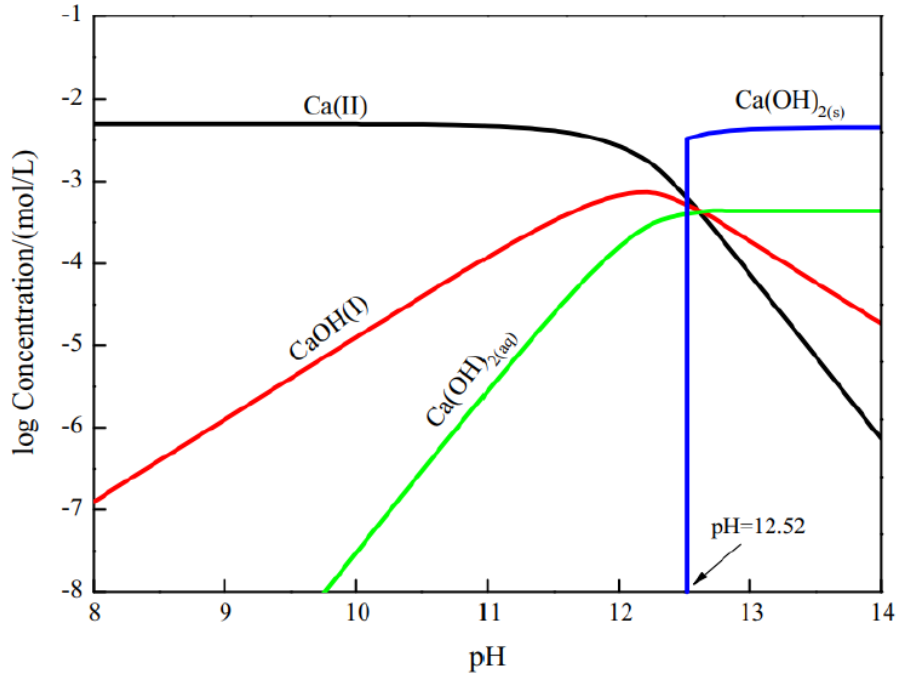


Figura 2.8: Diagrama de formación de especies de calcio (Liu et al., 2015).

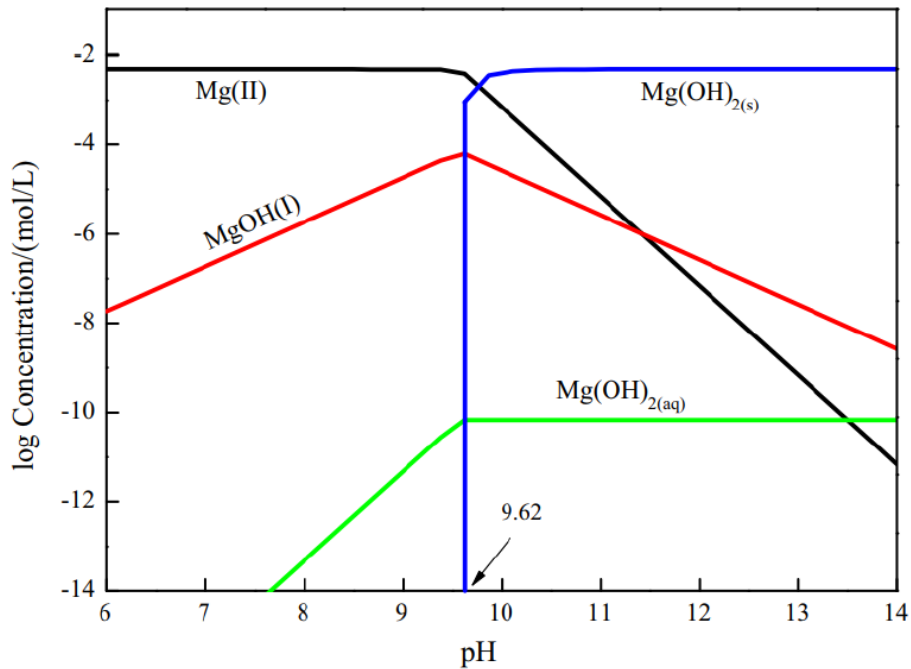


Figura 2.9: Diagrama de formación de especies de magnesio (Liu et al., 2015).

Si bien, se habla que la recuperación disminuye por la generación de precipitados, a pH menores que los correspondiente a la formación de los hidróxidos, se forman

productos de hidrólisis de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , conocidos como hidrox-complejos,  $\text{Ca}(\text{OH})^+$  y  $\text{Mg}(\text{OH})^+$ . Ha sido demostrado que estas especies iónicas se adsorben sobre la superficie de las partículas y burbujas, disminuyendo así la flotabilidad de los minerales. Las burbujas bajo condiciones alcalinas son cargadas negativamente, lo que permite la acumulación de los hidrox-complejos sobre ellas (Laskowski et al., 2013).

Además, se debe tener en cuenta, como se mencionó anteriormente, que el agua de mar presenta un menor espesor en la capa de espuma creada al flotar, produciendo una espuma de menor calidad, debido a la adsorción de precipitados en la superficie de las burbujas impactando negativamente en la recuperación y concentración de las partículas valiosas (Han et al., 2004; Laskowski et al., 2013).

Adicionalmente el calcio (Ca) y el magnesio (Mg) presentes en el agua de mar, son los principales elementos perjudiciales para la flotación de minerales de cobre, dado que consumen hidróxidos, como la cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), especialmente a pH cercano a 10,5 o superiores, donde consumen iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), afectando fuertemente la recuperación. Dado lo anterior se debiera preferir el uso de otros reactivos en lugar de cal, tal como cianuros, ferrocianuros o dextrina, las cuales deprimen la pirita a pH menores que los requeridos en agua de mar (Morales, 2017).

En la Figura 2.10 se puede apreciar las diferencias de consumo de cal en función de pH tanto para el agua dulce como para el agua de mar, notándose diferencias significativas a pH mayores a 10 debido a las limitaciones explicadas anteriormente como son el efecto buffer y la presencia de cationes y precipitados en solución.

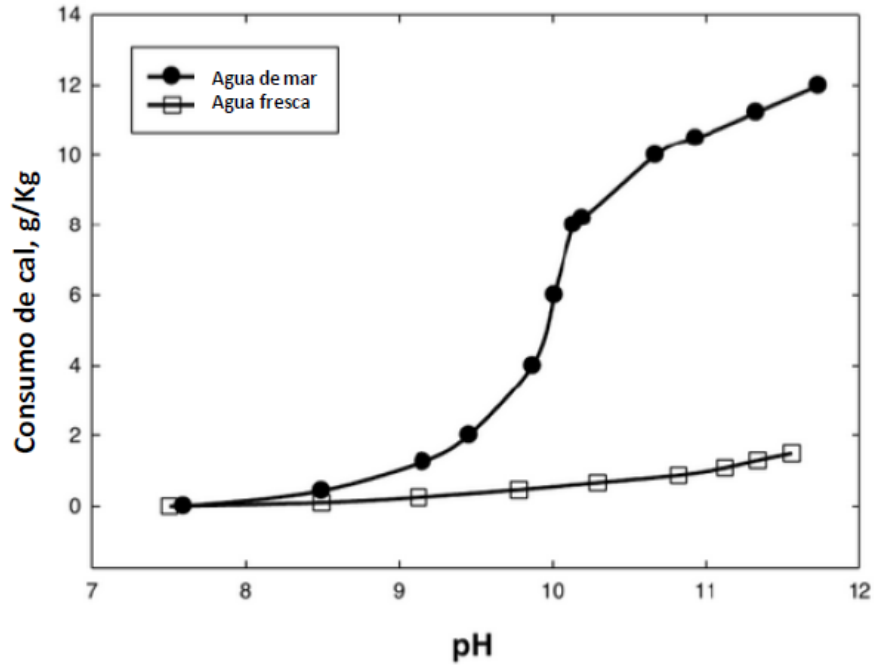


Figura 2.10: Consumo de cal en función del pH para agua dulce y agua de mar (Castro, 2012).

De acuerdo con lo anterior, para evitar el exceso de cal y preservar así los subproductos como molibdeno, oro y otros en sistemas salinos, se tiene como principal desafío lograr depresar la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) en agua de mar a pH levemente alcalinos (8,5 - 9,5) (Uribe, 2017).

### 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Equipos utilizados

A continuación, se presenta una breve descripción de los distintos equipos que fueron utilizados en este proyecto y sus principales características técnicas.

##### 3.1.1 Trituradora de mandíbula Chipmunk VD

El equipo utilizado para la reducción de tamaño del mineral fue la trituradora de mandíbula Chipmunk VD marca BICO, capaz de reducir considerablemente el tamaño del material ingresado gracias a la acción de una única mandíbula móvil. Este equipo tiene una capacidad de 400 lbs/h y puede trabajar a 400 rpm. Su función dentro de este proyecto fue realizar la primera etapa de conminución de la muestra, según los requerimientos granulométricos del proceso, entregando partículas de tamaño inferior a 2 mm.



*Figura 3.1: Trituradora de mandíbula Chipmunk VD.*

##### 3.1.2 Molino de bolas Labtech Hebro

El molino de bolas Labtech Hebro fue el equipo empleado para realizar la etapa final de reducción de tamaño, esto con el fin de lograr una granulometría de la muestra con un P80 correspondiente a 210  $\mu\text{m}$ , valor que representa un tamaño adecuado



para el proceso de flotación. El equipo está fabricado de acero inoxidable AISI 316, va encajado en un banco de rodillos motrices que generan el movimiento y posee una cubierta para protección acústica. Sus dimensiones son de 8 pulgadas de diámetro y 11 pulgadas de largo. Según sus características, la carga máxima de bolas es de hasta 10 kg, las cuales están hechas de acero forjado y tienen 1 pulgada de diámetro.



*Figura 3.2: Molino de bolas Labtech Hebro.*

### **3.1.3 Tamizadora Ro-tap RX-29**

La tamizadora Ro-tap RX-29 fue el equipo empleado para realizar los análisis granulométricos y clasificar la muestra en el tamaño requerido para el proceso de flotación. Los ensayos en esta tamizadora son fiables y reproducibles debido a que cuenta con un movimiento mecánico uniforme circular y de golpe en la parte superior de los tamices. Tiene una capacidad para muestras desde 10 g a 5 kg y para hasta 6 tamices de 8 pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de alto, los cuales pueden ir desde las mallas Tyler de 4" hasta la malla N°635. Las características operacionales de este equipo son de  $278 \pm 10$  oscilaciones por minuto y  $150 \pm 10$  golpes por minuto.



Figura 3.3: Tamizadora Ro-tap RX-29.

### 3.1.4 Celda de flotación Edemet

Las pruebas de flotación se realizaron en la celda de flotación Edemet, la cual tiene una capacidad de 1.5 litros, un motor trifásico de 0.37 kW, un impulsor mecánico y un sistema de paleteo automático. Además, esta celda permite minimizar los errores inducidos por la acción humana ya que posee un panel programable para ajustar las condiciones operacionales como la velocidad de aireación, velocidad de agitación, tiempo de flotación, entre otras, las cuales son controladas de forma electrónica durante el proceso. De igual manera, es posible utilizar accesorios tanto internos como externos a la celda tales como control de pH, dosificación de reactivos, bombas de traspaso, control de nivel, etc. En la Tabla 3.1 se presentan las condiciones de operación de la celda para las diferentes pruebas de flotación.

Tabla 3.1: Condiciones de operación de la celda de flotación Edemet.

<b>Tiempo de acondicionamiento</b>	5 minutos
<b>Tiempo de flotación</b>	12 minutos
<b>Velocidad de agitación acond.</b>	1100 rpm
<b>Velocidad de agitación flotación</b>	1000 rpm
<b>Flujo de aire</b>	5 L/min
<b>Tiempo entre paletes</b>	10 s



*Figura 3.4: Celda de flotación Edemet.*

### **3.1.5 Filtro de presión Edemet**

El filtro de presión fue el encargado de eliminar el agua de los productos obtenidos tales como concentrados y colas del proceso de flotación. El equipo consta de un cilindro de dimensiones 30 x 40 cm de diámetro y alto, respectivamente, fabricado completamente de acero inoxidable AISI 316. Posee una válvula de conexión rápida, una llave de descompresión rápida y un manómetro con medidas de presión de aire que se inyecta desde un compresor entre 0 y 260 psi.



*Figura 3.5: Filtro de presión Edemet.*

### 3.1.6 Horno de secado Bellhor

El horno de secado Bellhor fue utilizado como una segunda y final etapa de secado de los concentrados y colas provenientes de la flotación, sus dimensiones internas son de 500 x 600 x 750 mm, tiene una capacidad de 225 litros y trabaja en un rango de temperaturas que puede ir hasta los 250 - 300 °C.



*Figura 3.6: Horno de secado Bellhor.*

### 3.1.7 Analizador portátil de fluorescencia de rayos X

El equipo de fluorescencia de rayos X es capaz de hacer un análisis elemental preciso de las muestras con alta sensibilidad y exactitud en la medición ya que posee un tubo con un ánodo de plata que va desde los 6 a 50kV y 0-200  $\mu$ A, permitiendo identificar gran parte de los elementos químicos que se encuentran en la tabla periódica. El uso de este equipo permitió realizar una caracterización de los elementos químicos presentes tanto en la muestra de alimentación, como en los concentrados y colas resultantes de la flotación. Específicamente se analizó el contenido de cobre, hierro, sílice y azufre de los diferentes productos obtenidos bajo diversas condiciones.



*Figura 3.7: Analizador portátil de fluorescencia de rayos X.*

### **3.1.8 Balanza Boeco**

La balanza Boeco corresponde a una balanza Semi-Micro analítica modelo BXX-22 y tiene un rango de carga entre 0.001 y 220 gramos con un sistema de calibración interna y una pantalla táctil a color de 5 pulgadas. Este equipo cumplió la función de pesar la cantidad requerida de los distintos reactivos empleados en flotación.



*Figura 3.8: Balanza Boeco.*

## 3.2 Muestra mineral

La muestra de mineral utilizada en esta investigación fue suministrada por la minera Paicaví S.A. desde la mina Chépica, ubicada en la localidad de Penciahue, comuna de Talca, VII región del Maule, Chile. En dicha faena se extrae principalmente mineral de cobre y oro, el cual es sometido a procesos de reducción de tamaño y concentración por flotación generando un concentrado rico en dichos elementos.

Para efectos de este trabajo fueron utilizados 60 kg de mineral cuya distribución granulométrica inicial se puede ver en la Figura 3.9. El tamaño promedio de la granulometría más gruesa era de 15 x 12 x 7 cm, mientras que de la más pequeña era de 5 x 4 x 4 cm.



*Figura 3.9: Distribución inicial de tamaños de la muestra utilizada.*

Esta muestra de mineral fue procesada mediante dos etapas de disminución de tamaño, inicialmente trituración y luego molienda húmeda. Al mismo tiempo, se tomó una muestra representativa para hacer un análisis granulométrico y también realizar la caracterización química y mineralógica a través de fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX), respectivamente. Cabe mencionar que todos los procesos indicados anteriormente serán detallados en las próximas secciones.

### **3.3 Reactivos químicos**

En esta sección se mencionan los distintos agentes químicos, como reactivos y medios acuosos que se utilizaron para llevar a cabo esta investigación y cumplir con los objetivos planteados.

#### **3.3.1 Colectores**

Los reactivos colectores que se utilizaron en esta investigación fueron el xantato amílico de potasio (PAX) donado por SOLVAY Chile y el aceite vegetal de girasol reciclado (AVR).

#### **3.3.2 Espumantes**

El espumante utilizado para las diferentes pruebas de flotación propuestas fue el metil isobutil carbonil (MIBC Aerofroth 70) donado por SOLVAY, Chile.

#### **3.3.3 Modificadores**

El único modificador considerado en este proyecto fue la cal (CaO) como regulador de pH para mantener esta variable controlada tanto al momento de usar agua convencional como agua de mar.

#### **3.3.4 Medio acuoso**

Es importante destacar que en esta investigación se utilizó tanto agua convencional como agua de mar. En este sentido, exclusivamente las pruebas cinéticas de flotación en las cuales se evaluó el efecto del flujo de aire fueron realizadas en agua convencional, mientras que todo el resto de las experiencias de laboratorio se hicieron empleando agua de mar.

Para las pruebas de flotación en las que se consideró la utilización de agua de mar, es importante recalcar que su abastecimiento fue desde la costa de la región del Maule, específicamente desde la localidad de Iloca, destacando que la extracción del agua fue en un punto alejado de la orilla para que su composición química no se viera afectada ni estuviera contaminada físicamente.

### **3.4 Procedimiento experimental**

En esta sección, se describe de manera general cada una de las etapas y actividades desarrolladas para llevar a cabo la investigación.

#### **3.4.1 Reducción de tamaño de la muestra mineral**

Considerando que se contaba con una muestra mineral de gran masa y de granulometría gruesa, la primera acción realizada fue reducir el tamaño de forma manual de las rocas más grandes que no eran capaces de ser ingresadas a la trituradora, de tal manera que toda la muestra fuera homogénea y tuviera un diámetro promedio de 5 cm aproximadamente.

Una vez que se logró tener toda la muestra con la granulometría anteriormente mencionada, se realizó el proceso de conminución en la trituradora de mandíbulas. El producto obtenido en esta etapa fue tamizado de forma manual, utilizando como malla de corte la #10 ASTM. El sobre tamaño obtenido, se enviaba nuevamente a la trituradora, mientras que el bajo tamaño se almacenaba para posteriormente llevarlo a la siguiente etapa de reducción de tamaño.

La segunda etapa de reducción de tamaños consistió en un proceso de molienda en húmedo, para ello se preparó una pulpa de mineral al 67% de sólidos, con el material pasante malla #10, resultante del proceso anterior. Cabe mencionar que durante esta etapa se realizó una primera adición de reactivos, específicamente de cal (0,7 g) para regular el pH al valor deseado, que para efectos de este estudio fue pH 8. Además, para determinar el tiempo óptimo de molienda se realizaron previamente pruebas de cinética que permitieron fijar un tiempo de molienda de 50 minutos.

Una vez realizado el proceso de molienda, se logró una granulometría cuyo P80 era de 210  $\mu\text{m}$ , es decir, se encontraba bajo la malla ASTM #70, por lo tanto, se procedió a caracterizar la muestra mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX) para determinar su composición química (particularmente de Cu, Fe, Si y S) y mineralógica.



### **3.4.2 Análisis granulométrico**

Una vez realizado el proceso de molienda de la muestra mineral se procedió a ejecutar el análisis granulométrico. Para tal efecto, se secó una muestra de aproximadamente 300 gramos que posteriormente se sometió al proceso de tamizaje en el Ro-Tap por un tiempo de 15 minutos, empleando los tamices ASTM #50, #70, #100, #200, #270, #325 y #400. Finalmente, se pesaron las cantidades retenidas en cada malla para realizar los cálculos correspondientes.

### **3.4.3 Pruebas de flotación**

El proceso de flotación se llevó a cabo en la celda Edemet de 1.5 litros agregando una pulpa que contenía 600 g de mineral y 1200 g de agua, formando un 33% de sólidos, manteniendo un pH 8, agregando agua de lavado luego de cada paleteo y dosificando los reactivos colectores y espumante según la prueba que correspondiera realizar para la investigación. La adición de los reactivos se realizaba en el instante previo al acondicionamiento, el cual tenía una duración de 5 minutos y se realizaba a una velocidad de agitación de 1100 rpm. En esta etapa, además, se ajustaba el valor del pH al valor deseado mediante la adición de cal. Logrado lo anterior, se procedía a la etapa de flotación, la cual tenía una duración de 12 minutos y se realizaba a una velocidad de agitación de 1000 rpm, inyectando un flujo de aire de 5 L/min manteniendo un paleteo manual cada 10 segundos.

Finalmente, una vez culminada cada prueba de flotación se secaba tanto el concentrado como la cola del proceso. En primer lugar, se utilizaba el filtro de presión Edemet para eliminar el agua sobrante y luego las muestras obtenidas se secaban al interior del horno de secado durante un tiempo de aproximadamente 24 horas a una temperatura de 100°C. Logrado lo anterior, se realizaban los análisis correspondientes mediante FRX para determinar el contenido de Cu, Fe, S y Si en cada muestra, para posteriormente calcular los índices metalúrgicos de cada prueba.

### 3.4.4 Pruebas cinéticas de flotación colectiva

#### 3.4.4.1 Efecto del flujo de aire en la cinética de flotación

En esta parte se planteó estudiar la variable del flujo de aire inyectado a la celda para establecer el valor más adecuado que favoreciera el proceso de flotación. Para esto se realizaron ensayos de cinéticas de flotación en agua convencional, organizados en tres sets de pruebas. En el primero de ellos se utilizó como colector el PAX (Tabla 3.2), mientras que en los otros dos se empleó AVR (Tabla 3.3 y Tabla 3.4). El tiempo de acondicionamiento para todas estas pruebas fue de 5 minutos, mientras que el tiempo de flotación fue de 20 minutos, divididos en seis intervalos progresivos hasta los minutos 1, 2, 4, 8, 16 y 20. Es importante señalar que para los primeros dos sets de pruebas se evaluaron valores de flujos de aire correspondientes a 20, 10, 5 y 2 L/min, mientras que en el tercer set se analizaron solo los flujos de 10, 5 y 2 L/min.

Tabla 3.2: Set de pruebas cinéticas de flotación con PAX para análisis de flujo de aire.

Nombre de la prueba	CPAX-1	CPAX-2	CPAX-3	CPAX-4
Flujo de aire (L/min)	20	10	5	2
Velocidad de acondicionamiento (rpm)	1100	1100	1100	1100
Velocidad de flotación (rpm)	1000	1000	1000	1000
Dosis de colector (g/t)	60	60	60	60
Dosis de espumante (g/t)	15	15	15	15
pH	8	8	8	8

Tabla 3.3: Primer set de pruebas cinéticas de flotación con AVR para análisis de flujo de aire.

Nombre de la prueba	CAVR-1	CAVR-2	CAVR-3	CAVR-4
Flujo de aire (L/min)	20	10	5	2
Velocidad de acondicionamiento (rpm)	1100	1100	1100	1100
Velocidad de flotación (rpm)	1000	1000	1000	1000
Dosis de colector (g/t)	100	100	100	100
Dosis de espumante (g/t)	15	15	15	15
pH	8	8	8	8

Tabla 3.4: Segundo set de pruebas cinéticas de flotación con AVR para análisis de flujo de aire.

Nombre de la prueba	CAVR-6	CAVR-7	CAVR-8
Flujo de aire (L/min)	10	5	2
Velocidad de acondicionamiento (rpm)	1100	1100	1100
Velocidad de flotación (rpm)	1000	1000	1000
Dosis de colector (g/t)	20	20	20
Dosis de espumante (g/t)	15	15	15
pH	8	8	8

#### 3.4.4.2 Pruebas cinéticas de flotación en agua de mar

Las cinéticas de flotación para la etapa colectiva de flotación se realizaron únicamente para los dos mejores valores de flujo de aire que permitieron obtener la mayor ley y recuperación de cobre en presencia de PAX y AVR. El objetivo de las pruebas cinéticas realizadas fue determinar el tiempo adecuado de flotación del mineral en función del medio acuoso, es decir, el agua de mar.

En esta etapa se evaluó la recuperación de cobre en diferentes intervalos de tiempo para determinar hasta qué punto era conveniente llevar a cabo el proceso de flotación. Cabe mencionar que, al igual que en las pruebas para el análisis de flujo de aire, estos intervalos de tiempo fueron progresivos y potenciales, de forma que se recolectaron seis diferentes concentrados para ser analizados en función del tiempo. El primero de ellos fue desde el comienzo de la prueba hasta el minuto 1, mientras que el siguiente comenzaba en este último instante hasta el minuto 2 y así sucesivamente hasta los minutos 4, 8, 16 y 20 de un ensayo de cinética de flotación específico.

Para las pruebas de cinética de flotación en agua de mar se realizaron dos sets de pruebas, una para el PAX y otra para el AVR, cada uno con dos diferentes valores de flujo de aire, como se muestra en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6, respectivamente.

Tabla 3.5: Set de pruebas cinéticas de flotación en agua de mar con PAX.

Nombre de la prueba	CPAX-1(AM)	CPAX-2(AM)
Flujo de aire (L/min)	10	5
Velocidad de acondicionamiento (rpm)	1100	1100
Velocidad de flotación (rpm)	1000	1000
Dosis de colector (g/t)	60	60
Dosis de espumante (g/t)	15	15
pH	8	8

Tabla 3.6: Set de pruebas cinéticas de flotación en agua de mar con AVR.

Nombre de la prueba	CAVR-1(AM)	CAVR-2(AM)
Flujo de aire (L/min)	10	5
Velocidad de acondicionamiento (rpm)	1100	1100
Velocidad de flotación (rpm)	1000	1000
Dosis de colector (g/t)	100	100
Dosis de espumante (g/t)	15	15
pH	8	8

### 3.4.5 Pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de los colectores PAX y AVR en agua de mar

Una vez que se definieron las condiciones más favorables para el proceso de flotación, en este caso el flujo de aire y el tiempo total de este, fue posible comenzar a realizar el análisis del efecto de la concentración del colector y del tipo de colector utilizado en la flotación de sulfuros de cobre en agua de mar.

#### 3.4.5.1 Pruebas de flotación en función de la concentración de colector PAX

La realización de estos ensayos se hizo con el fin de estudiar el efecto de la concentración de colector PAX en la ley y recuperación de cobre obtenido a partir del proceso de flotación colectiva. Para esto, se siguió el proceso descrito en la sección 3.4.3 y se realizaron 6 pruebas diferentes considerando un rango de concentraciones de reactivo colector PAX entre 0 g/t y 100 g/t. Las condiciones se

detallan en la Tabla 3.7. Es importante señalar que cada una de estas pruebas fue realizada en duplicado para asegurar la fiabilidad necesaria en este proyecto.

*Tabla 3.7: Set de pruebas de flotación en función de la dosis de colector PAX.*

<b>Nombre de la prueba</b>	<b>FPAX-1</b>	<b>FPAX-2</b>	<b>FPAX-3</b>	<b>FPAX-4</b>	<b>FPAX-5</b>	<b>FPAX-6</b>
Flujo de aire (L/min)	5	5	5	5	5	5
Velocidad de acondicionamiento (rpm)	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Velocidad de flotación (rpm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Dosis de colector PAX (g/t)	0	20	40	60	80	100
Dosis de espumante MIBC (g/t)	15	15	15	15	15	15
pH	8	8	8	8	8	8

#### *3.4.5.2 Pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR*

Para comparar de manera efectiva y representativa los resultados obtenidos con cada colector, se realizó un set de pruebas idéntico al anterior con colector PAX, pero en este caso se utilizó AVR. En la Tabla 3.8 se describen las condiciones de operación de la celda y dosificaciones de colector empleados para estos ensayos, los cuales de igual manera se hicieron en duplicado.

*Tabla 3.8: Set de pruebas de flotación en función de la dosis de colector AVR.*

<b>Nombre de la prueba</b>	<b>FAVR-1</b>	<b>FAVR-2</b>	<b>FAVR-3</b>	<b>FAVR-4</b>	<b>FAVR-5</b>	<b>FAVR-6</b>
Flujo de aire (L/min)	5	5	5	5	5	5
Velocidad de acondicionamiento (rpm)	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Velocidad de flotación (rpm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Dosis de colector AVR (g/t)	0	20	40	60	80	100
Dosis de espumante MIBC (g/t)	15	15	15	15	15	15
pH	8	8	8	8	8	8

#### *3.4.5.3 Pruebas de flotación en función de la concentración de mezclas AVR – PAX como colector*

Una vez realizados los dos sets de pruebas anteriores para los colectores en estudio, se procedió a realizar un análisis en el cual se utilizaron como colector

mezclas de ambos en diferentes proporciones. De igual manera que los casos anteriores, se siguió el mismo procedimiento descrito en la sección 3.4.3, mencionando que ambos reactivos colectores se agregaron de manera conjunta al comienzo de la etapa de acondicionamiento de la pulpa previo al proceso de flotación. A continuación, en la Tabla 3.9, se describen las condiciones y dosificaciones de colectores utilizados en cada prueba que se realizó por duplicado.

*Tabla 3.9: Set de pruebas de flotación en función de diferentes dosis de mezclas de reactivos colectores.*

<b>Nombre de la prueba</b>	<b>FM-1</b>	<b>FM-2</b>	<b>FM-3</b>	<b>FM-4</b>	<b>FM-5</b>	<b>FM-6</b>
Flujo de aire (L/min)	5	5	5	5	5	5
Velocidad de acondicionamiento (rpm)	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Velocidad de flotación (rpm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Dosis de colector AVR (g/t)	100	80	60	40	20	0
Dosis de colector PAX (g/t)	0	20	40	60	80	100
Dosis de espumante MIBC (g/t)	15	15	15	15	15	15
pH	8	8	8	8	8	8

### **3.4.6 Pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de espumante MIBC en agua de mar**

Estos ensayos de flotación en función de diferentes concentraciones de espumante fueron realizados con el objetivo de encontrar una concentración a la cual se obtuviera una espuma más estable y con condiciones específicas que, para este estudio, ayudara a obtener mejores resultados metalúrgicos.

Para esto se realizaron cuatro sets de pruebas, considerando las concentraciones de PAX, AVR y mezclas AVR/PAX que lograron los mejores resultados metalúrgicos en pruebas anteriores, las cuales se indican en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Definición de cada uno de los casos a estudiar en las pruebas en función de la concentración de espumante MIBC.

Caso	Colector utilizado	Dosis (g/t)
1	PAX	40
2	AVR	40
3	AVR	80
4	AVR/PAX	60/40

Con respecto al set de pruebas aplicado en función de la concentración de espumante para los diferentes casos que se muestran en la Tabla 3.10, es importante destacar que para todos estos ellos se mantuvieron las mismas condiciones indicadas en la Tabla 3.11 en donde se muestra que el rango de concentración analizado de MIBC fue entre 0 y 20 g/t y lo único que cambió fue la concentración de colector indicada según el caso que correspondiera. Es importante señalar que, de la misma manera que todos los sets de pruebas anteriores, estas pruebas también se hicieron con el duplicado correspondiente para asegurar la fiabilidad requerida por este proyecto.

Tabla 3.11: Set de pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC para el caso PAX 40 g/t.

Nombre de la prueba	PAX40-0	PAX40-5	PAX40-10	PAX40-15	PAX40-20
Flujo de aire (L/min)	5	5	5	5	5
Velocidad de acondicionamiento (rpm)	1100	1100	1100	1100	1100
Velocidad de flotación (rpm)	1000	1000	1000	1000	1000
Dosis de colector AVR (g/t)	-	-	-	-	-
Dosis de colector PAX (g/t)	40	40	40	40	40
Dosis de espumante MIBC (g/t)	0	5	10	15	20
pH	8	8	8	8	8

## 3.5 Cálculos y métodos de análisis empleados

### 3.5.1 Índices metalúrgicos

En este apartado, se enumeran cada uno de los índices metalúrgicos calculados para realizar el análisis de los resultados de este proyecto. Es importante mencionar que estos son números adimensionales que entregan información sobre la calidad y la capacidad de la separación realizada a través del proceso de concentración.

Dentro de los índices metalúrgicos estudiados más importantes, se encuentran principalmente la ley y la recuperación de los elementos químicos de interés en el concentrado, ya que estos datos entregan un indicio de la eficiencia de la flotación y sus valores se relacionan directamente con los objetivos planteados en esta investigación. Para esto, la ley de cobre, hierro y otros elementos químicos de interés, como la sílice, fue obtenida a través del método de FRX.

#### 3.5.1.1 Recuperación

La recuperación se expresa en porcentaje y corresponde a la cantidad de una especie obtenida en el concentrado respecto a la cantidad de la misma especie alimentada al proceso.

$$R(\%) = \frac{C_c}{A_a} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde:

C y A, corresponden a las masas de concentrado y alimentación, respectivamente.

c y a, corresponden a las leyes de la especie de interés en el concentrado y en la alimentación, respectivamente.

#### 3.5.1.2 Razón de enriquecimiento

La razón de enriquecimiento corresponde a la relación entre la ley de la especie valiosa en el concentrado y la ley de la misma especie en la alimentación del proceso.



$$Re = \frac{c}{a} \quad (3.2)$$

Donde:

c y a, corresponden a las leyes de la especie de interés en el concentrado y en la alimentación, respectivamente.

### 3.5.1.3 Índice de selectividad

El índice de selectividad representa la efectividad del proceso para lograr la obtención de una corriente de concentrado donde la mayor parte corresponde a la especie de interés y un relave donde la mayoría es ganga. Si el valor de este número se encuentra entre 4 y 40, se consideran que el proceso de concentración logró buenos resultados metalúrgicos.

$$IS = \sqrt{\frac{M * n}{m * N}} \quad (3.3)$$

Donde:

M y m, corresponden a la ley de la especie de interés en el concentrado y en el relave, respectivamente.

N y n, corresponden a la ley de la ganga en el concentrado y en el relave, respectivamente.

### 3.5.1.4 Razón de concentración

La razón de concentración corresponde a la relación entre el peso total de la alimentación del proceso y el peso total de la corriente de concentrado.

$$Rc = \frac{A}{C} \quad (3.4)$$

Donde:

C y A, corresponden a las masas de concentrado y alimentación, respectivamente.

### 3.5.1.5 Rendimiento de concentración

El rendimiento de concentración es la relación entre el flujo másico en el concentrado respecto al flujo másico de sólidos en la alimentación. Puede expresarse en función de la razón de concentración.

$$V = \frac{C}{A} = \frac{1}{Rc} \quad (3.5)$$

Donde:

C y A, corresponden a las masas de concentrado y alimentación, respectivamente.

### 3.5.2 Ajuste de Klimpel

Para analizar las pruebas cinéticas de flotación realizadas se utilizó el modelo propuesto por Klimpel para ajustar los valores obtenidos de manera experimental, cuya fórmula matemática se presenta en la ecuación 3.6. Este modelo se puede utilizar para determinar los parámetros cinéticos de cada especie presente en el mineral, sin embargo, para efectos de este proyecto, solo se efectuó el estudio para la cinética de flotación de cobre.

$$R = R^\infty \left[ 1 - \left( \frac{1}{kt} \right) (1 - \exp(-kt)) \right] \quad (3.6)$$

Donde:

R, corresponde a la recuperación

$R^\infty$ , es la recuperación a tiempo infinito

t, es el tiempo

k, es la constante cinética de flotación

### 3.5.3 Velocidad superficial del gas

Corresponde a una normalización del flujo de aire inyectado a la celda de flotación y la sección transversal de esta, con el fin de comparar dichos flujos entre celdas de distinto tamaño. Si el valor de este número se encuentra entre 0,5 y 2,5 cm/s se minimizan fenómenos como el arrastre mecánico de partículas o turbulencias que afecten la flotación.

$$J_g = \frac{Q_g}{A_{celda}} \quad (3.7)$$

Donde:

$J_g$ , corresponde a la velocidad superficial del gas

$Q_g$ , corresponde al flujo de aire inyectado a la celda

$A_{celda}$ , corresponde a la sección transversal de la celda

### 3.5.4 Suposiciones aplicadas

#### 3.5.4.1 Estimación de calcopirita y pirita en la corriente de concentrado

Con el objetivo de analizar la cantidad de calcopirita y pirita presente en los concentrados, se realizaron las siguientes relaciones matemáticas basadas en la composición estequiométrica de la calcopirita y pirita, luego de haber obtenido el porcentaje de cobre y hierro en el concentrado mediante FRX.

Esta aplicación se basa en el supuesto de que todo el cobre presente se asocia al mineral de calcopirita utilizando una cantidad de hierro determinada. Mientras que, por otro lado, el contenido restante de hierro se relaciona a la pirita. El objetivo de realizar esta suposición es poder llevar a cabo un análisis de la presencia que tienen estos dos minerales en el concentrado.

La ecuación 3.8 se utiliza para estimar el porcentaje de calcopirita en el concentrado.

$$\%Calcopirita = \%Cu \times \left(\frac{183.3}{63.5}\right) \quad (3.8)$$

La ecuación 3.9 hace referencia al porcentaje de hierro presente como pirita según la estimación anterior.

$$\%Fe^{\circ} = \%Fe - \%Cu \times \left(\frac{55.8}{63.5}\right) \quad (3.9)$$

Y, por último, la ecuación 3.10 representa el porcentaje de pirita presente en el concentrado tomando en cuenta las aproximaciones preliminares.

$$\%Pirita = \%Fe^{\circ} \times \left(\frac{119.8}{55.8}\right) \quad (3.10)$$

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterización de la muestra mineral

La Figura 4.1, presenta la curva granulométrica de la muestra mineral luego haber sido procesada hasta etapas de molienda. En la figura se puede apreciar que aproximadamente el 80% del mineral posee un tamaño menor a 212  $\mu\text{m}$ , específicamente el P80 tiene un valor que corresponde a 210  $\mu\text{m}$ .

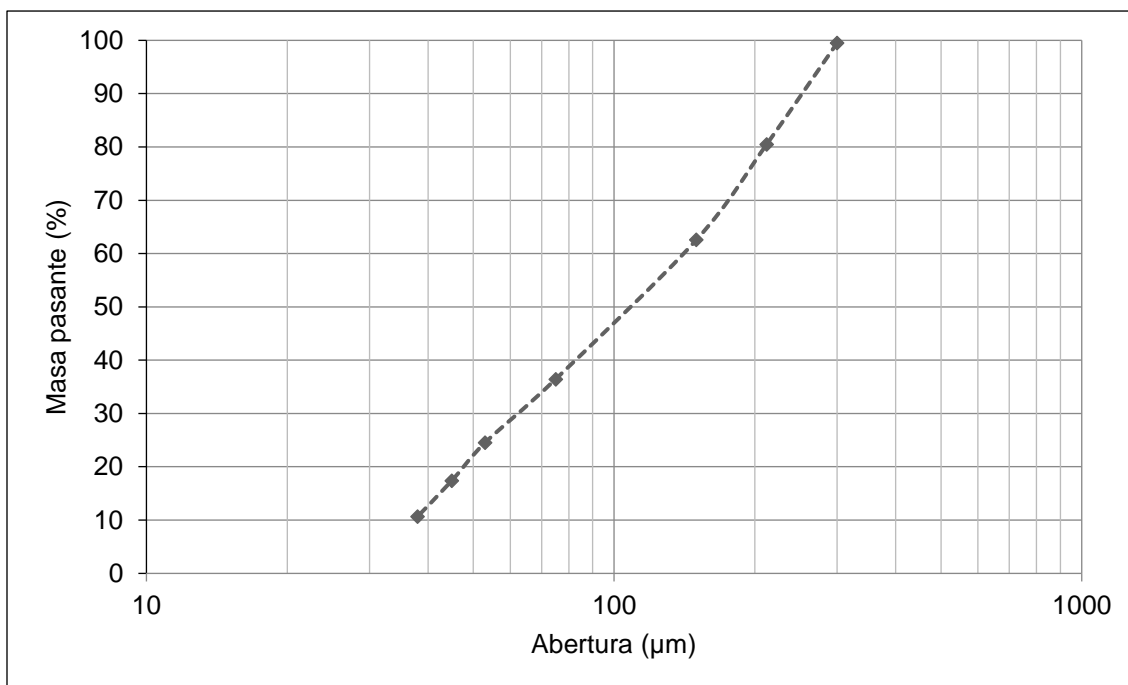


Figura 4.1: Curva granulométrica del mineral producto de la molienda.

En la Tabla 4.1 y Tabla 4.2, se presentan los resultados del análisis de FRX y DRX realizado a la muestra mineral. En la primera se puede observar de acuerdo con el análisis FRX, que el contenido de cobre era de 2,20%, hierro 12,97% y azufre de 23,60%, mientras que, respecto a su mineralogía, en la segunda se observa que el contenido de estos elementos se asocia principalmente a calcopirita y pirita y que como minerales de ganga se encuentran principalmente el cuarzo y los filosilicatos como la muscovita y la clorita.

Tabla 4.1: Resultados del análisis FRX de la muestra mineral.

Elemento	Símbolo	%
Silicio	Si	41,00
Azufre	S	23,60
Potasio	K	1,140
Titanio	Ti	0,031
Vanadio	V	0,011
Cromo	Cr	0,017
Magnesio	Mg	0,033
Hierro	Fe	12,97
Cobre	Cu	2,196
Cinc	Zn	0,307
Arsénico	As	0,008
Plata	Ag	0,003
Platino	Pt	0,003
Plomo	Pb	0,112
Molibdeno	Mo	0.002

Tabla 4.2: Resultados del análisis DRX de la muestra mineral.

Fase mineral	Formula molecular	%
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	73,9
Muscovita	KAl <sub>2</sub> (AlSi) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	5,5
Clorita	(Mg,Fe++)5Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	1,9
Pirita	FeS <sub>2</sub>	13,0
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	5,7

## 4.2 Pruebas cinéticas de flotación colectiva

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante la realización de pruebas cinéticas de flotación colectiva organizadas en dos grupos. El primero de ellos con el objetivo de determinar el flujo de aire adecuado en la celda que favorezca los resultados metalúrgicos, y el segundo con la finalidad de establecer el tiempo óptimo de flotación en función de cada reactivo colector evaluado.

#### 4.2.1 Efecto del flujo de aire en la cinética de flotación

En este apartado se presentan los resultados de cada uno de los sets de pruebas indicados en la Tabla 3.2, Tabla 3.3 y Tabla 3.4. Es importante indicar que se utilizó el modelo de Klimpel para ajustar los resultados de estos ensayos debido a que en esencia corresponden a cinéticas de flotación y se exponen agrupados para realizar una comparación cuantitativa de los valores obtenidos.

En la Figura 4.2 se pueden apreciar las curvas cinéticas de flotación obtenidas a diferentes flujos de aire en presencia de 60 g/t de colector PAX, empleando agua convencional. En la figura se observa que tanto a 5 L/min como a 10 L/min, se obtienen las mayores recuperaciones de cobre y el comportamiento del proceso de concentración a través del tiempo es muy similar, logrando una recuperación de 94,3% y 94,1%, respectivamente al minuto 16 de flotación. Por otra parte, en relación con los resultados obtenidos a 2 L/min y a 20 L/min, se puede observar que a estas condiciones se obtuvieron recuperaciones más bajas, correspondientes a 58,4% y 31%, respectivamente a un tiempo de flotación de 16 min y las cinéticas de flotación fueron más lentas.

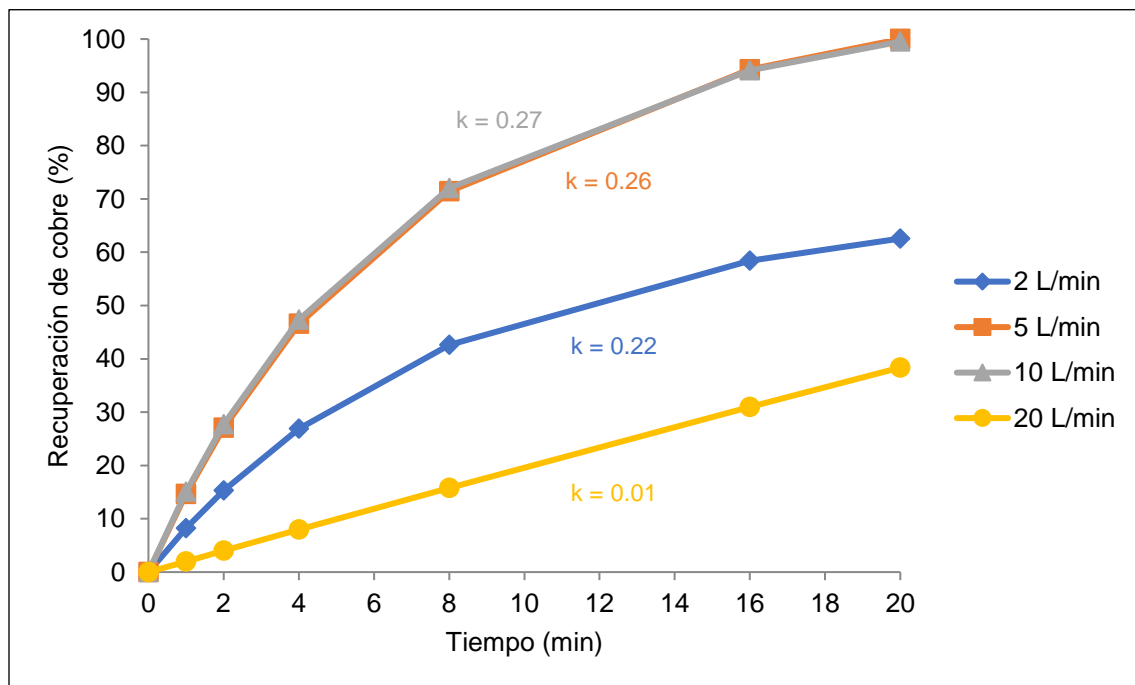


Figura 4.2: Cinéticas de flotación obtenidas en agua convencional a diferentes flujos de aire en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC.

Con respecto a las leyes de cobre alcanzadas a las diferentes condiciones de flujo estudiadas, la Tabla 4.3 muestra los resultados calculados de la ley acumulada de cobre al minuto 16 de flotación, en ella se observa que los flujos de 5 L/min y 10 L/min no solo presentan un mejor porcentaje de recuperación que las demás condiciones estudiadas, sino que también generan un concentrado con mayor contenido de cobre, obteniéndose la mayor ley de cobre a 5 L/min.

*Tabla 4.3: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 16 de flotación con agua convencional en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC.*

<b>Flujo de aire (L/min)</b>	<b>Velocidad superficial del gas (cm/s)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>
2	0.28	3.0
5	0.69	5.5
10	1.38	4.9
20	2.75	3.2

Por otro lado, en la Figura 4.3 se presentan los resultados obtenidos del set de ensayos realizados con agua convencional con colector AVR a una dosis de 100 g/t, según lo indicado en la Tabla 3.3. En la figura puede observarse que, para este caso, las pruebas a 2 L/min y 20 L/min logran las mayores recuperaciones de cobre, las cuales corresponden a 89,8% y 71,9%, respectivamente, al minuto 16 de flotación, siendo a 2 L/min, la condición que logra una cinética de flotación más rápida, mientras que, ensayos a un flujo de 5 L/min y 10 L/min se obtienen curvas cinéticas cercanas entre sí y recuperación de cobre menores, las cuales correspondieron al 52,7% y 49%, respectivamente.



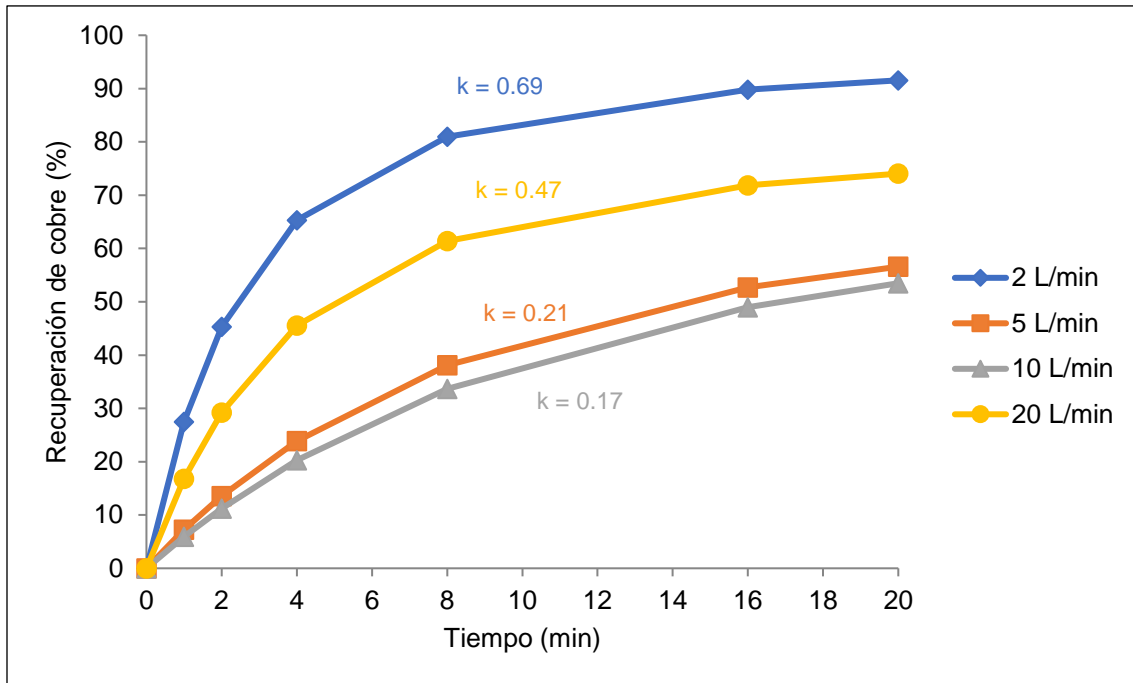


Figura 4.3: Cinéticas de flotación obtenidas en agua convencional a diferentes flujos de aire en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.

La Tabla 4.4 muestra la ley acumulada de cobre hasta el minuto 16 de flotación para cada uno de los flujos de aire estudiados en presencia de 100 g/t de AVR. En ella se puede observar que a condiciones de flujos de aire donde se alcanzaron las mayores recuperaciones (2 L/min y 20 L/min), se obtuvieron concentrados con bajo contenido de cobre en comparación con los obtenidos a 5 L/min y 10 L/min. Lo anterior se debe a que bajo estas condiciones se consigue generar una velocidad superficial del gas dentro del rango típico indicado en la literatura para celdas convencionales (0.5 cm/s - 2.5 cm/s), la cual favorece los resultados metalúrgicos del proceso y permite asegurar que se minimizan fenómenos como el arrastre mecánico de partículas o turbulencias que afecten la flotación.

*Tabla 4.4: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 16 de flotación con agua convencional en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.*

<b>Flujo de aire (L/min)</b>	<b>Velocidad superficial del gas (cm/s)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>
2	0.28	2.7
5	0.69	10.9
10	1.38	7.1
20	2.75	3.4

Es de notar que, al comparar el contenido de cobre obtenidos a flujos intermedios de 5 L/min y 10 L/min en presencia de PAX y AVR, al emplear AVR, la ley acumulada de cobre aumentó de manera considerable, sobre todo para el primero de estos casos alcanzando una ley de cobre de 10,9%, en el cual se vio comprometida su recuperación.

Finalmente, la Figura 4.4 presenta los resultados obtenidos del set de ensayos realizados con agua convencional con colector AVR a una dosis de 20 g/t, según lo indicado en la Tabla 3.4. Estas pruebas se realizaron con la necesidad de evaluar si la concentración de AVR afectó la recuperación de cobre obtenidas a flujos de aire de 5 y 10 L/min en pruebas anteriores. En la figura se presentan las cinéticas de flotación obtenidas a 2 L/min, 5 L/min y 10 L/min y en ella se observa que, la recuperación de cobre va en aumento para las tres condiciones de flujo estudiadas hasta el minuto 8 de flotación, presentándose una mayor cinética a la condición de 10 L/min. Sin embargo, conforme avanza el tiempo la recuperación de cobre a 2 L/min y 10 L/min entra en una fase de sostenimiento, mientras que a un flujo de 5 L/min, la cual posee una cinética más lenta, la recuperación de cobre va en aumento conforme avanza el tiempo y sólo se logra su estabilización al minuto 16 de flotación. Comparando la recuperación de cobre obtenida a este tiempo de flotación para los tres flujos de aire estudiados se observa que, la máxima recuperación de cobre se obtuvo a 5 L/min, la cual correspondió al 74,9% mientras que a flujos 2 L/min y 10 L/min, que presentaron cinéticas más rápidas, lograron una recuperación de solamente 65,6% y 62,2%, respectivamente.

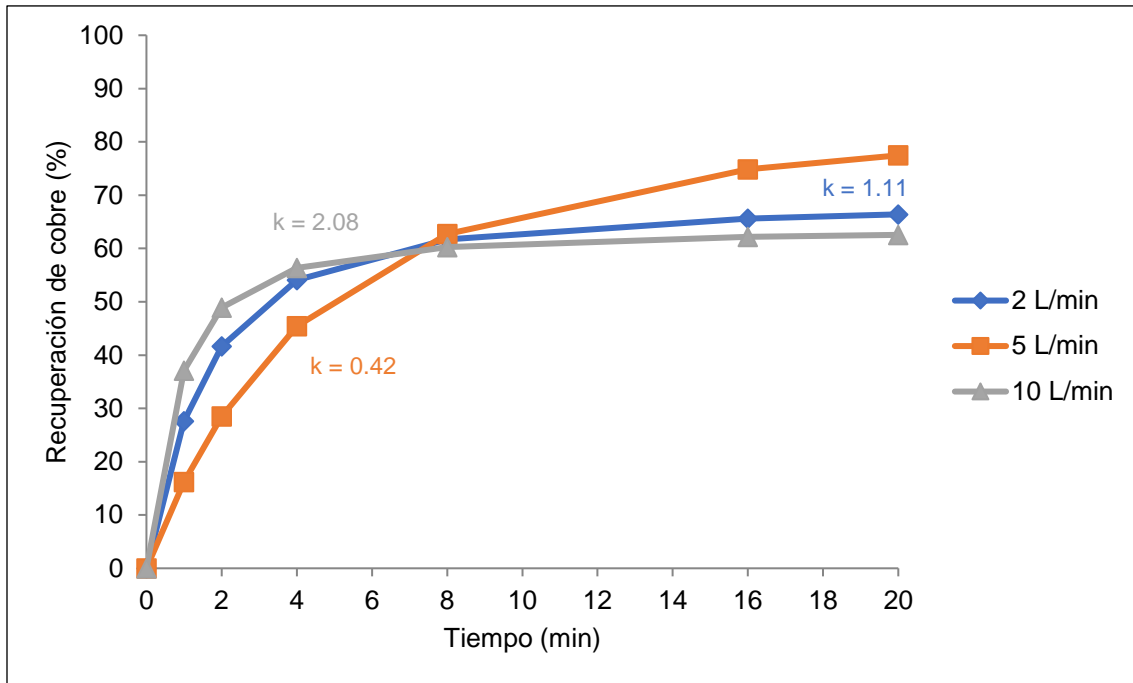


Figura 4.4: Cinéticas de flotación obtenidas en agua convencional a diferentes flujos de aire en presencia de 20 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.

La Tabla 4.5 presenta la ley acumulada de cobre hasta el minuto 16 de flotación para cada uno de los flujos de aire estudiados en presencia de 20 g/t de AVR. En ella se puede observar que, bajo estas condiciones, se obtuvieron leyes de cobre acumuladas mayores a las obtenidas en condiciones anteriores (60 g/t PAX y 100 g/t AVR). Ahora bien, comparando únicamente este set de pruebas, se podría indicar que los flujos de 5 L/min y 10 L/min son condiciones de flujo potencialmente favorables para realizar el proceso de flotación en presencia de AVR, siendo 10 L/min donde se logra la mayor ley de cobre con un valor de 11,8%, mientras que a 5 L/min se obtiene la mayor recuperación de cobre (74,9%), aumentando considerablemente el valor obtenido para el mismo flujo de aire pero a 100 g/t de AVR (Figura 4.3).

Tabla 4.5: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 16 de flotación con agua convencional en presencia de 20 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.

Flujo de aire (L/min)	Velocidad superficial del gas (cm/s)	Ley Cu (%)
2	0.28	5.0
5	0.69	8.8
10	1.38	11.8

#### 4.2.2 Cinéticas de flotación colectiva en agua de mar

A continuación, se presentan las curvas cinéticas de flotación obtenidas en agua de mar con colector PAX y AVR, a dos diferentes flujos de aire, de acuerdo con lo indicado en la Tabla 3.5 y la Tabla 3.6. Estas pruebas se realizaron con la finalidad de establecer tanto el tiempo de flotación más favorable para cada colector, fijar el flujo de aire a utilizar en las pruebas de flotación siguientes teniendo en cuenta el efecto de medio salino que se utilizará como fase líquida. Se hace necesario resaltar que todas las curvas cinéticas obtenidas de manera experimental fueron ajustadas mediante el modelo de Klimpel.

En la Figura 4.5 se presentan las curvas cinéticas de flotación obtenidas a 5 L/min y 10 L/min, utilizando 60 g/t de colector PAX, de acuerdo con las condiciones indicadas en la Tabla 3.5. En la figura se observa un comportamiento cinético similar a ambos flujos de aire estudiados, presentando una cinética de flotación levemente más rápida a 10 L/min y logrando muy buenas recuperaciones de cobre acumuladas, alcanzando al minuto 16 de flotación un 98,9% para el flujo de 5 L/min y un 95,7% para el flujo de 10 L/min. Con respecto al tiempo, es posible apreciar que para el flujo de 5 L/min existe un aumento de 3,1% aproximadamente en la recuperación de cobre entre los minutos 8 y 16 de flotación, mientras que para el flujo de 10 L/min, el aumento en el mismo periodo de tiempo es de alrededor de solo un 1,3%, lo que para este caso sugiere que en dicho lapso se recuperan partículas minerales de ganga que bajan la ley del concentrado.

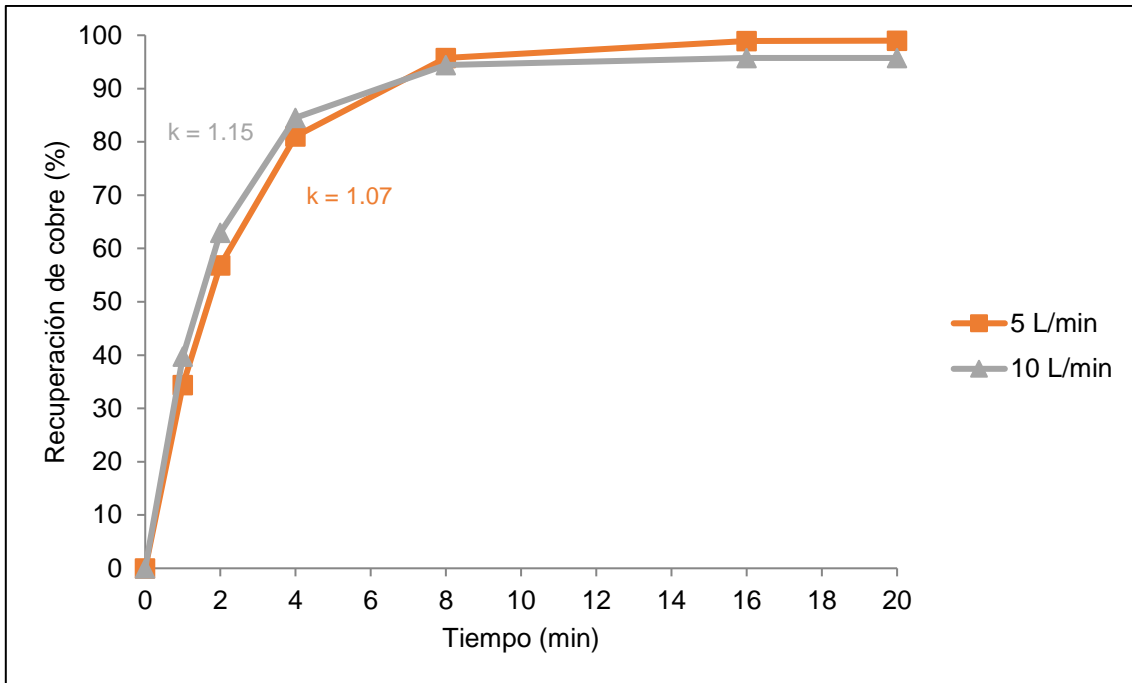


Figura 4.5: Cinéticas de flotación obtenidas en agua de mar a diferentes flujos de aire en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC.

En la Tabla 4.6 se presenta la recuperación y ley de cobre obtenida al minuto 8 y 16 de flotación para cada uno de los flujos de aire estudiados. En la tabla es posible observar que a 5 L/min la recuperación y ley de cobre es superior a la obtenida a 10 L/min, por lo que, se establece que 5 L/min corresponde al flujo de aire más adecuado para flotar este mineral en agua de mar usando colector PAX y, con respecto al tiempo, se aprecia que si bien el incremento en la recuperación es significativo entre los minutos 8 y 16 del proceso de flotación, al mismo tiempo se ve medianamente perjudicada la ley del concentrado, por lo tanto, se debe evaluar un instante de tiempo intermedio que permita obtener un buen resultado para ambos índices metalúrgicos. Por otro lado, comparando las recuperaciones y leyes de cobre obtenidas en función del flujo de aire tanto en agua convencional como en agua de mar, es importante notar que en presencia de colector PAX se logran valores cercanos en los diferentes medios, sin embargo, en agua de mar la cinética de flotación es mucho más rápida.

Tabla 4.6: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 8 y 16 de flotación con agua de mar en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC.

Flujo de aire (L/min)	Velocidad superficial del gas (cm/s)	Tiempo (min)	Recuperación (%)	Ley Cu (%)
5	0.69	8	95.8	5.3
		16	98.9	4.9
10	1.38	8	94.4	4.7
		16	95.7	4.2

Por otro lado, la Figura 4.6 presenta las curvas cinéticas de flotación con colector AVR a una concentración de 100 g/t obtenidas de acuerdo con lo indicado en la Tabla 3.6. En ella se observa que a un flujo de aire de 10 L/min, se presenta una cinética de flotación mucho más rápida que la obtenida a 5 L/min, pero una recuperación de cobre menor, correspondiente al 81%, mientras que a 5 L/min la recuperación de cobre sigue en aumento a luego de los 8 minutos, lográndose una recuperación del 92,3% al minuto 16 de flotación.

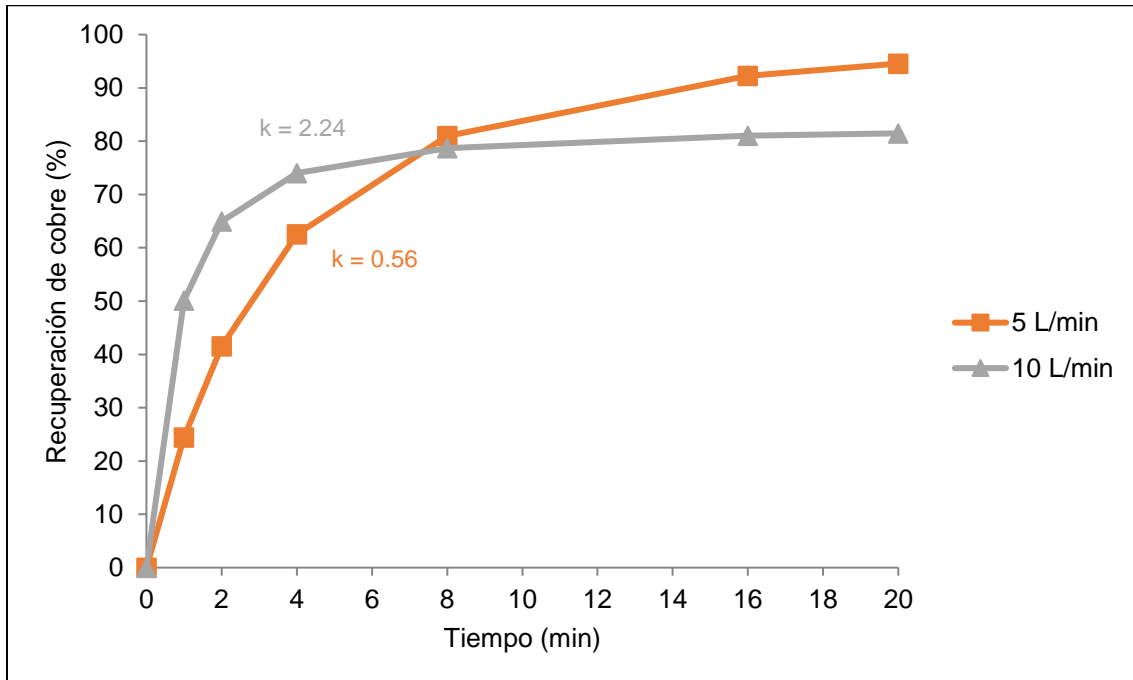


Figura 4.6: Cinéticas de flotación obtenidas en agua de mar a diferentes flujos de aire en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.

La Tabla 4.7 presenta la recuperación y ley de cobre obtenida al minuto 8 y 16 de flotación para cada uno de los flujos de aire estudiados en presencia de colector AVR. En la tabla es posible observar que a 10 L/min se logran las mayores leyes de cobre, pero se compromete su recuperación, mientras que, a 5 L/min y 16 min de flotación se logran leyes y recuperaciones de cobre cercanas a las obtenidas con colector PAX. Por lo tanto, se establece que el flujo más adecuado para el proceso de flotación con colector AVR corresponde a 5 L/min, determinando un tiempo de flotación entre el minuto 8 y 16 de flotación que permita obtener buenos resultados tanto en términos de ley como de recuperación de cobre. Por otro lado, comparando las recuperaciones y leyes de cobre obtenidas en función del flujo en agua convencional y en agua de mar, es importante notar que en presencia de colector AVR se logra una recuperación de cobre y una constante cinética mayor al utilizar agua de mar, mientras que, la ley de cobre es mucho más alta en presencia de agua convencional. Lo anterior se explica debido a las bajas recuperaciones obtenidas en dicho medio líquido.

*Tabla 4.7: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 8 y 16 de flotación con agua de mar en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.*

<b>Flujo de aire (L/min)</b>	<b>Velocidad superficial del gas (cm/s)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Recuperación (%)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>
5	0.69	8	81.0	5.8
		16	92.3	4.7
10	1.38	8	78.7	6.5
		16	81.0	5.9

Finalmente, la Figura 4.7 presenta las curvas de cinéticas de flotación colectiva obtenidas a 5 L/min en presencia de PAX y AVR. Cabe mencionar que, de igual manera que los casos anteriores, dichas graficas fueron ajustadas mediante el modelo de Klimpel considerando una prueba cinética de flotación *batch*. En la Tabla 4.8 se muestran la recuperación y la ley de cobre acumulada para cada colector al minuto 8 y 16 de flotación. De la figura y tabla mostrada se observa que en presencia de PAX al minuto 8 de flotación se comienza a estabilizar la curva cinética del

proceso, es decir, la recuperación de cobre entra en una fase de sostenimiento logrando una cierta estabilidad en función del tiempo, y del minuto 8 en adelante, únicamente se logra aumentar la recuperación en un 3% aproximadamente, mientras que la ley de cobre disminuye levemente. Por otra parte, para el caso del AVR la influencia de estos 8 minutos de flotación es mayor debido a que permite aumentar la recuperación de un 81% a un 92,3% afectando en mayor medida la ley.

Atendiendo a estas consideraciones, cabe destacar que para el proceso de flotación colectiva es trascendental lograr un alto porcentaje de recuperación, sin embargo, de igual manera es importante obtener tanto una buena ley del mineral de interés como una alta selectividad para el cobre en agua de mar. De esta manera, enfocándose tanto en el PAX como en el AVR, se estableció un tiempo de flotación de 12 minutos para ambos reactivos, debido a que este valor representa el tiempo medio del último intervalo estudiado y para el cual se espera un equilibrio entre los resultados obtenidos tanto para la recuperación como para la ley de cobre.

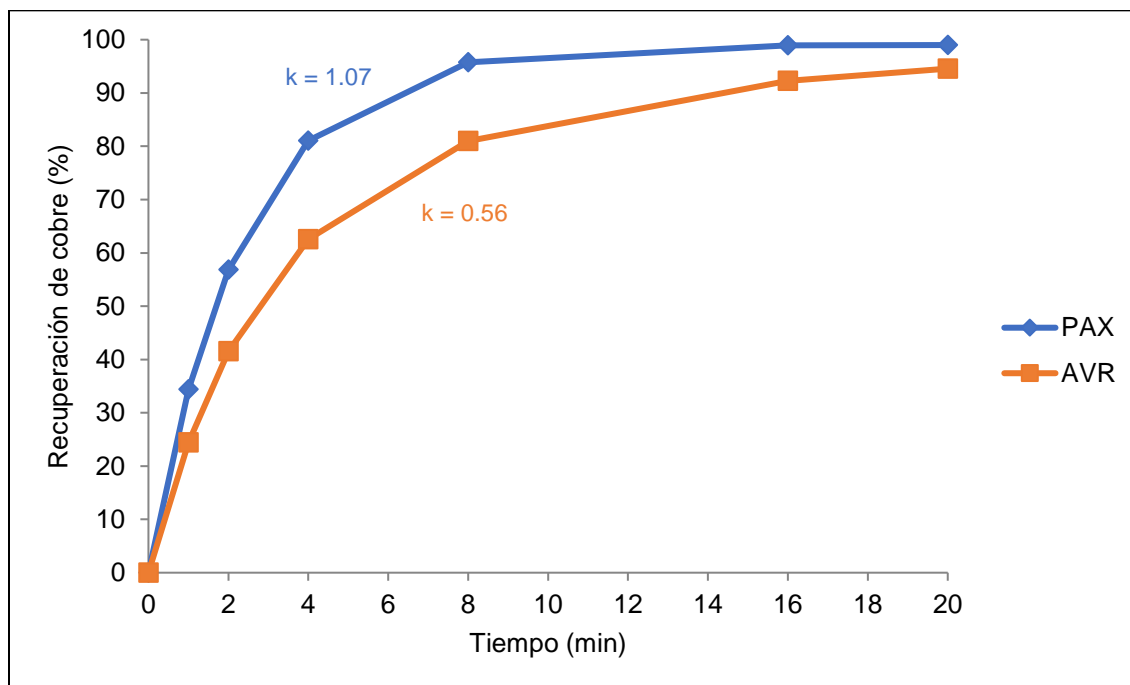


Figura 4.7: Cinéticas de flotación obtenidas en agua de mar para 60 g/t de colector PAX y 100 g/t de colector AVR a un flujo de 5 L/min de aire y 15 g/t de espumante MIBC.



Tabla 4.8: Recuperación y ley de cobre obtenidas al minuto 8 y 16 de flotación con agua de mar en presencia de 60 g/t de colector PAX y 100 g/t de colector AVR a un flujo de 5 L/min de aire y 15 g/t de espumante MIBC.

Reactivo colector	Tiempo (min)	Recuperación (%)	Ley Cu (%)
PAX	8	95.8	5.3
	16	98.9	4.9
AVR	8	81.0	5.8
	16	92.3	4.7

### 4.3 Resultados de flotación en agua de mar en función de la concentración de colectores PAX y AVR

#### 4.3.1 Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de colector PAX

Los ensayos de flotación variando la concentración de colector PAX fueron realizados con el objetivo de realizar una comparación entre los resultados de los índices metalúrgicos obtenidos con colector AVR y el colector convencional PAX en presencia de agua de mar.

La Figura 4.8 muestra los resultados obtenidos de la recuperación y ley de cobre y de hierro, en función de la concentración de PAX. En la figura se puede apreciar claramente que el comportamiento de la curva de recuperación de cobre es creciente hasta una recuperación máxima del 96,85% que se produce a una concentración de 40 g/t de PAX, la cual disminuye progresivamente con el aumento de la dosis del reactivo colector. De manera similar, al analizar la curva de ley de cobre, se puede observar que se tiene un comportamiento más variable, en donde a concentraciones menores de 40 g/t de colector se logran las mayores leyes de cobre, las cuales oscilan entre 6,8%, 4,4% y 6,7%, mientras que, a mayores concentraciones se mantiene constante la ley de cobre, la cual se encuentra entre el 2,8% y el 2,3%. Finalmente, en relación con la recuperación y ley de hierro obtenida en función de la concentración de PAX, se observa que se obtiene una tendencia similar a la obtenida en el cobre.

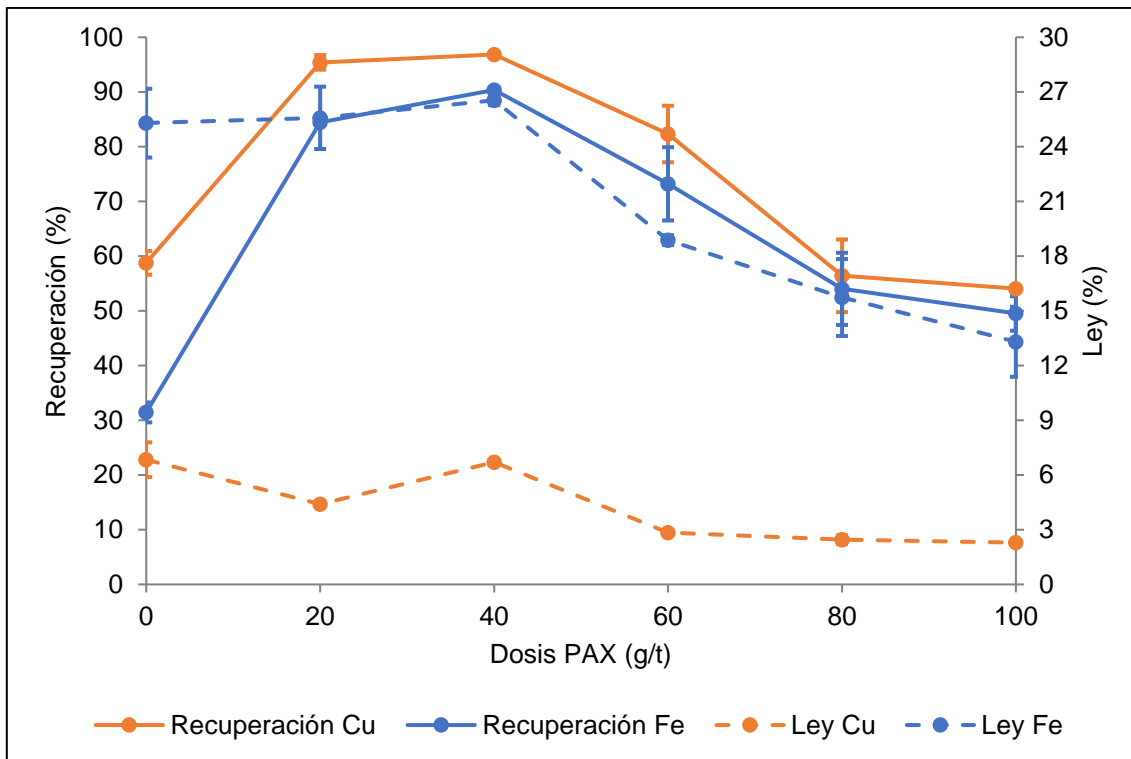


Figura 4.8: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Con relación a los resultados obtenidos en esta figura se observa que en ausencia de PAX se obtiene la más baja recuperación y más alta ley de cobre, lo cual era de esperarse debido a que bajo estas condiciones debieran flotar únicamente las partículas más hidrofóbicas del mineral como los sulfuros de cobre. Posteriormente, al agregar 20 g/t, de colector PAX se produce un aumento en la recuperación debido a que este reactivo le entrega características hidrofóbicas a las partículas de mineral lográndose a 40 g/t, la mayor recuperación y ley de cobre. Finalmente, a mayores concentraciones de este reactivo, se puede evidenciar que la recuperación y la ley de cobre disminuyen considerablemente lo que sugiere una sobredosificación de reactivo colector. De acuerdo a lo anterior, es de notar que una concentración de 40 g/t de colector PAX permite obtener las mejores recuperaciones y leyes de cobre en agua de mar, bajo las condiciones operacionales fijadas anteriormente.

Por otro lado, en relación con la recuperación y leyes de hierro obtenidas a diferentes concentraciones de PAX, puede observarse una tendencia similar de las

curvas obtenidas con cobre, sugiriendo que el hierro presente en el concentrado, se asocia principalmente a los minerales calcopirita y pirita. En la Figura 4.9 se presentan la recuperación y ley de ambos minerales obtenidas en función de la concentración de colector PAX, en ella se observa que, para ambos minerales se tiene una tendencia similar a las leyes y recuperaciones obtenidas de cada elemento, presentándose las mayores recuperaciones y leyes de calcopirita a una concentración de 40 g/t.

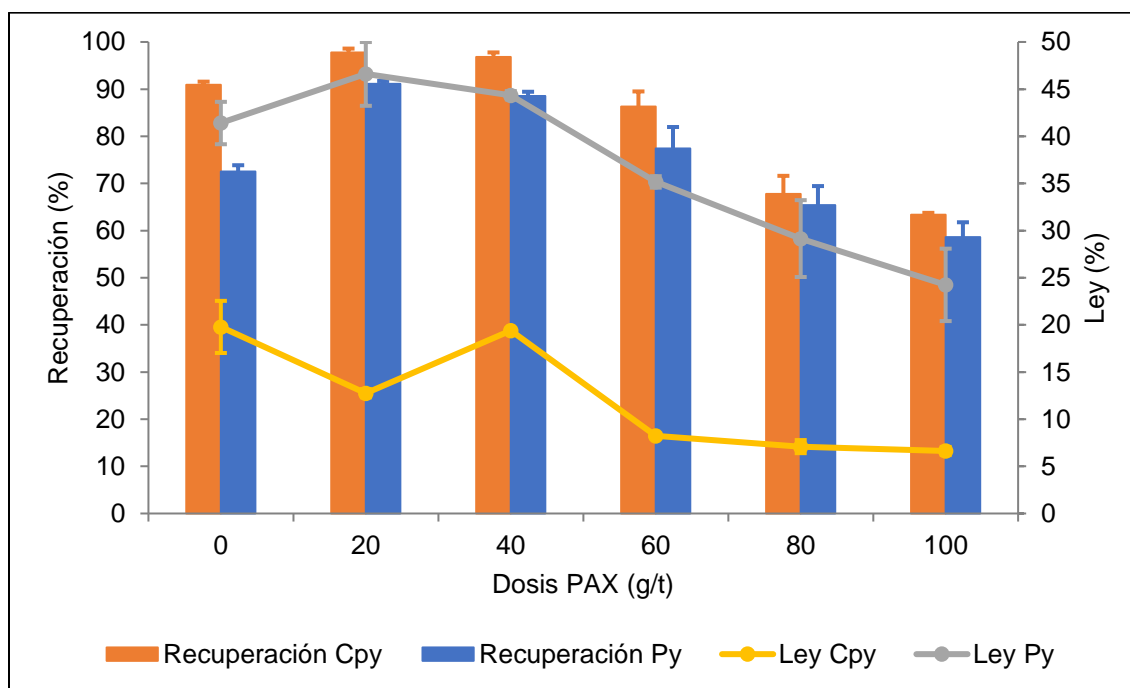


Figura 4.9: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Para poder analizar y explicar detalladamente los resultados de las diferentes condiciones estudiadas, en la Tabla 4.9 se presentan los índices metalúrgicos calculados para el set de pruebas de flotación con colector PAX. Dentro de estos índices encontramos la recuperación, ley, razón de enriquecimiento, índice de selectividad respecto a cobre – sílice y calcopirita – pirita, debido a que estas especies son las principales gangas que se requieren eliminar durante el proceso de flotación y, finalmente, la razón y rendimiento de concentración.

De los resultados presentados en la Tabla 4.9, se observa que, los mejores índices metalúrgicos respecto a cobre, se lograron a 20 g/t y 40 g/t de colector PAX, siendo a 20 g/t el caso en el que se presenta la mayor razón de enriquecimiento, razón de concentración y selectividad de cobre respecto a las principales gangas, sílice y pirita, y 40 g/t, el caso en el que se logra la mayor recuperación y ley de cobre. Con respecto a los índices de capacidad obtenidos a estas condiciones, se observa que la mayor razón de concentración ocurre a 20 g/t y, por consiguiente, el mayor rendimiento de concentración a 40 g/t.

*Tabla 4.9: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.*

<b>Concentración PAX (g/t)</b>	<b>R (%)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Re</b>	<b>IS (Cu-Si)</b>	<b>IS (Cpy-Py)</b>	<b>Rc</b>	<b>V</b>
<b>0</b>	58.78	6.84	4.69	6.27	1.95	8.02	0.12
<b>20</b>	95.41	4.41	2.99	14.92	2.06	3.15	0.32
<b>40</b>	96.85	6.70	1.93	7.62	1.98	1.99	0.50
<b>60</b>	82.32	2.85	1.93	3.42	1.36	2.36	0.42
<b>80</b>	56.40	2.45	1.47	1.65	1.05	2.63	0.38
<b>100</b>	54.05	2.29	1.34	1.47	1.10	2.48	0.40

#### **4.3.2 Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de colector AVR**

Las pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR se realizaron para conocer como era el comportamiento de este reactivo en el proceso de flotación con agua de mar, teniendo como principal objetivo encontrar la concentración de colector que permita los mejores resultados metalúrgicos dentro del intervalo de concentraciones estudiado, el cual posteriormente será comparado con los resultados obtenidos con la mejor concentración de colector convencional PAX, de manera que se genere una evaluación integrada de los datos.

En la Figura 4.10, se presentan los resultados obtenidos de recuperación y ley de cobre y de hierro, en función de las diferentes concentraciones estudiadas de colector AVR. En la figura se puede observar para el caso del cobre que la curva de

recuperación presenta un aumento importante cuando se agrega AVR al proceso, independiente cual sea su concentración, pasando de tener una recuperación de 58,8% en ausencia de reactivo colector a lograr una recuperación cercana al 90% en promedio a las diferentes concentraciones de AVR estudiadas. De manera similar, al analizar la ley de cobre, se observa que, a concentraciones entre 20 g/t y 80 g/t de colector AVR, se logra las mayores leyes de cobre, la cual es cercana al 9%, mientras que, en ausencia de colector y a una concentración máxima de 100 g/t esta ley disminuye a valores del 6,84% y 5,77%, respectivamente.

Por otra parte, con respecto a la recuperación y ley de hierro obtenida en función de la concentración de AVR, es posible manifestar que se obtiene una tendencia similar a la obtenida con cobre, en un rango entre 20 g/t y 60 g/t, en la cual se logra un recuperación y ley cercana al 45% y el 28%, respectivamente. Sin embargo, a 80 g/t se genera un aumento en la recuperación y ley de este elemento, correspondiente al 65,7% y 29,42%, respectivamente para finalmente disminuir a una recuperación del 51,9% y una ley del 20,41% cuando se agregan 100 g/t.

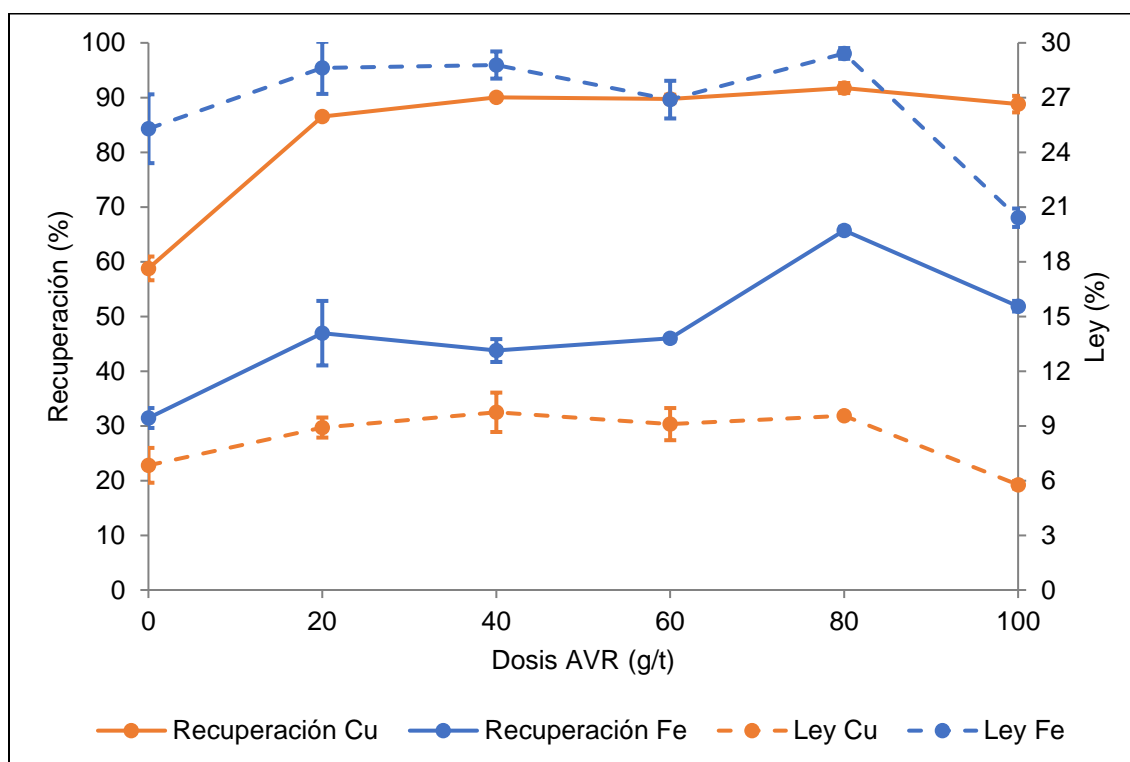


Figura 4.10: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Es importante mencionar que dentro del intervalo entre 20 g/t y 80 g/t de AVR, se tienen tanto las leyes como las recuperaciones de cobre más altas obtenidas con dicho colector, mejorando considerablemente los resultados obtenidos en ausencia de este, lo cual indica que este reactivo tiene un efecto positivo sobre el proceso y un gran potencial para ser considerado como reactivo colector en la flotación de sulfuros de cobre con agua de mar.

En la Figura 4.11 se muestran las recuperaciones y leyes calculadas de calcopirita y pirita en función de las concentraciones estudiadas de AVR. En la figura es posible observar que, para ambos minerales se tiene una tendencia similar a las leyes y recuperaciones obtenidas de cada elemento, presentándose las mayores recuperaciones y leyes de calcopirita a una concentración de 40 g/t.

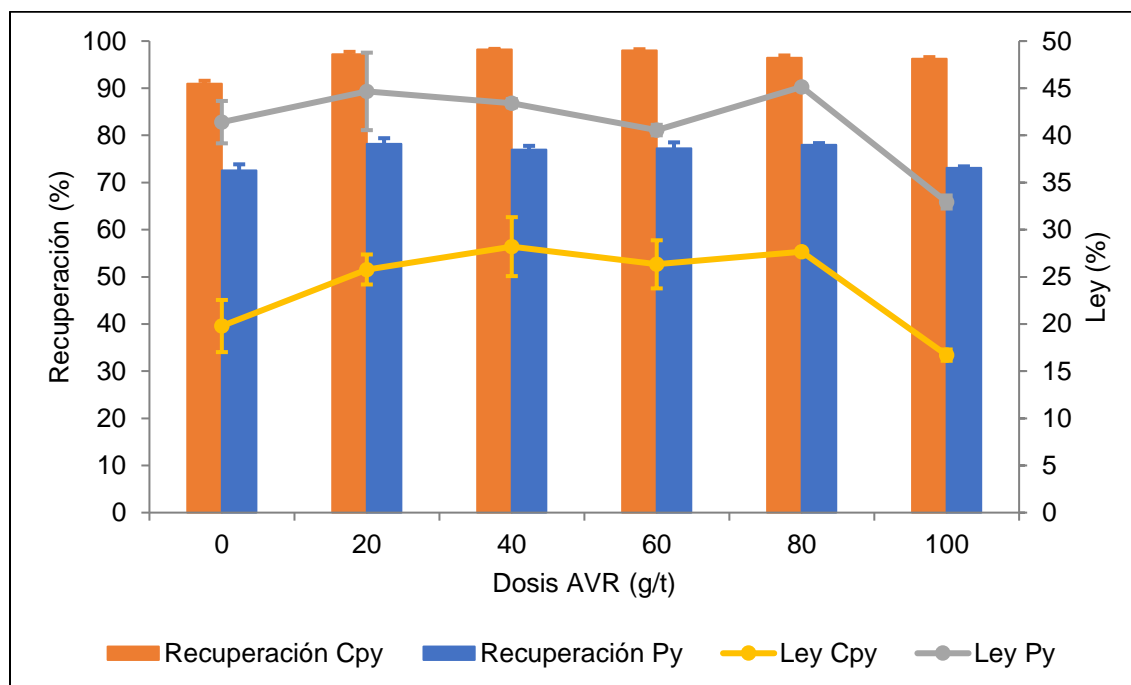


Figura 4.11: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Al comparar los resultados obtenidos en presencia de 40 g/t de PAX y AVR separadamente (Figura 4.9 y Figura 4.11), es de notar que las leyes de calcopirita en presencia de AVR (28.2%) son significativamente mayores a las obtenidas con PAX (19.4%). Por otro lado, se muestra además que las leyes de pirita se mantienen

oscilando entre el 40% y 45% y el aumento de la concentración del colector AVR no incide de manera considerable en la ley de este mineral. De acuerdo con lo anterior, se puede afirmar que en presencia de AVR se concentra la misma cantidad de pirita que con PAX, sin embargo, se presenta un aumento considerable en el porcentaje de calcopirita. Lo anteriormente expuesto, indica que el AVR se adsorbe preferentemente en las partículas de cobre y que en agua de mar este reactivo entrega resultados favorables tanto en términos de recuperación y leyes de cobre.

Para analizar con más detalle los resultados obtenidos en presencia de AVR, la Tabla 4.10 presenta los índices metalúrgicos calculados para el set de pruebas de flotación realizados. De los resultados presentados en la Tabla 4.10, se observa que los mejores índices metalúrgicos respecto a cobre, se lograron a 40 g/t y 80 g/t de colector AVR, siendo a 40 g/t el caso en el que se presenta la mayor ley, razón de enriquecimiento, razón de concentración y selectividad de cobre respecto a las principales gangas, sílice y pirita, y 80 g/t, el caso en el que se logra la mayor recuperación de cobre.

*Tabla 4.10: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.*

<b>Concentración AVR (g/t)</b>	<b>R (%)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Re</b>	<b>IS (Cu-Si)</b>	<b>IS (Cpy-Py)</b>	<b>Rc</b>	<b>V</b>
<b>0</b>	58.78	6.84	4.69	6.27	1.95	8.02	0.12
<b>20</b>	86.50	8.91	5.62	11.14	3.09	6.53	0.16
<b>40</b>	90.06	9.74	6.29	12.89	4.03	7.01	0.14
<b>60</b>	89.75	9.10	5.87	11.05	3.78	6.56	0.15
<b>80</b>	91.74	9.55	3.17	8.19	2.78	3.46	0.29
<b>100</b>	88.80	5.77	3.77	6.59	3.08	4.26	0.24

Comparando los resultados obtenidos en presencia de AVR y PAX, es posible establecer que a 40 g/t de colector AVR, el proceso de flotación logra mejores índices metalúrgicos que los obtenidos con PAX, en los cuales se puede señalar claramente que la ley de cobre, la razón de enriquecimiento, los índices de

selectividad y la razón de concentración son mejores al usar AVR que PAX, siendo la recuperación de cobre el único índice que se favorece en presencia de PAX.

#### **4.3.3 Resultados de las pruebas de flotación colectiva utilizando mezclas de colectores AVR/PAX en diferentes proporciones**

Debido a los buenos resultados obtenidos con PAX en términos de recuperación y con AVR en términos de ley para el cobre, se realizaron pruebas mezclando ambos reactivos colectores con el objetivo de estudiar posibles configuraciones de ellos que tengan efectos favorables sobre los índices metalúrgicos.

En la Figura 4.12 se presentan, de la misma manera que los casos anteriores, las curvas de recuperación y leyes de cobre y de hierro obtenidas en función de las diferentes mezclas de AVR/PAX indicadas en la Tabla 3.9. En la figura se puede observar que, para el caso del cobre, la recuperación obtenida para las mezclas de reactivos 80/20, 60/40, 40/60 y 20/80 es aproximadamente constante alcanzando una recuperación cercana al 98%, mientras que, en los casos en los que se emplearon reactivos por separado, se observa que la recuperación de cobre es menor con 100 g/t de PAX que al emplear la misma concentración de AVR, obteniéndose recuperaciones del 88,80% y 54,05%, respectivamente. Al analizar la ley de cobre, se observa que las mayores leyes se obtienen en las mezclas AVR/PAX de 80/20 y 60/40, las cuales correspondieron a 5,51% y 7,4%.

Por otro lado, frente a la recuperación y leyes de hierro obtenidas en función de las mezclas AVR/PAX se observa que, las curvas presentan un comportamiento semejante al del cobre, alcanzando una recuperación para los casos 80/20, 60/40, 40/60 y 20/80 de aproximadamente 90% y, con respecto a la ley de hierro, se puede observar que, las mayores leyes de este elemento se obtienen en las mezclas AVR/PAX de 80/20 y 60/40, las cuales fueron cercanas al 30%.

Al comparar los resultados de las recuperaciones y leyes obtenidas en las mezclas con respecto a las obtenidas únicamente con AVR (Figura 4.10 y Figura 4.12), se puede observar que, en la mezcla, la presencia de PAX favorece la recuperación de cobre obtenida con AVR, pero afecta la ley de cobre obtenida en el concentrado.



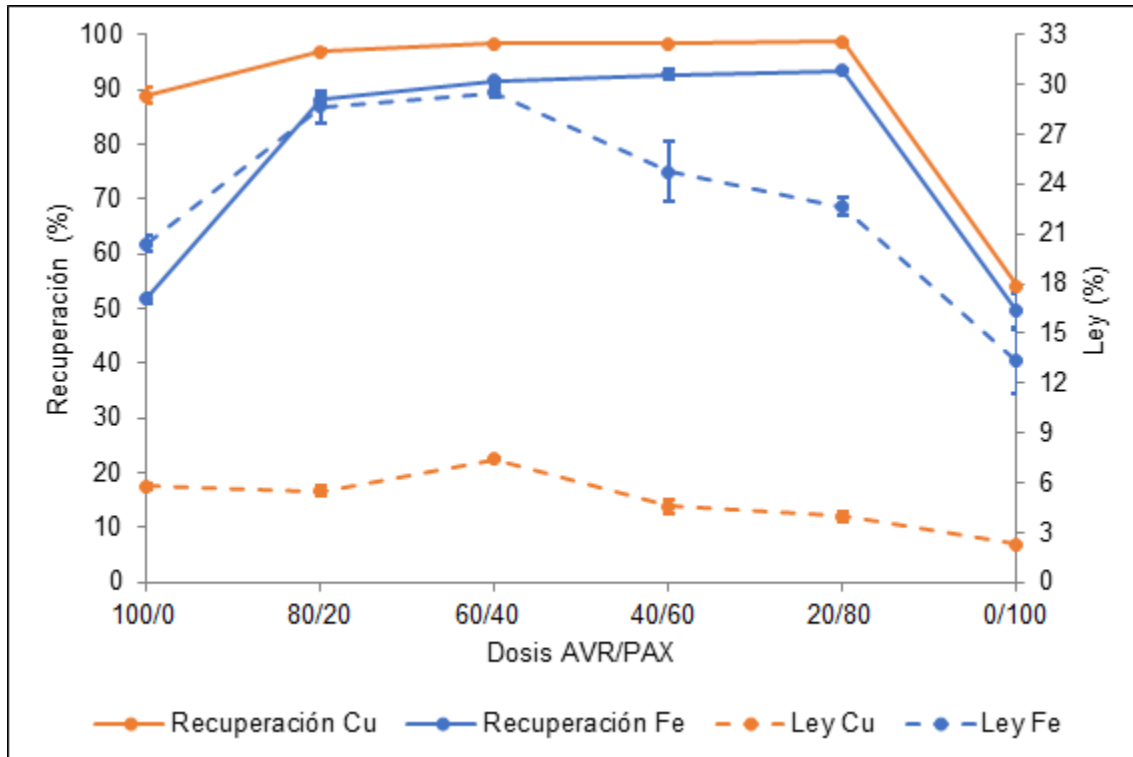


Figura 4.12: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Con respecto a la mineralogía asociada al proceso, en la Figura 4.13 se presenta la recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas para cada mezcla según las suposiciones indicadas anteriormente. En la figura, se puede observar que, la mayor recuperación y ley de calcopirita se obtuvo a una mezcla AVR/PAX de 60/40, obteniéndose un 98,6% y un 21,4%, respectivamente.

Comparando los resultados obtenidos con las mezclas frente a los obtenidos únicamente con AVR (Figura 4.11 y Figura 4.13), se puede observar que la presencia de PAX, genera un leve aumento en la recuperación de calcopirita, pero una disminución en la ley de este mineral y de igual manera, aumenta significativamente la presencia de pirita en los concentrados, siendo la mezcla AVR/PAX 60/40 la que presenta los mejores resultados.

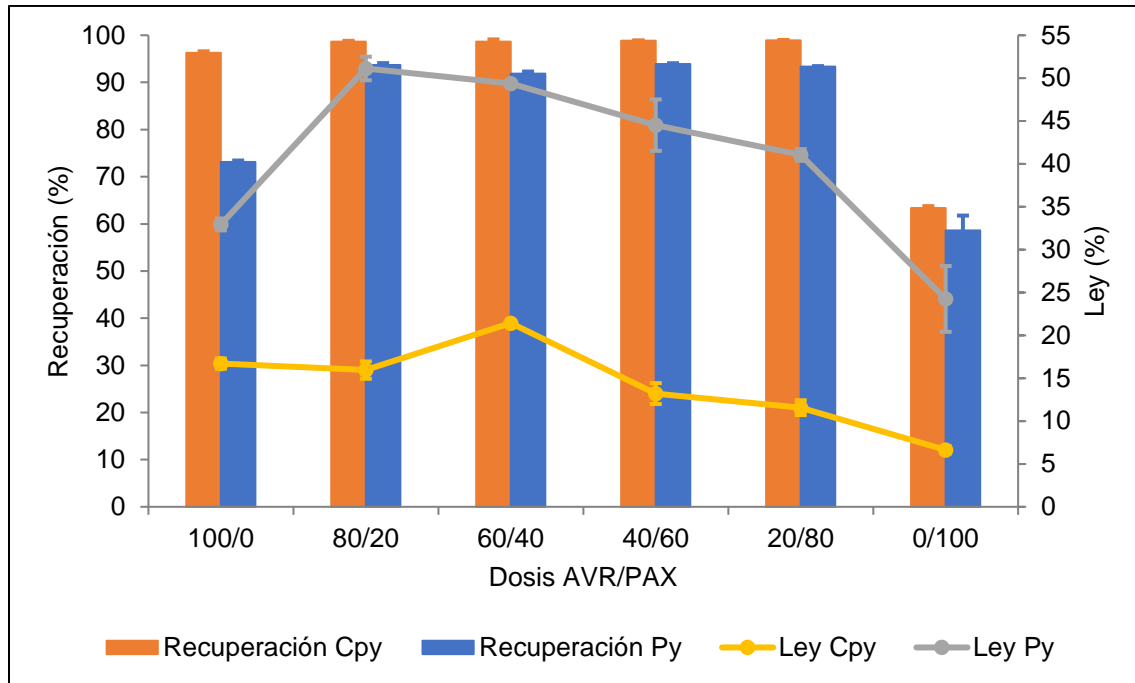


Figura 4.13: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Para analizar con más detalle los resultados obtenidos en presencia de las mezclas AVR/PAX, la Tabla 4.11 presenta los índices metalúrgicos calculados para el set de pruebas de flotación realizados. En ella se observa que, de manera general, los mejores índices metalúrgicos respecto al cobre, se lograron con la mezcla AVR/PAX 60/40, sobre todo en términos de selectividad del proceso.

Tabla 4.11: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de mezclas de colectores AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Concentración AVR/PAX	R (%)	Ley Cu (%)	Re	IS (Cu-Si)	IS (Cpy-Py)	Rc	V
<b>100/0</b>	88.80	5.77	3.77	6.59	3.08	4.26	0.24
<b>80/20</b>	96.94	5.51	3.22	13.80	2.24	3.33	0.30
<b>60/40</b>	98.24	7.40	2.25	13.78	2.53	2.29	0.44
<b>40/60</b>	98.41	4.56	2.36	13.38	2.37	2.41	0.42
<b>20/80</b>	98.75	4.00	2.11	12.91	2.53	2.14	0.47
<b>0/100</b>	54.05	2.29	1.34	1.47	1.10	2.48	0.40

Al realizar una comparación de los resultados bajo esta condición con respecto a los mejores resultados obtenidos con la acción por separado de cada colector (Tabla 4.9 y Tabla 4.10), se puede establecer que, el uso de mezclas de reactivos mejora la recuperación de cobre en comparación con la obtenida con ambos colectores por separado, mientras que la ley y la razón de enriquecimiento fue mejorada al compararlo con el PAX. Por otro lado, frente a los índices de selectividad respecto a las principales gangas, se observa que, la selectividad de cobre, respecto a sílice aumentó al emplear mezclas, mientras que, respecto a pirita, esta selectividad solo se vio aumentada al compararla con PAX. Finalmente, con respecto a la razón de concentración el uso de mezclas aumentó este índice respecto al valor obtenido con PAX, pero al compararlo con los obtenidos con AVR por sí solo, estos valores son significativamente mayores, generando los concentrados con menor cantidad de masa en presencia de AVR.

En general, las mezclas de reactivos generaron un efecto positivo lográndose una recuperación y ley máxima del cobre del 98,24% y del 7,40%, respectivamente, al emplear una mezcla AVR/PAX 60/40. Si bien es cierto que la ley es mayor que la obtenida con PAX y menor comparada con los casos de AVR, los resultados obtenidos con esta mezcla respecto a los demás índices metalúrgicos resultan atractivos considerando que el proceso estudiado corresponde a una etapa de flotación colectiva.

#### **4.4 Resultados de flotación en agua de mar en función de la concentración de espumante MIBC**

Los sets de pruebas de flotación variando la concentración de espumante se estudiaron únicamente para los casos con las concentraciones de colectores y mezclas que presentaron mejores resultados según lo manifestado en las secciones anteriores. Dentro de este marco, para el caso del PAX se mantuvo fija la concentración a 40 g/t, para el AVR se analizaron concentraciones de 40 g/t y 80 g/t y, finalmente, para el caso de las mezclas AVR/PAX se utilizó la relación 60/40 g/t.

El rango de concentración de MIBC utilizado para estas experiencias fue de 0 g/t a 20 g/t.

Es importante señalar que el objetivo de este estudio particular fue investigar el efecto que tiene la concentración de espumante en los resultados metalúrgicos del proceso de flotación en presencia de agua de mar para cada tipo de colector.

#### **4.4.1 Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de 40 g/t de PAX**

La Figura 4.14 presenta los resultados de la recuperación y ley de cobre y de hierro obtenidos en función de la concentración de MIBC. En la figura es posible observar que, las curvas de recuperación para ambos elementos, presentaron una tendencia similar y un comportamiento constante al variar la concentración de MIBC, mientras que, en el caso de las leyes de cobre y de hierro, aumentan conforme aumenta la concentración del espumante. Obteniéndose una recuperación mínima de cobre en ausencia de espumante, correspondiente al 96,6% y una máxima del 97,8% a 20 g/t de MIBC. Por otra parte, en relación con la recuperación de hierro se obtiene un comportamiento similar al cobre, obteniéndose una recuperación mínima de 89,7% en ausencia de espumante y una máxima de 90,8% al emplear 10 g/t de MIBC.

Con respecto a las leyes, para el caso del cobre se tiene que el menor valor fue de 5,43% y ocurre a 5 g/t de MIBC, a partir de la cual, comienza a aumentar progresiva y levemente en función de la concentración de espumante, llegando a obtenerse el valor máximo de 7,23% a 20 g/t. Por otro lado, al analizar la ley de hierro obtenida en el concentrado, se destaca que existe un comportamiento similar al anterior, donde la menor ley obtenida de hierro fue de 23% a 5 g/t de MIBC, mientras que, la más alta fue de 28,7% a 20 g/t de espumante.

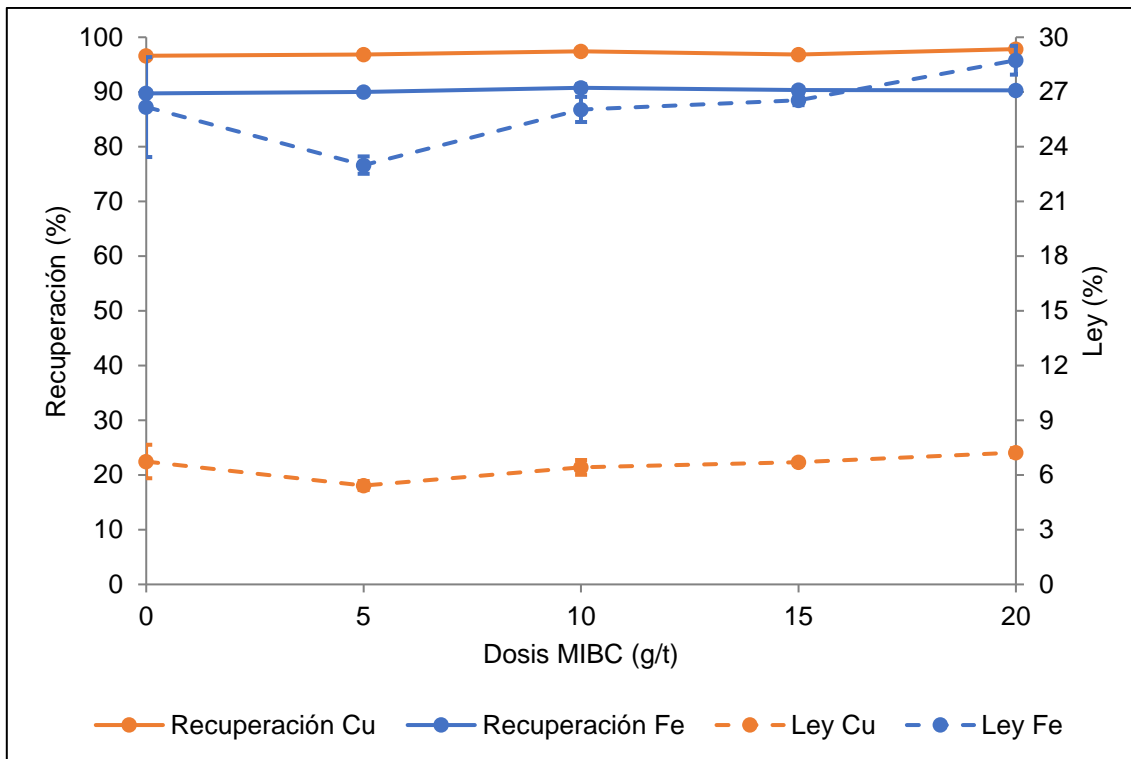


Figura 4.14: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.

De esta manera, y según las evidencias anteriores, se puede establecer que para esta prueba con 40 g/t de colector PAX, los mejores resultados en términos de ley y recuperación de cobre se obtienen con 20 g/t de espumante MIBC.

Por otro lado, en la Figura 4.15 se presentan los porcentajes de calcopirita y pirita obtenidos en función de la concentración de espumante. En ella se puede apreciar un comportamiento similar al obtenido con las leyes de cobre y de hierro, en donde, conforme aumenta la concentración de espumante aumenta las leyes de ambos minerales, obteniéndose las mayores leyes a una dosis de 20 g/t de MIBC, siendo de 20,9% para la calcopirita. Con respecto a la recuperación de estos minerales, este índice presenta poca variación en función de la concentración de espumante, alcanzando un máximo valor de 98,3% a 20 g/t de MIBC, mejorando de esta manera los resultados obtenidos con anterioridad a 15 g/t.

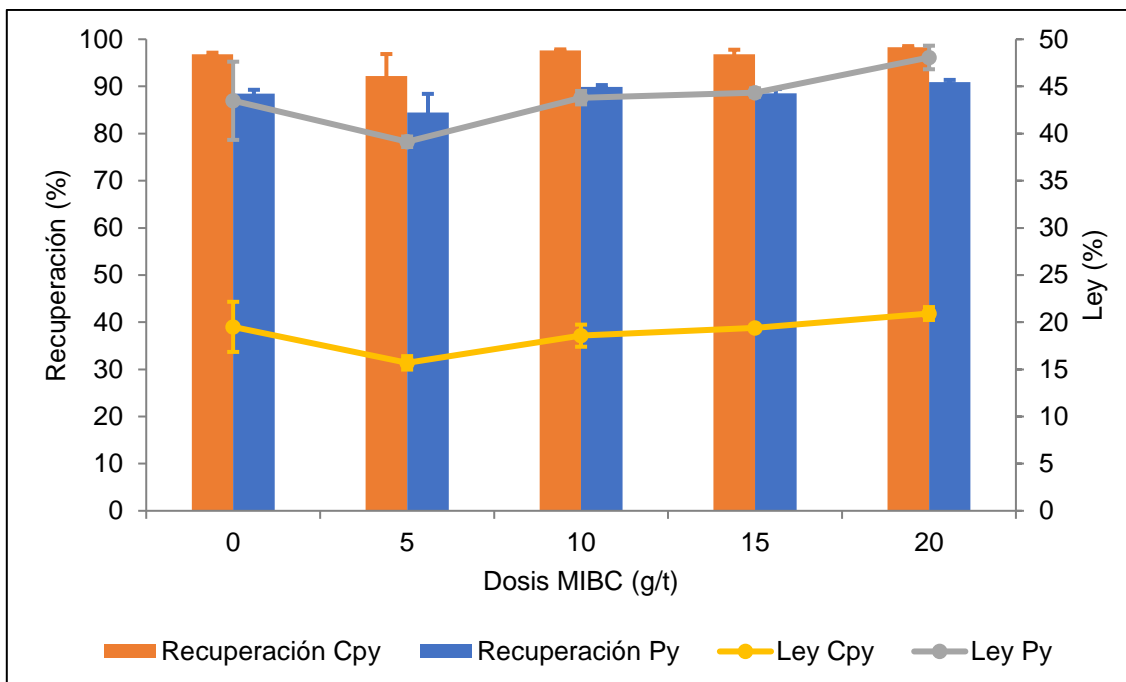


Figura 4.15: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.

La Tabla 4.12 presenta los índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante. En ella se observa que, efectivamente, a 20 g/t de MIBC, se obtienen los mejores índices metalúrgicos. Es importante destacar que el índice de selectividad Cu-Si aumenta considerablemente en presencia de dicha dosis de MIBC, llegando hasta 11,99, así como también para el caso Cpy-Py, en donde se obtiene un valor de 2,43. Finalmente, con respecto a los índices de capacidad, la razón de concentración es mayor en comparación a las demás concentraciones de MIBC, indicando que el concentrado obtenido en el proceso tiene una menor cantidad de masa, haciendo el proceso más eficiente tanto en términos colectivos como selectivos, por consiguiente, se obtiene el menor rendimiento de concentración de todas las condiciones estudiadas, confirmando el hecho de tener menor cantidad de masa en el concentrado con respecto a la alimentación del proceso.

Tabla 4.12: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	R (%)	Ley Cu (%)	Re	IS (Cu-Si)	IS (Cpy-Py)	Rc	V
0	96.62	6.74	1.99	7.77	1.99	2.06	0.49
5	90.98	5.42	1.92	5.50	1.48	2.13	0.47
10	97.44	6.42	2.04	9.24	2.16	2.10	0.48
15	96.85	6.70	1.93	7.62	1.98	1.99	0.50
20	97.84	7.23	2.27	11.99	2.43	2.33	0.43

#### 4.4.2 Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de 40 g/t de AVR

La Figura 4.16 presenta las curvas de recuperación y ley de cobre y de hierro obtenidas a las diferentes concentraciones de espumante para una concentración de 40 g/t de AVR. En la figura es posible destacar que la recuperación de cobre tiene un comportamiento estable que oscila entre 87% y el 90% en el intervalo que va desde 0 g/t a 15 g/t, presentándose la menor recuperación a 20 g/t, la cual fue de 84,7%. Por otra parte, en relación con la recuperación de hierro, se puede observar que la curva obtenida presentó un comportamiento similar a la del cobre, es decir, la recuperación mantiene estable alrededor del 56%, mientras que a 15 g/t, a diferencia del caso del cobre que aumentó levemente su recuperación, para el hierro disminuye notoriamente hasta un 44% aproximadamente.

Con relación a las leyes obtenidas en función de la concentración de MIBC, para el caso del cobre, se puede observar que, en ausencia de espumante se logra una ley del 9,74%, que luego, al adicionar bajas concentraciones de espumantes, correspondientes a 5 g/t y 10 g/t, disminuye a valores de 8,33% y 7,92%, respectivamente. Sin embargo, a concentraciones mayores, correspondientes a 15 g/t y 20 g/t se logra un aumento considerable alcanzando valores de 9,74%, y 9,51%, respectivamente.

Frente a la ley de hierro, se puede apreciar un comportamiento similar que el obtenido en el caso del cobre, el cual a 0 g/t se tiene un valor de 28,37%, a

concentraciones de 5 g/t y 10 g/t disminuye a 27,79% y 27,26%, respectivamente, mientras que a concentraciones mayores se revierte la ley, obteniéndose el mayor valor a 15 g/t de MIBC, correspondiente al 28,79%.

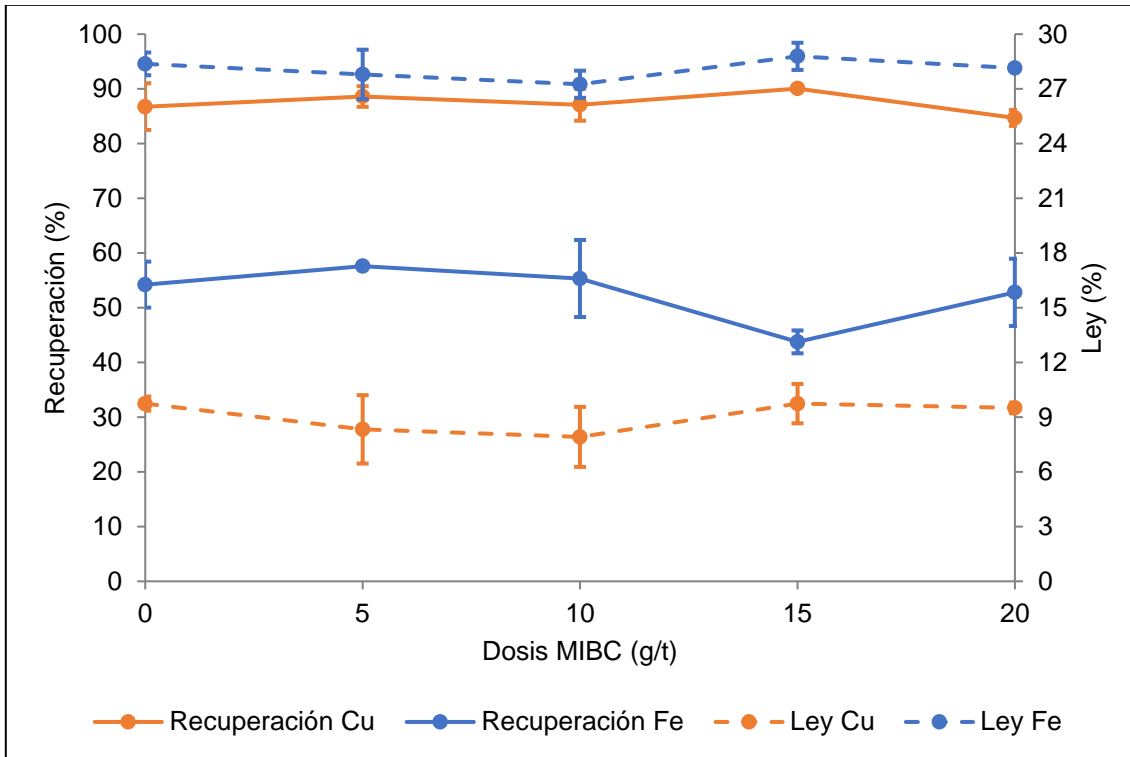


Figura 4.16: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.

Adicionalmente, en la Figura 4.17 se presentan la recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en el concentrado para cada una de las concentraciones de espumante estudiadas. En ella se puede observar que, la calcopirita se relaciona directamente con la ley de cobre, por lo que a 0 g/t y 15 g/t presenta su mayor ley con un valor de 28,2%. Por otro lado, se observa que la ley de pirita en el concentrado se mantiene prácticamente constante entre 42% y 43%. Con respecto a las recuperaciones de ambos minerales, se observa que se mantienen prácticamente constantes en todo el intervalo de concentraciones de espumante estudiado, obteniendo la mayor recuperación de calcopirita a 15 g/t de MIBC con un valor de 98,2%, mientras que la menor recuperación de pirita se alcanza a 20 g/t.



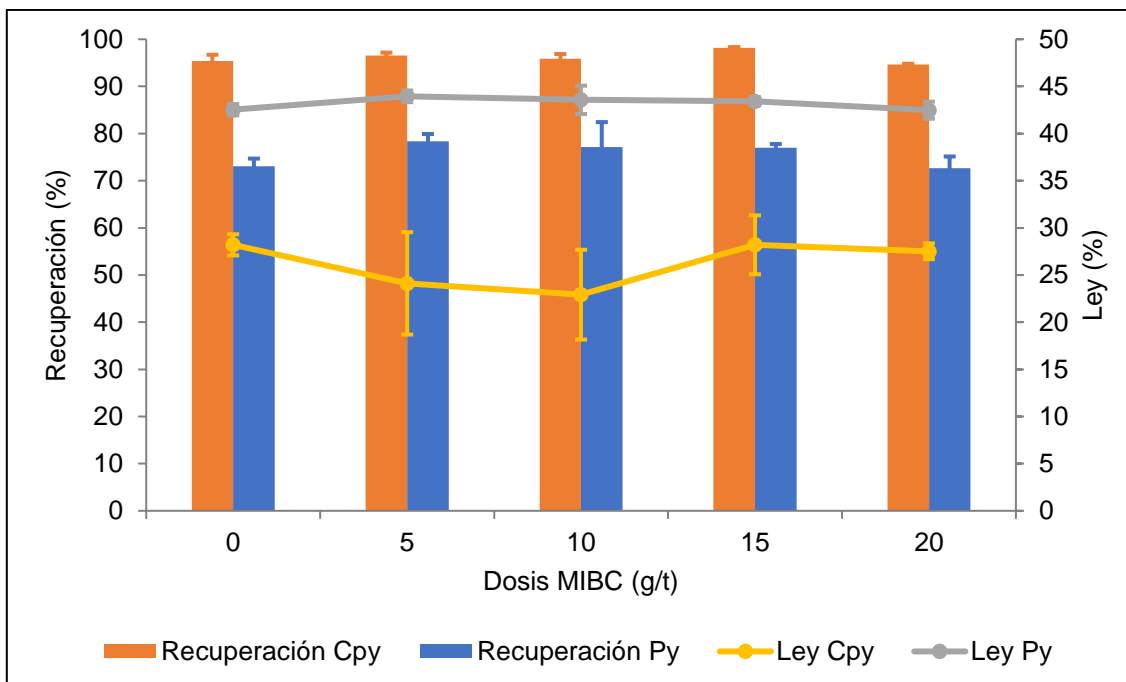


Figura 4.17: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.

La Tabla 4.13 presenta los índices metalúrgicos obtenidos en función de las diferentes concentraciones de espumante. En ella se observa que, los mejores índices se obtienen a una concentración de 15 g/t, destacando tanto la razón de enriquecimiento de 6,29, el índice de selectividad Cu-Si de 12,89 y Cpy-Py de 4,03, así como también la razón de concentración de 7,01, indicando una alta capacidad selectiva en el proceso a esta condición de operación y dosificación de reactivos en presencia de agua de mar.

En este mismo contexto, se destaca de sobremanera el índice de selectividad de la calcopirita sobre la pirita obtenido a 15 g/t de MIBC, debido a su alto valor, el cual fue de 4. Esto representa de acuerdo con la literatura un buen resultado metalúrgico para el proceso de flotación, el cual, integrado con el resto de los índices estudiados hacen ver este caso como una buena condición de operación en términos de factibilidad para su utilización en procesos industriales. Finalmente se destaca el rendimiento de concentración que indica que, del total de la masa alimentada a la

flotación, únicamente un 14% es transferido a la corriente de concentrado, sugiriendo una alta selectividad para el proceso.

Tabla 4.13: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	R (%)	Ley Cu (%)	Re	IS (Cu-Si)	IS (Cpy-Py)	Rc	V
0	86.76	9.74	3.56	8.06	2.76	8.02	0.12
5	88.61	8.33	3.95	8.59	2.78	4.48	0.22
10	87.10	7.92	4.00	8.10	2.63	4.61	0.22
15	90.06	9.74	6.29	12.89	4.03	7.01	0.14
20	84.70	9.51	3.56	7.11	2.58	4.23	0.24

#### 4.4.3 Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de 80 g/t de AVR

La Figura 4.18 presenta los resultados obtenidos de la recuperación y ley de cobre y de hierro, en función de la concentración de MIBC. En la figura es posible observar que no existieron grandes variaciones en función de la concentración de espumante estudiadas, sino que más bien las variables permanecieron constantes a lo largo del intervalo analizado.

En primer lugar, la recuperación de cobre tiene un comportamiento en general estable, cercano al 90%, mientras que, la recuperación de hierro oscila entre 60,97% en ausencia de espumante hasta un máximo del 65,72% a 15 g/t de MIBC. Por otro lado, en relación con la ley de cobre, se observa que se obtuvo una curva con un comportamiento estable, la cual oscila entre el 8,94% y el 9,55%. Finalmente, en relación con la ley de hierro, se observa también un comportamiento estable en función de la concentración de espumante, que presenta leves incrementos en sus valores de ley a medida que aumenta la concentración de espumante, alcanzando una ley de hierro que oscila entre 28,33% a 0 g/t y 29,77% a 20 g/t.

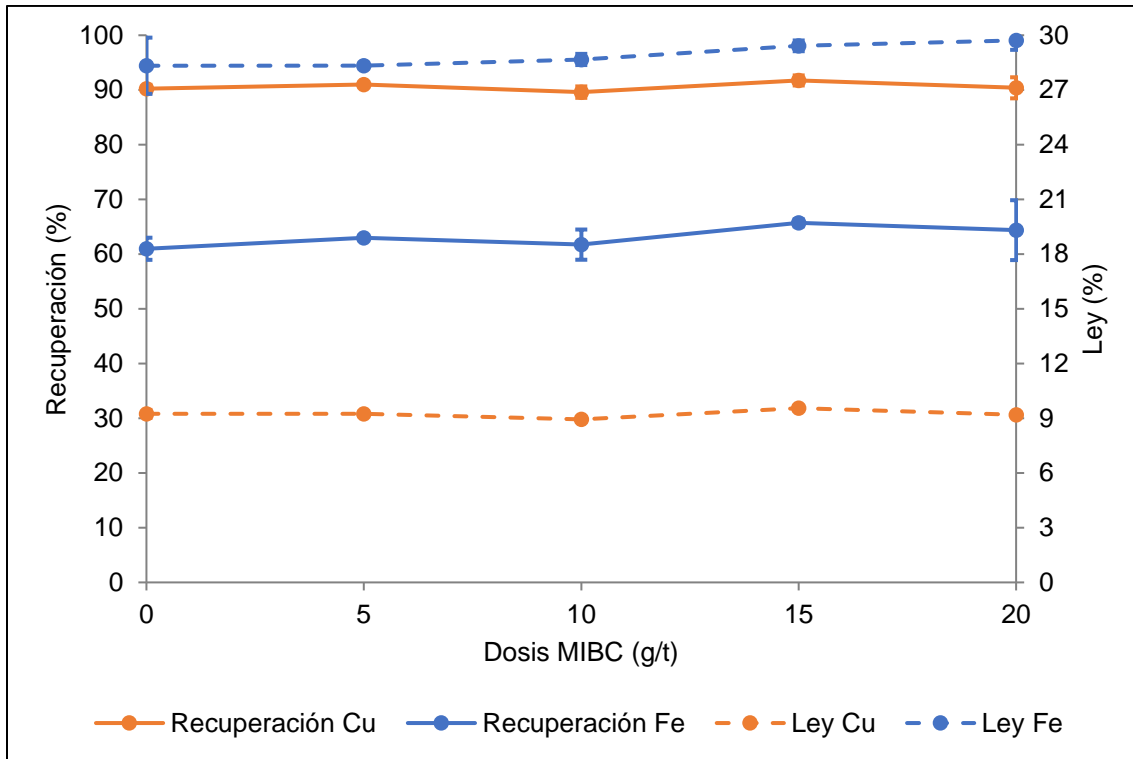


Figura 4.18: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.

Por otra parte, en la Figura 4.19 se presenta la ley y recuperación de calcopirita y pirita obtenidas en el concentrado para cada concentración de espumante estudiada. En la figura es posible observar que a 15 g/t de MIBC se obtiene la mayor ley de calcopirita, correspondiente a 27,7% junto a una ley de pirita del 45,1%. Mientras que, con respecto a la recuperación, se observa que no existen grandes variaciones en función de la concentración de espumante, logrando la máxima recuperación de calcopirita también a 15 g/t de MIBC con un valor de 96,5%, correspondiéndole una recuperación de pirita del 78%.

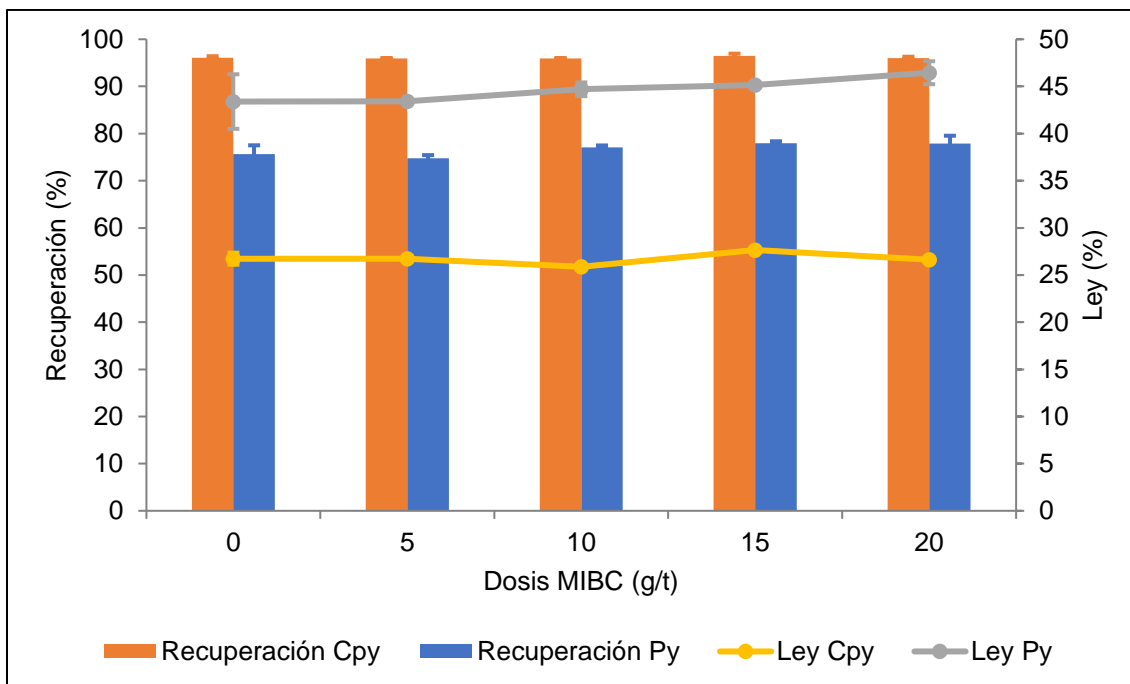


Figura 4.19: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.

La Tabla 4.14 presenta los índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante. En ella se observa que, al emplear 80 g/t de AVR, la dosis de espumante no influye en gran medida en los resultados metalúrgicos presentados. Sin embargo, se observa que a 15 g/t de MIBC se obtiene la mayor recuperación y ley de cobre y, si bien, a esta dosis no se obtienen los valores más altos para el resto de los índices analizados, estos son lo suficientemente adecuados como para determinar que a dichas condiciones el proceso se lleva a cabo de la mejor forma.

Al comparar los resultados obtenidos a 80 g/t de AVR respecto a los obtenidos con 40 g/t de AVR (Tabla 4.13) empleando 15 g/t MIBC, se observa que el aumento de la concentración de AVR incrementó la recuperación de cobre, pero redujo significativamente los demás índices metalúrgicos, incluyendo la ley y los índices de selectividad. Debido a lo anterior se indica que la concentración de reactivos más recomendada corresponde a 40 g/t de AVR y 15 g/t de MIBC.

Tabla 4.14: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	R (%)	Ley Cu (%)	Re	IS (Cu-Si)	IS (Cpy-Py)	Rc	V
0	90.22	9.24	3.29	6.27	2.80	8.02	0.12
5	90.98	9.24	3.03	7.73	2.81	3.33	0.30
10	89.61	8.94	3.35	7.90	2.65	3.75	0.27
15	91.74	9.55	3.17	8.19	2.78	3.46	0.29
20	90.39	9.20	3.20	8.39	2.62	3.55	0.28

#### 4.4.4 Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de la mezcla AVR/PAX 60/40

La Figura 4.20 presenta los resultados de la recuperación y ley de cobre y de hierro obtenidos en función de la concentración de MIBC empleando como colector una mezcla de AVR/PAX de 60/40 g/t. En general, es posible observar que todas las curvas obtenidas tienen un comportamiento prácticamente estable en función de la concentración de MIBC. Con respecto a la recuperación de cobre se observa que su comportamiento es homogéneo en todo el rango de concentración de espumante, es decir, se mantiene constante con un valor cercano al 98%. Por otra parte, la recuperación de hierro también se comporta de forma estable, manteniendo una recuperación que oscila entre el 90,78% y el 92,4%.

Con relación a las leyes obtenidas, se puede observar que, respecto a la ley de cobre, se mantiene estable con un valor cercano al 7%, alcanzando su máximo valor en ausencia de MIBC correspondiente a un 7,58% de cobre en el concentrado y un valor mínimo a 5 g/t correspondiente a un 7,05%. Por otra parte, al analizar la ley de hierro se puede indicar que exhibe un comportamiento constante en función de la concentración de MIBC, obteniéndose la máxima y mínima ley de hierro a 15 g/t y 5 g/t, respectivamente, con valores de 29,49% y 28,80% para cada una de las dosis mencionadas.

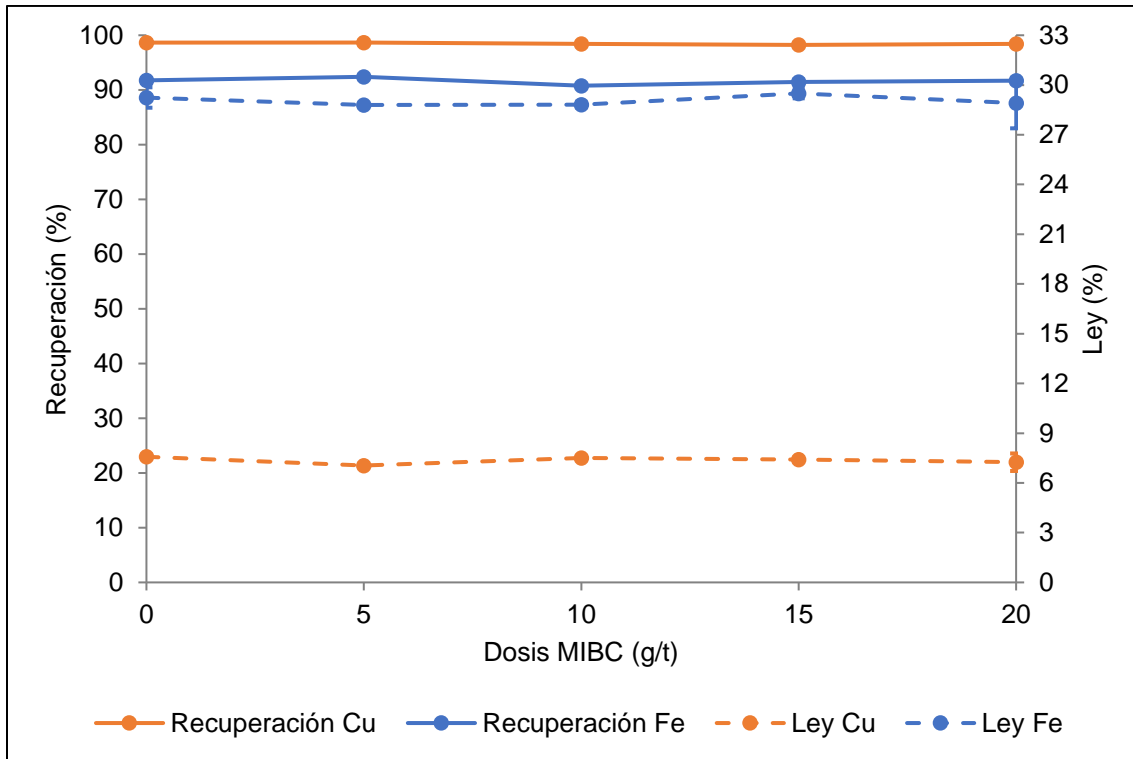


Figura 4.20: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.

En la Figura 4.21 se presentan la ley y recuperación de calcopirita y pirita obtenidas a las diferentes concentraciones de espumante estudiadas. Es posible observar en la figura que, el mayor contenido de calcopirita, al igual que la mayor ley de cobre, se logra en ausencia de espumante y corresponde a un 21,9% junto a un 48,5% de pirita. Mientras que, la menor ley de este último mineral fue de 47,7% y se alcanza a una concentración de 10 g/t de MIBC, la cual coincide con uno de los menores valores para la ley de hierro. Con respecto a la recuperación de estos minerales, en general se mantiene sin grandes alteraciones en función de la concentración de espumante, sin embargo, las máximas recuperaciones de calcopirita se alcanzan a 0 g/t y 5 g/t con valores de 98,9% aproximadamente, mientras que la máxima recuperación de pirita ocurre a 5 g/t con un valor de 92,5%.

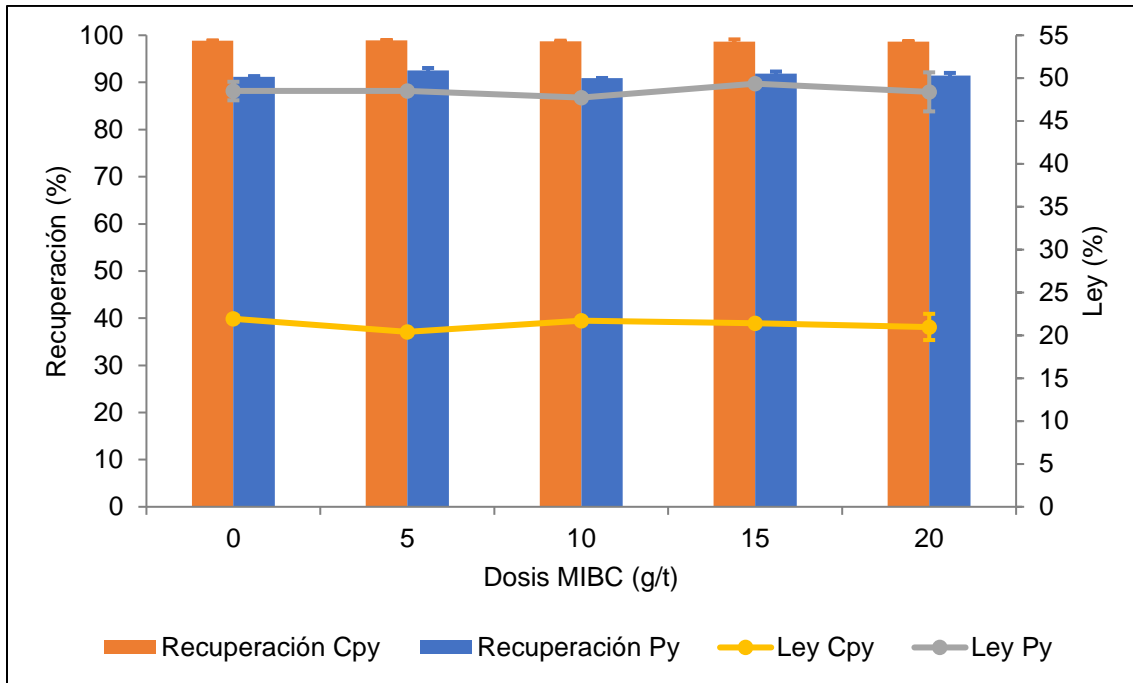


Figura 4.21: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.

En este mismo contexto, la Tabla 4.15 presenta los índices metalúrgicos obtenidos en función de las diferentes concentraciones de espumante. En ella se observa que, con respecto a la recuperación y ley de cobre, existe una muy leve variación entre cada prueba en función de la concentración de espumante y el resultado más alto se obtiene en ausencia de MIBC. Frente a la razón de enriquecimiento, se observa un comportamiento similar, obteniéndose el mayor enriquecimiento a 15 g/t de MIBC. Por otro lado, frente a los índices de selectividad, el índice de selectividad Cu-Si presentó sus valores más altos a 5 g/t de espumante, mientras que para el caso Cpy-Py el mayor valor se obtuvo en ausencia de MIBC. Finalmente, en relación con los índices de capacidad, se observa que la mayor razón de concentración se logró en ausencia de espumante junto con el mejor rendimiento.

Tabla 4.15: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.

<b>Concentración MIBC (g/t)</b>	<b>R (%)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Re</b>	<b>IS (Cu-Si)</b>	<b>IS (Cpy-Py)</b>	<b>Rc</b>	<b>V</b>
<b>0</b>	98.66	7.58	2.14	14.65	2.88	4.26	0.24
<b>5</b>	98.67	7.05	2.22	15.06	2.74	2.26	0.44
<b>10</b>	98.40	7.50	2.23	13.75	2.79	2.27	0.44
<b>15</b>	98.24	7.40	2.25	13.78	2.53	2.29	0.44
<b>20</b>	98.43	7.25	2.16	12.85	2.64	2.20	0.45

A partir de los resultados obtenidos en función de las diferentes concentraciones de MIBC para las mejores concentraciones de colectores por separado (Tabla 4.12 y Tabla 4.13) y la mezcla de estos (Tabla 4.15), se observa que, exceptuando la recuperación, los mejores índices metalúrgicos obtenidos se obtienen al utilizar 40 g/t de AVR y 15 g/t de MIBC. Por otro lado, el uso de mezclas AVR/PAX permite llevar a cabo el proceso de flotación en ausencia de espumante, lográndose incluso mejores índices metalúrgicos que los obtenidos con colector convencional PAX. Este fenómeno podría ser explicado debido a que como existe presencia de PAX y AVR en el proceso, este último además de actuar como colector podría desempeñarse como espumante dadas sus propiedades físicas y químicas, además de su capacidad de formar espuma, logrando una flotación con buenos resultados metalúrgicos. En este aspecto, se hace necesario resaltar que el uso de mezclas logra un gran desempeño en términos colectivos, logrando la más alta recuperación de todas las condiciones estudiadas y la mayor selectividad respecto al caso Cu-Si, así como una reducción másica de aproximadamente cuatro veces de la alimentación a la corriente de concentrado.



## 5 CONCLUSIONES

A partir de la presente investigación y en relación con sus objetivos, es posible concluir lo siguiente:

- Al estudiar el efecto del flujo de aire en la flotación de minerales de cobre en agua de mar en presencia de colector AVR y PAX, se pudo establecer que, para una etapa de flotación colectiva, el flujo de aire de 5 L/min fue la condición que logró la mayor recuperación de mineral de cobre en presencia de los colectores estudiados. Lo anterior se debe principalmente a que bajo esta condición se logra una velocidad superficial de gas dentro del rango sugerido para celdas convencionales, la cual asegura que no ocurren turbulencias, arrastre mecánico y pérdidas de interfase.
- A partir de las cinéticas de flotación realizadas en presencia de los reactivos PAX y AVR, se logró definir que un tiempo de flotación de 12 minutos conseguía un porcentaje adecuado de recuperación de cobre para cada colector sin afectar en gran medida la ley del concentrado, logrando un equilibrio entre ambos parámetros.
- Al comparar la cinética de flotación obtenida en presencia de PAX y AVR en agua de mar, se logró observar que, si bien, ambos tenían un comportamiento similar, el colector convencional presentó una cinética más rápida y una evidente meseta para la recuperación acumulada de cobre.
- Con respecto al análisis metalúrgico de las pruebas experimentales de flotación en agua de mar en función de la concentración de los colectores, manteniendo una concentración de espumante MIBC de 15 g/t, se pudo destacar lo siguiente:
  - Para el colector PAX los mejores resultados se obtuvieron a una concentración de 40 g/t, condición a la cual se logró una recuperación

de cobre de 96,85%, una ley de cobre de 6,70%, una razón de enriquecimiento de 1,93, un índice de selectividad para el cobre en función de la sílice de 7,62 y para calcopirita en función de pirita de 1,98, además de una razón de concentración de 1,99 y un rendimiento de concentración de 0,5.

- Para el colector AVR los mejores resultados se obtuvieron a una concentración de 40 g/t, condición a la cual se logró una recuperación de cobre de 90,06%, una ley de cobre de 9,74%, una razón de enriquecimiento de 6,29, un índice de selectividad para el cobre en función de la sílice de 12,89 y para calcopirita en función de pirita de 4,03, además de una razón de concentración de 7,01 y un rendimiento de concentración de 0,14. También se destacan los resultados obtenidos a una concentración de 80 g/t de AVR logrando una recuperación de cobre de 91,74%, una ley de cobre de 9,55%, una razón de enriquecimiento de 3,17, un índice de selectividad para el cobre en función de la sílice de 8,19 y para calcopirita en función de pirita de 2,78, además de una razón de concentración de 3,46 y un rendimiento de concentración de 0,29.
- Para la mezcla AVR/PAX los mejores resultados se obtuvieron a una concentración de 60 g/t de AVR y 40 g/t de PAX, condición a la cual se logró una recuperación de cobre de 98,24%, una ley de cobre de 7,40%, una razón de enriquecimiento de 2,25, un índice de selectividad para el cobre en función de la sílice de 13,78 y para calcopirita en función de pirita de 2,53, además de una razón de concentración de 2,29 y un rendimiento de concentración de 0,44.

A partir de lo anterior, es posible notar que el colector AVR logró índices metalúrgicos competitivos con respecto al colector convencional PAX, y a pesar de haber comprometido la recuperación, es notable la gran selectividad del AVR por la calcopirita. Adicionalmente, al analizar la mezcla de ambos colectores, se pudo superar en gran medida todos los índices obtenidos con

el colector convencional en los procesos de flotación de minerales de cobre en agua de mar y, en comparación con el AVR, se logró mejorar la recuperación comprometiendo levemente la selectividad.

- Con respecto al análisis metalúrgico de las pruebas experimentales de flotación en agua de mar en función de la concentración de espumante, bajo concentraciones fijas de colector se pudo destacar lo siguiente:
  - Empleando una concentración de 40 g/t de PAX y 20 g/t de MIBC se obtuvieron los mejores resultados metalúrgicos para este colector. Estos correspondieron a una recuperación de cobre de 97,84%, una ley de cobre de 7,23%, una razón de enriquecimiento de 2,27, un índice de selectividad para el cobre en función de la sílice de 11,99 y para calcopirita en función de pirita de 2,43, además de una razón de concentración de 2,33 y un rendimiento de concentración de 0,43.
  - Al estudiar diferentes concentraciones de espumante MIBC, en presencia de 40 g/t y 80 g/t de AVR, se logró evidenciar que a 15 g/t de MIBC se obtuvieron los mejores resultados metalúrgicos, los cuales correspondieron a los indicados en el punto previo.
  - Para la mezcla de 60 g/t de AVR y 40 g/t de PAX los mejores resultados se obtuvieron en ausencia de espumante MIBC en el proceso, alcanzando una recuperación de cobre de 98,66%, una ley de cobre de 7,58%, una razón de enriquecimiento de 2,14, un índice de selectividad para el cobre en función de la sílice de 14,65 y para calcopirita en función de pirita de 2,88, además de una razón de concentración de 4,26 y un rendimiento de concentración de 0,24.

A partir de lo anterior, es posible notar que, el colector AVR mantiene la más alta selectividad por el mineral de cobre en el proceso, manteniendo una recuperación levemente baja en comparación con el PAX. Por otro lado, la mezcla de ambos colectores en ausencia de espumante presenta un efecto

sinérgico logrando los mejores resultados en términos colectivos, mejorando la selectividad y recuperación en comparación con el colector convencional y el AVR, respectivamente.

## 6 RECOMENDACIONES

En virtud de los resultados de esta memoria, se presentan las siguientes sugerencias para posteriores estudios:

- Analizar las características físicas y químicas del AVR, de forma que se estandarice su composición y sus propiedades como colector de sulfuros de cobre.
- Evaluar el AVR como reactivo colector en una etapa *cleaner* de flotación en agua de mar debido a la alta selectividad que muestra por el mineral de cobre.
- Estudiar el mecanismo de acción del AVR como colector de sulfuros de cobre tanto con agua convencional como con agua de mar.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, F. (2018). *Estudio de la flotabilidad de enargita en agua destilada, agua de mar e iones modificando pH y potencial electroquímico*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Metalúrgico. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 60.
- Anastas, P. T., Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press. Oxford, Reino Unido. 135.
- Bauer, K., Greene, M.G., di Reber, N.R., Young, S.K., Young, T.L. (2000). *Flotation of Sulfide Minerals with Oils*. WO Patent 2000009268 A1 (dated February 24, 2000). 32.
- Benn, F.W., Dattilo, M., Cornell, W.L. (1996). *Flotation of Lead Sulfides using Rapeseed Oil*. US Patent 5544760 A (dated August 13, 1996). 4.
- Boening, D.W. (1998). *Aquatic toxicity and environmental fate of xanthates*. Minerals Engineering, 50 (9), 65–68.
- Castro, S., Laskowski, S. (2011). *Froth Flotation in Saline Water*. KONA, Vol. 29, 4–15.
- Castro, S. (2012). *Challenges in flotation of Cu-Mo Sulfide ores in seawater*. In: Drelich, J. (Ed.), *Water in Mineral Processing*. SME, Colorado, 29-40.
- Castro, S., Venegas, I., Landero, A. y Laskowski, J.S. (2010). *Frothing in sea water flotation systems*. In: Proc. 25<sup>th</sup> Int. Mineral Processing Congress, IMPC-2010, Brisbane, 4039–4047.
- COCHILCO. (2019). *Consumo de agua en la minería del cobre al 2018*. Santiago, Chile.
- COCHILCO. (2020). *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2019-2030*. Santiago, Chile.
- COCHILCO. (2017). *Sulfuros primarios: Desafíos y oportunidades*. Santiago, Chile.
- Ellis, J. (2011). *Analysis of accidents and incidents occurring during transport of packaged dangerous goods by sea*. Saf. Sci., 49, 1231–1237.

- Greene, M.G., Walton, K., Dimas, P.A., Laney, D.G., Young, S.K., Young, T.L., Reber, N. R., Reber Jr., N.R. (2012). *Collectors for Flotation of Molybdenum-containing Ores*. US Patent 2012/0145605 A1(dated June 14, 2012). 9.
- Han, M.Y., Ahn, H.J., Shin, M.S., Kim, E.R. (2004). *The effect of divalent metal ions on the zeta potential of bubbles*. *Water Sci. Technol.*, 50 (8), 49–56.
- Klimpel, R. R., and R. D. Hansen. (1987). *Frothers*. In *Reagents in mineral technology*. Marcel Dekker. New York, USA. 387–409.
- Laskowski, J. S., Castro, S., Ramos, O. (2013). *Effect of seawater main components on frothability in the flotation of Cu-Mo sulfide ore*. *Physicochemical Problems of Minerals Processing*, 50(1), 17-29.
- Leja, J. (1982). *Surface chemistry of the froth flotation*. Plenum Press. New York, USA. 758.
- Liu, W. et al. (2015). *The effects of Ca(II) and Mg(II) ions on the flotation of spodumene using NaOH*. *Minerals Engineering*, 79, 40-46.
- Martínez, F. (2018). *Efecto de la presencia de micas biotita y muscovita sobre la flotación de calcopirita en aguas con distinta salinidad*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Metalúrgico. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 86.
- Marulanda, J., Pérez, D., Remolina-Millán, A. (2017). *Resistencia a la corrosión en ambiente salino de un acero al carbono recubierto con aluminio por rociado térmico y pintura poli aspártica*. *Revista Ion, Investigación, Optimización y Nuevos procesos en Ingeniería*. 30, 21-31.
- Minería Chilena. (2012). *El combate contra la corrosión*. Santiago, Chile: Minería Chilena. Recuperado de: <https://www.mch.cl/reportajes/el-combate-contra-la-corrosion/#>.
- Moraga, C. (2018). *Apuntes del curso Flotación de minerales*. Curicó, Universidad de Talca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil de Minas.

- Morales, F. (2017). *Estudio del efecto de las interacciones del sistema 'agua de mar – cal' en procesamiento de minerales*. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención metalurgia extractiva. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 116.
- Owusu, C. (2016). *The use of canola oil as an environmentally friendly flotation collector in sulphide mineral processing*. Minerals Engineering, 98, 127–136.
- Quinteros, J. (2012). *Evaluación de la flotación en agua de mar para el mineral de Mantos Blancos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Metalúrgico. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 107.
- Reporte Minero. (2018). *Este jueves entrará en vigencia nueva normativa de Emisión para las Fundiciones de Cobre*. Santiago, Chile: Reporte Minero. Recuperado de: <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2018/12/este-jueves-entrara-en-vigencia-nueva-normativa-de-emision-para-las-fundiciones-de-cobre>.
- Rezaei, R. (2018). *Removal of the residual xanthate from flotation plant tailings using modified bentonite*. Minerals Engineering, 119, 1–10.
- Shellshear, W. (1916). *Notes on flotation of gold and copper ores, Mount Morgan, Queensland*. Australian Institute of Mining and Metallurgy Proceedings, 22, 1–75.
- Singh, K., Ihlenfeld, C., Oates, C., Plant, J., Voulvoulis, N. (2011). *Developing a screening method for the evaluation of environmental and human health risks of synthetic chemicals in the mining industry*. Int. J. Miner. Process., 101, 1–20.
- Uribe, L. (2017). *Efecto del agua de mar en la recuperación de minerales de Cobre-Molibdeno por procesos de flotación*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 151.
- Uribe, L. (2018). *Apuntes del curso Flotación de minerales*. Curicó, Universidad de Talca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil de Minas.



- Valdés, A. F., and A. B. Garcia. (2006). *On the utilization of waste vegetable oils (WVO) as agglomerants to recover coal from coal fines cleaning wastes (CFCW)*. Fuel, 85 (5), 607–614.
- Vallebuona, G., Casali, A. (2007). *Fundamentos de flotación de minerales*. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ingeniería. Recuperado de: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/1/MI52E/1/material\\_docente/](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/1/MI52E/1/material_docente/).
- Williams, C., Peng, Y., Dunne, R. (2013). *Eucalyptus oils as green collectors in gold flotation*. Minerals Engineering, 42, 62–67.
- Wills, B.A., Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Butterworth-Heinemann. Oxford, Reino Unido. 512.
- Yianatos, J. (2005). *Flotación de minerales*. Departamento de Procesos Químicos, Biotecnológicos y Ambientales. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Chile. 130.

## 8 APÉNDICE A: PLANILLAS DE DATOS DE RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO

Tabla A. 1: Análisis granulométrico final obtenido luego de molienda de 50 minutos en agua de mar.

Malla	Abertura (µm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	Retenido (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasante (%)
50	300	1.40	1.40	0.47	0.47	99.53
70	212	56.70	58.10	19.03	19.50	80.50
100	150	53.40	111.50	17.92	37.42	62.58
200	75	77.90	189.40	26.14	63.56	36.44
270	53	35.50	224.90	11.91	75.47	24.53
325	45	21.20	246.10	7.11	82.58	17.42
400	38	20.10	266.20	6.74	89.33	10.67
Fondo		31.80	298.00	10.67	100	0

Tabla A. 2: Datos obtenidos de la cinética de flotación con 60 g/t de PAX a 5 L/min en agua de mar.

Tiempo (min)	Peso (g)	Ley Cu (%)	Finos (g)	Rec. (%)	Rec. Ac. (%)	Peso Ac. (g)	Finos Ac. (g)	Ley Ac. (%)
1	62.20	6.83	4.25	31.06	31.06	62.20	4.25	6.83
2	49.80	6.01	2.99	21.88	52.94	112.00	7.24	6.46
4	81.20	5.95	4.83	35.37	88.31	193.20	12.07	6.25
8	54.10	2.14	1.16	8.48	96.79	247.30	13.23	5.35
16	23.80	0.44	0.10	0.76	97.55	271.10	13.33	4.92
20	4.50	0.42	0.02	0.14	97.69	275.60	13.35	4.84
Relave	322.20	0.10	0.32	2.31	100.00	597.80	13.67	2.29
Alimentación	597.80	2.29	13.67					

Tabla A. 3: Datos obtenidos de la cinética de flotación con 100 g/t de AVR a 5 L/min en agua de mar.

Tiempo (min)	Peso (g)	Ley Cu (%)	Finos (g)	Rec. (%)	Rec. Ac. (%)	Peso Ac. (g)	Finos Ac. (g)	Ley Ac. (%)
1	15.90	8.61	1.37	18.79	18.79	15.90	1.37	8.61
2	17.70	7.95	1.41	19.32	38.11	33.60	2.78	8.26
4	35.60	6.28	2.24	30.69	68.80	69.20	5.01	7.24
8	35.70	3.04	1.09	14.90	83.70	104.90	6.10	5.81
16	35.50	1.49	0.53	7.28	90.98	140.40	6.63	4.72
20	12.50	0.80	0.10	1.37	92.35	152.90	6.73	4.40
Relave	442.50	0.13	0.56	7.65	100.00	595.40	7.28	1.22
Alimentación	595.40	1.22	7.28					

Tabla A. 4: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Concentración PAX (g/t)	Rec. Cu A (%)	Rec. Cu B (%)	Rec. Cu media (%)	Ley Cu A (%)	Ley Cu B (%)	Ley Cu media (%)
0	56.61	60.95	58.78	5.88	7.79	6.84
20	96.75	94.07	95.41	4.56	4.26	4.41
40	96.85	96.85	96.85	6.70	6.70	6.70
60	77.15	87.48	82.32	2.83	2.86	2.85
80	63.04	49.77	56.40	2.69	2.21	2.45
100	54.33	53.78	54.05	2.44	2.14	2.29

Tabla A. 5: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Concentración PAX (g/t)	Rec. Fe A (%)	Rec. Fe B (%)	Rec. Fe media (%)	Ley Fe A (%)	Ley Fe B (%)	Ley Fe media (%)
0	29.61	33.25	31.43	23.40	27.18	25.29
20	84.55	84.31	84.43	27.29	23.87	25.58
40	90.37	90.37	90.37	26.54	26.54	26.54
60	66.52	79.90	73.21	19.15	18.61	18.88
80	60.61	47.42	54.01	17.84	13.62	15.73
100	52.66	46.37	49.51	15.22	11.38	13.30

Tabla A. 6: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Concentración PAX (g/t)	Recuperación Cpy (%)	Ley Cpy (%)	Recuperación Py (%)	Ley Py (%)
0	90.95	19.78	72.56	41.40
20	97.76	12.76	91.10	46.61
40	96.82	19.39	88.55	44.35
60	86.31	8.23	77.40	35.16
80	67.74	7.09	65.38	29.15
100	63.34	6.63	58.60	24.24

Tabla A. 7: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Concentración AVR (g/t)	Rec. Cu A (%)	Rec. Cu B (%)	Rec. Cu media (%)	Ley Cu A (%)	Ley Cu B (%)	Ley Cu media (%)
0	56.61	60.95	58.78	5.88	7.79	6.84
20	86.25	86.76	86.50	9.46	8.36	8.91
40	89.89	90.23	90.06	8.66	10.82	9.74
60	88.98	90.52	89.75	8.21	9.98	9.10
80	91.74	91.74	91.74	9.55	9.55	9.55
100	90.31	87.29	88.80	5.56	5.98	5.77

Tabla A. 8: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Concentración AVR (g/t)	Rec. Fe A (%)	Rec. Fe B (%)	Rec. Fe media (%)	Ley Fe A (%)	Ley Fe B (%)	Ley Fe media (%)
0	29.61	33.25	31.43	23.40	27.18	25.29
20	41.04	52.83	46.94	27.20	30.06	28.63
40	45.86	41.67	43.76	28.04	29.53	28.79
60	45.42	46.54	45.98	25.85	27.92	26.89
80	65.72	65.72	65.72	29.42	29.42	29.42
100	52.84	50.90	51.87	19.91	20.92	20.41

Tabla A. 9: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Concentración AVR (g/t)	Recuperación Cpy (%)	Ley Cpy (%)	Recuperación Py (%)	Ley Py (%)
0	90.95	19.78	72.56	41.40
20	97.17	25.78	78.23	44.66
40	98.19	28.20	76.98	43.42
60	97.99	26.33	77.28	40.57
80	96.47	27.65	77.97	45.14
100	96.26	16.70	73.11	32.94

Tabla A. 10: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Concentración AVR/PAX (g/t)	Rec. Cu A (%)	Rec. Cu B (%)	Rec. Cu media (%)	Ley Cu A (%)	Ley Cu B (%)	Ley Cu media (%)
100/0	90.31	87.29	88.80	5.56	5.98	5.77
80/20	97.30	96.59	96.94	5.86	5.16	5.51
60/40	98.24	98.24	98.24	7.40	7.40	7.40
40/60	98.24	98.57	98.41	4.14	4.98	4.56
20/80	98.77	98.73	98.75	4.29	3.70	4.00
0/100	54.33	53.78	54.05	2.44	2.14	2.29

Tabla A. 11: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Concentración AVR/PAX (g/t)	Rec. Fe A (%)	Rec. Fe B (%)	Rec. Fe media (%)	Ley Fe A (%)	Ley Fe B (%)	Ley Fe media (%)
100/0	52.84	50.90	51.87	19.91	20.92	20.41
80/20	88.95	87.12	88.04	29.60	27.71	28.65
60/40	91.47	91.47	91.47	29.49	29.49	29.49
40/60	91.68	93.60	92.64	22.98	26.51	24.75
20/80	93.50	93.35	93.43	23.20	22.05	22.63
0/100	52.66	46.37	49.51	15.22	11.38	13.30

Tabla A. 12: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.

Concentración AVR/PAX (g/t)	Recuperación Cpy (%)	Ley Cpy (%)	Recuperación Py (%)	Ley Py (%)
100/0	96.26	16.70	73.11	32.94
80/20	98.67	15.94	93.68	51.13
60/40	98.63	21.43	91.85	49.35
40/60	98.86	13.21	93.88	44.52
20/80	98.90	11.56	93.36	41.04
0/100	63.34	6.63	58.60	24.24

Tabla A. 13: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Rec. Cu A (%)	Rec. Cu B (%)	Rec. Cu media (%)	Ley Cu A (%)	Ley Cu B (%)	Ley Cu media (%)
0	96.67	96.57	96.62	5.82	7.66	6.74
5	85.11	96.85	96.85	5.17	5.67	5.42
10	97.13	97.76	97.44	6.82	6.01	6.42
15	96.85	96.85	96.85	6.70	6.70	6.70
20	97.85	97.82	97.84	7.46	6.99	7.23

Tabla A. 14: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Rec. Fe A (%)	Rec. Fe B (%)	Rec. Fe media (%)	Ley Fe A (%)	Ley Fe B (%)	Ley Fe media (%)
0	90.22	89.27	89.74	23.43	28.91	26.17
5	78.68	90.03	90.03	22.51	23.47	22.99
10	90.11	91.42	90.77	26.73	25.35	26.04
15	90.37	90.37	90.37	26.54	26.54	26.54
20	89.80	90.78	90.29	29.53	27.95	28.74

Tabla A. 15: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Recuperación Cpy (%)	Ley Cpy (%)	Recuperación Py (%)	Ley Py (%)
0	96.79	19.50	88.44	43.48
5	92.22	15.69	84.46	39.13
10	97.65	18.57	89.91	43.81
15	96.82	19.39	88.55	44.35
20	98.34	20.92	90.91	48.07

Tabla A. 16: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Rec. Cu A (%)	Rec. Cu B (%)	Rec. Cu media (%)	Ley Cu A (%)	Ley Cu B (%)	Ley Cu media (%)
0	82.49	91.04	86.76	9.36	10.13	9.74
5	90.50	86.72	88.61	10.21	6.46	8.33
10	84.18	90.03	87.10	9.56	6.27	7.92
15	89.89	90.23	90.06	8.66	10.82	9.74
20	86.15	83.24	84.70	9.22	9.80	9.51

Tabla A. 17: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Rec. Fe A (%)	Rec. Fe B (%)	Rec. Fe media (%)	Ley Fe A (%)	Ley Fe B (%)	Ley Fe media (%)
0	50.01	58.43	54.22	27.75	29.00	28.37
5	57.81	57.39	57.60	29.15	26.43	27.79
10	48.31	62.39	55.35	28.00	26.51	27.26
15	45.86	41.67	43.76	28.04	29.53	28.79
20	58.96	46.66	52.81	28.31	27.98	28.14

Tabla A. 18: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Recuperación Cpy (%)	Ley Cpy (%)	Recuperación Py (%)	Ley Py (%)
0	95.39	28.20	73.04	42.53
5	96.54	24.12	78.34	43.95
10	95.88	22.92	77.16	43.58
15	98.19	28.20	76.98	43.42
20	94.65	27.52	72.63	42.48

Tabla A. 19: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Rec. Cu A (%)	Rec. Cu B (%)	Rec. Cu media (%)	Ley Cu A (%)	Ley Cu B (%)	Ley Cu media (%)
0	89.51	90.94	90.22	9.46	9.02	9.24
5	91.03	90.94	90.98	9.14	9.33	9.24
10	90.65	88.57	89.61	8.97	8.90	8.94
15	91.74	91.74	91.74	9.55	9.55	9.55
20	92.32	88.47	90.39	9.14	9.25	9.20

Tabla A. 20: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Rec. Fe A (%)	Rec. Fe B (%)	Rec. Fe media (%)	Ley Fe A (%)	Ley Fe B (%)	Ley Fe media (%)
0	63.00	58.95	60.97	29.87	26.79	28.33
5	63.19	62.72	62.96	28.18	28.50	28.34
10	64.49	58.97	61.73	28.37	28.98	28.67
15	65.72	65.72	65.72	29.42	29.42	29.42
20	69.85	58.91	64.38	30.24	29.20	29.72

Tabla A. 21: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Recuperación Cpy (%)	Ley Cpy (%)	Recuperación Py (%)	Ley Py (%)
0	96.06	26.74	75.66	43.39
5	95.92	26.74	74.79	43.42
10	95.93	25.87	77.09	44.70
15	96.47	27.65	77.97	45.14
20	96.02	26.62	77.86	46.45



Tabla A. 22: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Rec. Cu A (%)	Rec. Cu B (%)	Rec. Cu media (%)	Ley Cu A (%)	Ley Cu B (%)	Ley Cu media (%)
0	98.62	98.71	98.66	7.45	7.70	7.58
5	98.66	98.68	98.67	7.11	6.99	7.05
10	98.21	98.58	98.40	7.45	7.54	7.50
15	98.24	98.24	98.24	7.40	7.40	7.40
20	98.37	98.49	98.43	7.78	6.72	7.25

Tabla A. 23: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Rec. Fe A (%)	Rec. Fe B (%)	Rec. Fe media (%)	Ley Fe A (%)	Ley Fe B (%)	Ley Fe media (%)
0	91.54	91.99	91.77	28.63	29.86	29.25
5	92.06	92.75	92.40	28.87	28.72	28.80
10	90.63	90.93	90.78	28.64	29.00	28.82
15	91.47	91.47	91.47	29.49	29.49	29.49
20	91.21	92.21	91.71	30.44	27.39	28.91

Tabla A. 24: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.

Concentración MIBC (g/t)	Recuperación Cpy (%)	Ley Cpy (%)	Recuperación Py (%)	Ley Py (%)
0	98.85	21.93	91.21	48.49
5	98.94	20.41	92.53	48.52
10	98.73	21.70	90.89	47.73
15	98.63	21.43	91.85	49.35
20	98.68	20.98	91.47	48.40