

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Andrés Ramírez Madrid
Ingeniero Supervisor
Patricio Zárate Codocedo

EVALUACIÓN TÉCNICA DE FORMULACIONES ESPUMANTES PARA OPTIMIZAR LA ESTABILIDAD DE ESPUMA EN LA FLOTACIÓN DE MINERALES CUPRÍFEROS

VICTORIA FRANCISCA CANIO ALTAMIRANO

Informe de Memoria de Título
para optar al título profesional de

Ingeniera Civil Metalúrgica

Enero 2026

A mis padres, por su apoyo incondicional,
y a mi abuelo Alfonso, mi ángel guardián.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo profundamente a mi familia, quienes fueron mi pilar fundamental para seguir adelante durante todo este proceso. En especial, a mis padres, quienes, a pesar de la distancia y de los años que me tocó vivir lejos de casa, siempre estuvieron presentes entregándome ánimo, apoyo incondicional y mucho amor. A mis hermanos, a quienes amo profundamente, a mis sobrinos, quienes son mi principal alegría y motivación. A mis tíos y abuelos, por su constante preocupación y cariño. Mención especial merece el recuerdo de mi abuelo Alfonso, a quien perdí a mitad de este camino; espero que desde el cielo me esté mirando y se sienta orgulloso de su nieta.

También quiero agradecer a mis amigas de Osorno, quienes, a pesar de no estar en la misma ciudad, siempre confiaron en mí y me brindaron palabras de aliento. A mis mejores amigos, por su amistad infinita, lealtad y apoyo constante a lo largo de todos estos años.

Agradezco igualmente a los amigos que conocí en Concepción, con quienes pude compartir momentos de desconexión y relax que fueron fundamentales para mantener el equilibrio durante la etapa universitaria. A mis amigas de otras carreras, con quienes inicié este camino y que hasta hoy siguen siendo parte importante de mi vida.

A mis amigos del Dimet, gracias por el compañerismo y apoyo a lo largo de la carrera. En especial, a mi grupo de “sims” que estuvieron presente durante todo el proceso de la memoria, muchas gracias por toda la ayuda y el apoyo emocional entregado en estos últimos meses. Asimismo, agradezco a los padres de mis amigos en Concepción, quienes me recibieron en sus hogares y me cuidaron como a una hija más.

Agradezco sinceramente a los docentes del Departamento de Metalúrgica por su constante disposición y apoyo durante toda mi formación universitaria. A mi profesor guía, el Dr. Andrés Ramírez, a quien agradezco sinceramente por su total compromiso conmigo durante el desarrollo de esta memoria, por su confianza y por motivarme constantemente a dar lo mejor de mí tanto en el ámbito académico como profesional.

A los integrantes del laboratorio de flotación del Dimet, muchas gracias por su apoyo en las pruebas realizadas y estar siempre dispuestos a enseñarme y resolver mis dudas.

Finalmente, agradezco a la empresa Clariant por confiar en mí para realizar mi memoria junto a ellos. En especial, al área de Innovación, por su constante disposición para resolver mis dudas y facilitar la información necesaria, y al área Comercial, por confiar en mí para la realización de otros trabajos complementarios paralelos a mi tesis.

Resumen

En la presente memoria se realizó la evaluación técnica de formulaciones espumantes orientadas a optimizar la estabilidad de la espuma en la flotación de un mineral sulfurado de cobre, caracterizado por una ley de 0,66% Cu y un tamaño de partícula P80 de 205 μm . Se desarrollaron cuatro mezclas: Espumante 1 (50% MIBC, 20% PPG-éter, 30% BGE), Espumante 2 (20% MIBC, 10% PPG-éter, 70% BGE), Espumante 3 (60% MIBC, 10% PPG-éter, 30% éter de glicol) y Espumante 4 (60% Éteres de glicol y 40 % alcohol ramificado). Estas formulaciones fueron comparadas con el espumante convencional MIBC mediante ensayos de tensión superficial, DFI, tamaño medio de burbuja (D32), recuperación de agua por arrastre mecánico y pruebas trifásicas de flotación.

Los ensayos de tensión superficial evidenciaron el siguiente orden de eficiencia en la reducción de la tensión: $4 < \text{MIBC} < 2 < 1 < 3$, lo que demuestra importantes diferencias en la actividad tensioactiva de las formulaciones. Sin embargo, se comprobó que una mayor reducción de la tensión superficial no implica necesariamente una mayor estabilidad de la espuma. Los resultados de DFI y r_t mostraron que los espumantes 1 y 2 presentan la mayor capacidad de generación y estabilización de espuma, el espumante 3 exhibe un comportamiento intermedio y el espumante 4 presenta el desempeño menos favorable.

El análisis del tamaño de burbuja indicó que el aumento de la concentración de espumante genera burbujas más pequeñas hasta alcanzar una zona de estabilidad, especialmente para los espumantes 1 y 2. Las pruebas de recuperación de agua confirmaron que una mayor estabilidad de espuma se asocia a un incremento del arrastre mecánico, siendo más elevado en 1 y 2, intermedio en 3 y bajo en 4 y MIBC.

Las pruebas de flotación demostraron que los espumantes 1, 2 y 3 alcanzaron recuperaciones de cobre competitivas, superiores al 80 % en sus concentraciones óptimas, aunque con una disminución de la ley debido al mayor arrastre de ganga, mientras que el espumante 4 presentó un bajo desempeño tanto en recuperación como en estabilidad. El MIBC exhibió un comportamiento más selectivo en términos de ley, pero con recuperaciones comparables a las otras formulaciones.

En forma global, se concluye que las formulaciones desarrolladas presentan ventajas parciales respecto al MIBC, especialmente en estabilidad de espuma y generación de burbujas finas, pero no logran superarlo de manera integral en todos los parámetros evaluados. No obstante, los resultados obtenidos demuestran que el diseño de espumantes mediante mezclas constituye una alternativa técnicamente viable y con alto potencial de optimización futura.

Abstract

This report presents the technical evaluation of frothing formulations aimed at optimizing foam stability in the flotation of a copper sulfide ore characterized by a grade of 0.66% Cu and a P80 particle size of 205 μm . Four mixtures were developed: Foaming Agent 1 (50% MIBC, 20% PPG ether, 30% BGE), Foaming Agent 2 (20% MIBC, 10% PPG ether, 70% BGE), Foaming Agent 3 (60% MIBC, 10% PPG ether, 30% glycol ether), and Foaming Agent 4 (60% glycol ethers and 40% branched alcohol). These formulations were compared with the conventional MIBC foaming agent using surface tension tests, DFI, average bubble size (D_{32}), water recovery by mechanical drag and three-phase flotation tests.

Surface tension tests showed the following order of efficiency in tension reduction: $4 < \text{MIBC} < 2 < 1 < 3$, demonstrating significant differences in the surfactant activity of the formulations. However, it was found that greater surface tension reduction does not necessarily imply greater foam stability. The DFI and r_t results showed that foaming agents 1 and 2 have the highest foam generation and stabilization capacity, foaming agent 3 exhibits intermediate behavior, and foaming agent 4 has the least favorable performance.

Bubble size analysis indicated that increasing the foaming agent concentration generates smaller bubbles until a stability zone is reached, especially for foaming agents 1 and 2. Water recovery tests confirmed that greater foam stability is associated with increased mechanical drag, which was higher in 1 and 2, intermediate in 3, and low in 4 and MIBC.

Flotation tests showed that foaming agents 1, 2, and 3 achieved competitive copper recoveries, exceeding 80% at their optimal concentrations, although with a decrease in grade due to higher gangue entrainment, while foaming agent 4 performed poorly in both recovery and stability. MIBC exhibited more selective behavior in terms of grade, but with recoveries comparable to the other formulations.

Overall, it is concluded that the formulations developed have partial advantages over MIBC, especially in foam stability and fine bubble generation, but do not comprehensively outperform it in all parameters evaluated. However, the results obtained demonstrate that the design of frothers using mixtures is a technically viable alternative with high potential for future optimization.

Índice

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos	2
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	3
2.1. Empresa Clariant	3
2.2. Descripción del proceso de flotación	3
2.3. Fisicoquímica de superficies	5
2.4. Arrastre mecánico.....	6
2.5. Reactivos de flotación	6
2.4.1. Colectores	7
2.4.2. Modificadores	7
2.4.3. Espumantes.....	8
2.6. Estabilidad de las espumas.....	11
2.7. Métodos de evaluación experimental para la estabilidad de la espuma	12
2.6.1. Medición de tensión superficial.....	12
2.6.2. DFI	13
2.6.3. CCC	14
2.6.4. Distribución de tamaño de burbuja	15
2.6.5. Recuperación de agua	16
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	17
3.1. Materiales	17
3.1.1. Reactivos	17
3.1.2. Medio acuoso.....	17
3.1.3. Muestra material.....	18
3.2. Descripción de equipos.....	18
3.2.1. Celda mecánica de flotación	18
3.2.2. Visor de burbujas (<i>Bubble Viewer</i>)	19
3.2.3. Cámara fotográfica de alta definición	20
3.2.4. Software de procesamiento de imágenes IMAGE-J	20
3.2.5. Tensiómetro.....	21
3.2.6. Montaje experimental para la prueba DFI.....	21
3.3. Procedimiento experimental.....	22
3.3.1. Preparación de reactivos espumantes.....	22
3.3.2. Preparación de la muestra de mineral de cobre	24
3.3.3. Medición de la tensión superficial	24

3.3.4.	DFI	25
3.3.5.	Distribución de tamaño de burbujas (<i>Bubble Viewer</i>)	26
3.3.6.	Recuperación de agua	29
3.3.7.	Flotación en sistema trifásico para la evaluación del desempeño de los espumantes 29	
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES		31
4.1.	Medición de la tensión superficial.....	31
4.2.	DFI.....	33
4.3.	Distribución de tamaño de burbujas	39
4.4.	Recuperación de agua	45
4.5.	Efecto de la R_w sobre la RCu y la ley del concentrado	48
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		51
BIBLIOGRAFÍA.....		53
ANEXOS		56

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama del proceso de flotación y esquema del agregado partícula-burbuja (Mesa, 2015).....	4
Figura 2. Adhesión del colector a la superficie del mineral (Gutiérrez, 2017).	7
Figura 3. Adhesión del espumante a la superficie de la burbuja de aire (Gutiérrez, 2017).	8
Figura 4. Etapas en la medición de la tensión superficial y diagrama de Fuerza vs Tiempo (Carrera et al., 2013).	13
Figura 5. Representación gráfica de las etapas para la determinación del DFI (Gutiérrez, 2017).	14
Figura 6. Efecto de la concentración de espumante en el D32 y la distribución de tamaño de burbujas (Ramírez, 2024).	14
Figura 7. Distribución de tamaño de burbuja en columna de flotación (Paredes, 2012).	15
Figura 8. (a) Vista completa del equipo y (b) detalles del panel de control de la celda mecánica (Álvarez et al., 2014).	18
Figura 9. Impulsores tipo A y celdas asociadas: (a) Celda de 2,7 L y (b) Celda de 5 L (Álvarez et al., 2014).....	19
Figura 10. Visor de burbuja en su estructura, junto a la celda mecánica EDEMET (Fuente: Elaboración propia).	19
Figura 11. Cámara fotográfica Nikon D-5100 (Fuente: Elaboración propia).	20
Figura 12. Ventana inicial que despliega el software Image-J (Fuente: Elaboración propia).	20
Figura 13. (a) Tensiómetro de fuerza K6 de KRUSS y (b) Anillo de platino-iridio (Fuente: Elaboración propia).	21
Figura 14. Montaje experimental para las pruebas del DFI: (a) vista frontal y (b) posterior (Fuente: Elaboración propia).	22
Figura 15. Agitador Ro-Tap con sus mallas correspondientes al ensayo (Fuente: Elaboración propia).	24
Figura 16. Desprendimiento del menisco durante la medición de la tensión superficial (Fuente: Elaboración propia).	25
Figura 17. Esquema del montaje experimental para las pruebas del DFI (Fuente: Elaboración propia).	26
Figura 18. Esquema del montaje experimental para la medición del tamaño de burbujas (Fuente: Elaboración propia).	27
Figura 19. (a) Escala de píxeles a mm para análisis de imágenes y (b) Imagen en 8-bit (Fuente: Elaboración propia).	28
Figura 20. (a) Ajuste Threshold aplicado y (b) ajuste Fill Holes aplicado (Fuente: Elaboración propia).	28
Figura 21. Tensión superficial versus concentración de espumantes a diferentes pH; (a) Espumante 1 (MIBC, PPG-éter, BGE) y (b) Espumante 2 (MIBC, PPG-éter, BGE) (Fuente: Elaboración propia).	31
Figura 22. Tensión superficial versus concentración de espumantes a diferentes pH; (a) Espumante 3 (MIBC, PPG-éter, Éter de glicol) y (b) Espumante 4 (Éteres de glicol, Alcohol ramificado) (Fuente: Elaboración propia).	32
Figura 23. Tensión superficial versus concentración del espumante MIBC a diferentes pH (Fuente: Elaboración propia).	33
Figura 24. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 1 (MIBC, PPG-éter, BGE); (a) 9.5 y (b) 11.5 (Fuente: Elaboración propia).	34
Figura 25. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 2 (MIBC, PPG-éter, BGE); (a) 9.5 y (b) 11.5 (Fuente: Elaboración propia).	34
Figura 26. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 3 (MIBC-PPG-éter, Éter de glicol); (a) 9.5 y (b) 11.5 (Fuente: Elaboración propia).	35

Figura 27. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 4 (Éteres de glicol, alcohol ramificado); (a) 9.5 y (b) 11.5 (Fuente: Elaboración propia).....	36
Figura 28. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del MIBC; (a) 9.5 y (b) 11.5 (Fuente: Elaboración propia).....	36
Figura 29. r_t vs concentración de espumantes a pH 9.5 (rojo) y 11.5 (verde); (a) Espumante 1 (MIBC, PPG-éter, BGE), (b) Espumante 2 (MIBC, PPG-éter, BGE), (c) Espumante 3 (MIBC, PPG-éter, Éter de glicol) y (d) Espumante 4 (Éteres de glicol, alcohol ramificado) (Fuente: Elaboración propia)...	37
Figura 30. r_t vs concentración de espumante (MIBC) a pH 9.5 y 11.5 (Fuente: Elaboración propia).	38
Figura 31. Distribución de tamaño de burbujas usando el Espumante 1 (MIBC, PPG-éter, BGE) a diferentes dosificaciones (Fuente: Elaboración propia).....	39
Figura 32. Distribución de tamaño de burbujas usando el Espumante 2 (MIBC, PPG-éter, BGE) a diferentes dosificaciones (Fuente: Elaboración propia).....	40
Figura 33. Distribución de tamaño de burbujas usando el Espumante 3 (MIBC, PPG-éter, Éter de glicol) a diferentes dosificaciones (Fuente: Elaboración propia).	41
Figura 34. Distribución de tamaño de burbujas usando el Espumante 4 (Éteres de glicol, alcohol ramificado) a diferentes dosificaciones (Fuente: Elaboración propia).	42
Figura 35. Distribución de tamaño de burbujas usando espumante (MIBC) a pH 9.5 (Fuente: Elaboración propia).	43
Figura 36. D32 en función de la concentración de espumante a pH 9,5 (Fuente: Elaboración propia).	45
Figura 37. Agua recuperada en función del tiempo a diferentes concentraciones utilizando (a) Espumante 1 (MIBC, PPG-éter, BGE) y (b) Espumante 2 (MIBC, PPG-éter, BGE), a pH 9.5 (Fuente: Elaboración propia).	46
Figura 38. Agua recuperada en función del tiempo a diferentes concentraciones utilizando (a) Espumante 3 (MIBC, PPG-éter, Éter de glicol) y (b) Espumante 4 (Éteres de glicol, alcohol ramificado), a pH 9.5 (Fuente: Elaboración propia).	47
Figura 39. Agua recuperada en función del tiempo a diferentes concentraciones (MIBC) para pH 9.5 (Fuente: Elaboración propia).	47
Figura 40. RCu en función de la R_w para los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC a pH de 9.5 (Fuente: Elaboración propia).	48
Figura 41. Ley de concentrado de Cu en función de la R_w para los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC a pH de 9.5 (Fuente: Elaboración propia).....	49
Figura 42. Fotos de las burbujas capturadas en el proceso de flotación con el Espumante 1 en diferentes concentraciones (Fuente: Elaboración propia).	62

Índice de Tablas

Tabla 1. Espumantes comúnmente disponibles: sus estructuras y solubilidad en agua (Xia, 2000).	11
Tabla 2. Componentes de los espumantes comerciales utilizados en la formulación de las mezclas (Clariant, 2023).	17
Tabla 3. Composición de las mezclas de espumantes (Fuente: Elaboración propia).	23
Tabla 4. Condiciones de acondicionamiento (Fuente: Elaboración propia).	27
Tabla 5. Condiciones de flotación (Fuente: Elaboración propia).	28
Tabla 6. Condiciones de acondicionamiento (Fuente: Elaboración propia).	29
Tabla 7. Condiciones de acondicionamiento y flotación (Fuente: Elaboración propia).	30
Tabla 8. Datos obtenidos del DFI para los diferentes espumantes a pH 9.5 y pH 11.5 (Fuente: Elaboración propia).	38
Tabla 9. Distribución de tamaño de burbujas (D32) para los espumantes a pH 9.5 (Fuente: Elaboración propia).	43
Tabla 10. Tensión superficial del Espumante 1, a diferentes concentraciones.	56
Tabla 11. Tensión superficial del Espumante 2, a diferentes concentraciones.	56
Tabla 12. Tensión superficial del Espumante 3, a diferentes concentraciones.	56
Tabla 13. Tensión superficial del Espumante 4, a diferentes concentraciones.	56
Tabla 14. Tensión superficial de MIBC, a diferentes concentraciones.	57
Tabla 15. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 1, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.	57
Tabla 16. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 2, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.	57
Tabla 17. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 3, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.	57
Tabla 18. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 4, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.	58
Tabla 19. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de MIBC, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.	58
Tabla 20. Tiempo de retención versus concentración del Espumante 1, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.	58
Tabla 21. Tiempo de retención versus concentración del Espumante 2, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.	58
Tabla 22. Tiempo de retención versus concentración del Espumante 3, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.	59
Tabla 23. Tiempo de retención versus concentración del Espumante 4, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.	59
Tabla 24. Tiempo de retención versus concentración de MIBC, evaluado a pH 9.5 y pH 11.5.	59
Tabla 25. Distribución de tamaño de burbuja para el Espumante 1 a pH 9.5.	59
Tabla 26. Distribución de tamaño de burbuja para el Espumante 2 a pH 9.5.	60
Tabla 27. Distribución de tamaño de burbuja para el Espumante 3 a pH 9.5.	60
Tabla 28. Distribución de tamaño de burbuja para el Espumante 4 a pH 9.5.	60
Tabla 29. Distribución de tamaño de burbuja para el MIBC a pH 9.5.	61
Tabla 30. Datos de recuperación de agua versus concentración del Espumante 1 a pH 9.5.	62
Tabla 31. Datos de recuperación de agua versus concentración del Espumante 2 a pH 9.5.	62
Tabla 32. Datos de recuperación de agua versus concentración del Espumante 3 a pH 9.5.	62
Tabla 33. Datos de recuperación de agua versus concentración del Espumante 4 a pH 9.5.	63
Tabla 34. Datos de recuperación de agua versus concentración de MIBC a pH 9.5.	63

Tabla 35. Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas y recuperaciones del Espumante 1 a pH 9.5.	63
Tabla 36. Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas y recuperaciones del Espumante 2 a pH 9.5.	64
Tabla 37. Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas y recuperaciones del Espumante 3 a pH 9.5.	64
Tabla 38. Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas y recuperaciones del Espumante 4 a pH 9.5.	64
Tabla 39. Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas y recuperaciones del MIBC a pH 9.5.	64

Nomenclatura

NaOH	:	Hidróxido de sodio
HCl	:	Ácido clorhídrico
γ	:	Tensión Superficial
D_{32}	:	Diámetro de Sauter
J_g	:	Velocidad superficial del gas
Q_g	:	Caudal de aire
pH	:	Potencial de hidrógeno
DFI	:	Índice Dinámico de Espumabilidad
CCC	:	Concentración crítica de coalescencia
MIBC	:	Metil Isobutil Carbinol
PPG-éter	:	Éter de Polipropilenglicol
BGE	:	Éter de butilglicol
Cu	:	Cobre
H ₂ O	:	Agua
CaO	:	Óxido de calcio
R_w	:	Recuperación de agua
R_{Cu}	:	Recuperación de cobre
t_r	:	Tiempo de retención
rpm	:	Revoluciones por minuto
M	:	Molaridad
mN/m	:	Milínewton por metro
Ci	:	Concentración del espumante

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La minería es una de las principales actividades productivas a nivel global. En este contexto, Chile se posiciona como el mayor productor de cobre, lo que ha impulsado la necesidad de optimizar los procesos de concentración de minerales, con el fin de maximizar la recuperación de especies valiosas y minimizar las pérdidas operacionales asociadas al proceso (Wills & Finch, 2015).

La flotación se ha consolidado como la técnica más utilizada en la industria minera, debido a su eficiencia y versatilidad en la separación de minerales, especialmente en yacimientos cupríferos. Este proceso fisicoquímico se basa en las diferencias que existen en las propiedades superficiales de las partículas minerales; de esta manera, se logra captar selectivamente las partículas de interés por medio de la hidrofobicidad (Yianatos, 2005).

Un componente crucial en este mecanismo es el uso de reactivos químicos, como lo son los espumantes, los cuales desempeñan un papel fundamental para la eficiencia del proceso. Los espumantes son compuestos tensoactivos que facilitan la formación y estabilización de la espuma, estos reactivos permiten modificar las propiedades superficiales de las burbujas con el fin de reducir la coalescencia, su función principal es generar burbujas pequeñas que proporcionen una mayor área superficial de contacto entre partícula-burbuja para asegurar la estabilidad de la espuma, lo que permite una recolección eficiente de los minerales valiosos (Melo & Laskowski, 2006).

La elección de espumantes y su comportamiento en los diferentes procesos de flotación sigue siendo un área de investigación activa, ya que su optimización no solo mejora la recuperación de minerales, sino que también puede reducir los costos operativos y minimizar el impacto en el medio ambiente.

En la actualidad, uno de los problemas más frecuentes en la flotación es el arrastre mecánico de partículas no deseadas, el cual puede aumentar el contenido de ganga en el concentrado y reducir la selectividad del proceso. Por ello, el control de la estabilidad y textura de la espuma resulta determinante para lograr una separación eficiente. En este contexto, la formulación y evaluación de nuevas mezclas de espumantes surge como una estrategia prometedora para mejorar el rendimiento metalúrgico, ya que la combinación de distintos compuestos puede potenciar propiedades complementarias, tales como la estabilidad, la persistencia de la espuma y la dispersión del aire en la celda (Cho & Laskowski, 2002).

Uno de los espumantes más utilizados en los procesos de flotación es el MIBC, debido a su desempeño equilibrado en términos de estabilidad y selectividad. Sin embargo, su uso generalizado motiva la búsqueda de alternativas o formulaciones mejoradas que permitan optimizar variables

fisicoquímicas claves del proceso, tales como la tensión superficial, el tamaño de burbuja, la estabilidad de la espuma y el arrastre mecánico (Laskowski, 2003a).

En este contexto, el estudio aborda la evaluación técnica de cuatro nuevas mezclas de espumantes, desarrolladas a partir de combinaciones de reactivos comerciales entregados por la empresa Clariant, con el objetivo de analizar su comportamiento en diferentes pruebas experimentales orientadas a determinar su estabilidad, la calidad de la espuma y su desempeño en la flotación de minerales cupríferos. Para contextualizar el desempeño de estas nuevas formulaciones, se incorpora además el uso de MIBC como espumante de referencia.

La presente memoria de título busca contribuir al conocimiento sobre el comportamiento de los espumantes en sistemas de flotación, abordando tanto aspectos fundamentales como sus aplicaciones prácticas, con el fin de optimizar la eficiencia del proceso y aportar información relevante para el desarrollo de nuevos reactivos.

1.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño de cuatro mezclas de espumantes: Espumante 1 y 2 (MIBC, PPG-éter, BGE), Espumante 3 (MIBC, PPG-éter, éter de glicol) y Espumante 4 (Éteres de glicol y alcohol ramificado), con el fin de optimizar la eficiencia en la estabilidad de la espuma y la respuesta metalúrgica en la flotación de minerales de cobre, comparándolas directamente con el MIBC como estándar de referencia industrial.

1.2. Objetivos específicos

- Analizar cómo las propiedades tensoactivas de las mezclas impactan en la tensión superficial, evaluando su relación con la estabilidad y movilidad de las burbujas en el sistema.
- Caracterizar el comportamiento espumante de las nuevas mezclas mediante la determinación del DFI y el análisis de la distribución del tamaño de burbuja, con el fin de evaluar su capacidad de generación y estabilidad en el sistema.
- Evaluar la contribución de las mezclas de espumantes a la disminución del arrastre mecánico, a través de la medición de la recuperación de agua al concentrado.
- Comparar el desempeño metalúrgico de las nuevas formulaciones frente al estándar MIBC, determinando sus capacidades para optimizar la eficiencia en la recuperación de cobre y la selectividad del concentrado bajo condiciones controladas de laboratorio.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Empresa Clariant

Clariant es una compañía multinacional de origen suizo, especializada en la fabricación de productos químicos para diversas áreas industriales. Con plantas de producción distribuidas en los cinco continentes, su sede principal se encuentra en Muttenz, Suiza. La empresa se organiza en siete áreas de negocio: aditivos, catalizadores, minerales funcionales, especialidades industriales y de consumo, servicios de petróleo y minería, *masterbatches* y pigmentos. En Chile, las operaciones de Clariant se ubican en la comuna de Maipú, Región Metropolitana; donde su planta de producción fundada en 1964 cuenta con 50 años de trayectoria. Su enfoque principal es la fabricación de productos químicos para la industria minera, donde producen reactivos para la flotación de minerales, como colectores y espumantes (Clariant, 2023).

La presente memoria de título se desarrolló inicialmente en las instalaciones del laboratorio de Clariant en el área de *Mining Solutions*, donde se llevó a cabo la formulación y preparación de las mezclas de espumantes. Esta área se especializa en desarrollar soluciones químicas orientadas a optimizar el rendimiento metalúrgico de sus clientes, ofreciendo productos diseñados a medida para abordar las necesidades específicas de cada operación minera. Se enfocan en la aplicación de minerales específicos, como cobre, zinc, níquel, oro y otros sulfuros, además de potasa, litio, fosfatos, mineral de hierro y otros minerales industriales (Clariant, 2023). Posteriormente, la etapa experimental de caracterización y evaluación de los espumantes se realizó en los laboratorios del Departamento de Metalúrgica de la Universidad de Concepción.

La compañía juega un papel crucial en la mejora de eficiencia de los procesos de concentración de minerales, donde su objetivo no solo es maximizar la recuperación de metales valiosos, sino también mejorar la sostenibilidad, contribuyendo al desarrollo de soluciones que generen un valor positivo en el medio ambiente y la industria.

2.2. Descripción del proceso de flotación

La flotación de minerales es un proceso fisicoquímico, utilizado para separar selectivamente las partículas de minerales valiosas de las partículas no deseadas, es decir, las que carecen de valor económico.

El proceso se inicia con la preparación del mineral, el cual ha sido extraído desde la mina y sometido a una etapa de molienda, destinada a reducir el tamaño de las partículas hasta obtener una granulometría adecuada. El material resultante se mezcla con agua para formar la pulpa, que luego es introducida en una celda de flotación, donde se inyecta aire para formar pequeñas burbujas

de gas las cuales ascienden a través del medio líquido y son las encargadas de recolectar las partículas valiosas. El proceso es un sistema multifásico, es decir, posee una fase líquida, una fase sólida y una fase gaseosa. La selectividad se realiza mediante la adhesión partícula-burbuja, lo cual se logra añadiendo reactivos químicos como los colectores que modifican las propiedades superficiales de los minerales (Yianatos, 2005).

Las partículas presentes en la pulpa se clasifican en dos categorías según su afinidad con el agua, por un lado, las partículas hidrofóbicas las cuales presentan una baja afinidad con el agua, por lo que tienden a repelerla y permite que las partículas de interés se adhieran fácilmente a las burbujas de aire, siendo transportadas hacia la superficie para formar el concentrado mediante una espuma estable y rica en mineral valioso. Por el contrario, las partículas hidrofílicas tienen una alta afinidad por el agua y no se adhieren a las burbujas de aire debido a su alta densidad relativa, lo que les impide flotar y se mantienen en suspensión en la pulpa, constituyendo parte de las colas, es decir, las partículas no deseadas que luego son transportadas al relave (Laskowski, 2001).

La eficiencia que tienen las burbujas para atrapar en forma selectiva las partículas de mineral y luego ascender cargadas hasta el rebalse, depende de múltiples fenómenos que ocurren en la pulpa y de las diferentes propiedades superficiales de las partículas. Mediante el uso de reactivos químicos como los espumantes, estas diferencias se acentúan y permiten la captura selectiva de las partículas de interés, ya que, los espumantes se encargan de modificar las propiedades superficiales de la burbuja y mantener estable la espuma (Yianatos, 2005). En la Figura 1 se observa el diagrama del proceso de flotación y el esquema del agregado partícula-burbuja.

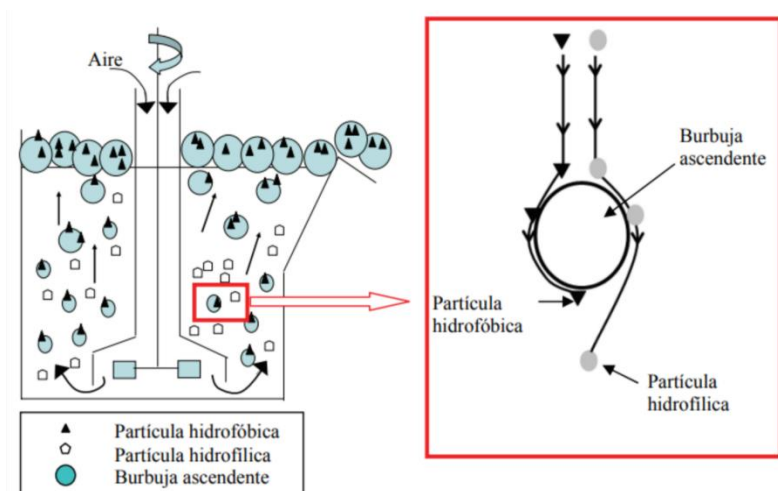


Figura 1. Diagrama del proceso de flotación y esquema del agregado partícula-burbuja (Mesa, 2015).

2.3. Fisicoquímica de superficies

El proceso de flotación depende directamente de las propiedades fisicoquímicas de las interfaces entre las fases sólida, líquida y gaseosa. Los fenómenos interfaciales determinan aspectos claves como la generación de burbujas, su estabilidad, la humectabilidad de las partículas y la eficiencia de la adhesión entre ambas fases. Por ello, resulta esencial analizar las propiedades que controlan el comportamiento interfacial del sistema (Yianatos, 2005). A continuación, se describen algunos parámetros que influyen directamente en la eficiencia del proceso.

Tensión superficial (γ)

Es una propiedad física que surge de las fuerzas de atracción entre moléculas en la superficie de un líquido. Este fenómeno depende de la naturaleza química del fluido y su interacción con el entorno, especialmente cuando están en contacto con un gas o sólido (Adamson & Gast, 1997).

Esta propiedad influye directamente en el tamaño y estabilidad de las burbujas. Una tensión superficial más baja permite formar burbujas pequeñas y estables, que presentan una mayor área de contacto para la adsorción de partículas minerales incrementando la eficiencia del proceso (Fuerstenau et al., 2007).

Diámetro de Sauter (D_{32})

Las burbujas en procesos tecnológicos presentan distribuciones de tamaño descritas comúnmente mediante histogramas, siendo D_{32} el parámetro más utilizado. Este representa el diámetro de una burbuja cuya relación volumen/superficie es idéntica a la del conjunto total del sistema (Schulze, 1984).

Un D_{32} reducido incrementa el área superficial, favoreciendo la colisión y adhesión con las partículas sólidas. Sin embargo, un tamaño excesivamente pequeño reduce la velocidad de ascenso de las burbujas, pudiendo dificultar el transporte del concentrado. Por tanto, el control de la flotación depende del equilibrio óptimo entre el tamaño de burbuja y la estabilidad de la espuma (Ahmed & Jameson, 1989).

Velocidad superficial del gas (J_g)

Se define como el caudal volumétrico de aire inyectado en la celda de flotación dividido por el área transversal de la celda. Este parámetro influye en la dispersión de burbujas en la celda y en la probabilidad de contacto con las partículas y se calcula a partir de la Ecuación 1.

$$J_g = \frac{Q_g}{A} \quad (1)$$

Donde Q_g es el caudal de aire (m^3/s) y A el área transversal de la celda (m^2). Un valor moderado de J_g favorece la generación de burbujas estables y aumentan la eficiencia de captura, mientras que valores excesivos provocan turbulencia, desprendimiento de partículas y coalescencia de burbujas (Yianatos et al., 2010).

2.4. Arrastre mecánico

El arrastre mecánico se produce durante el proceso de flotación de minerales, es un fenómeno donde ocurre un transporte involuntario de partículas sólidas desde la zona de colección hacia la fase de espuma, estas partículas quedan atrapadas en los espacios vacíos de la espuma debido al movimiento ascendente del aire inyectado. Las partículas que son transportadas no son necesariamente de carácter hidrofóbico, lo que afecta negativamente en la eficiencia del proceso (Finch & Dobby, 1990).

Las causas principales de este fenómeno tienen que ver por una parte con la densidad de las partículas, ya que, al ser estas más finas o livianas provocan una mayor probabilidad de ser arrastradas mecánicamente, por otro lado, si la viscosidad de la pulpa aumenta se facilita el arrastre de partículas, al igual que la velocidad de burbujeo, si es mayor ocasiona un incremento en el arrastre mecánico, debido a que produce burbujas más abundantes e inestables. Por último, si la altura del colchón de espuma es muy alta, aumenta la probabilidad de transporte de partículas no deseadas hacia el concentrado (Laskowski, 2001).

Los impactos que conlleva el arrastre mecánico en el proceso de flotación están directamente relacionados con el aumento de impurezas en el concentrado, ya que, existe una disminución en la ley del concentrado a causa del arrastre de partículas de ganga, lo que ocasiona una disminución en la selectividad del proceso.

Existen varios factores de control para disminuir el arrastre mecánico, entre ellos, el control del flujo de aire para reducir la velocidad de gas, ajustar la altura del colchón de espuma para mejorar la selectividad y el uso de reactivos químicos como los espumantes que generan burbujas más controladas y estables en el proceso de flotación (Yianatos, 2005).

2.5. Reactivos de flotación

El proceso de flotación requiere el uso de reactivos químicos específicos, diseñados para modificar e intensificar las propiedades superficiales de las partículas minerales y las burbujas. El objetivo principal de estas adiciones es regular la hidrofobicidad de las especies de interés y garantizar la estabilidad del sistema, optimizando así la recuperación y la selectividad de la separación. Estos reactivos se dividen en tres categorías: colectores, modificadores y espumantes.

2.4.1. Colectores

Los colectores son sustancias orgánicas que se utilizan para inducir hidrofobicidad a las partículas valiosas. Su estructura molecular se conforma por una parte polar y otra no polar. El extremo polar del ion se adsorbe sobre la superficie de la partícula de interés, cubriendo sitios activos que interactúan con el agua. Por otro lado, el extremo apolar, está constituido por una cadena de hidrocarburos, la cual queda orientada hacia la fase acuosa, generando un recubrimiento hidrofóbico, dando el carácter hidrófobo al mineral (Yianatos, 2005). Esta capa hidrofóbica repele el agua ayudando a que las partículas se adhieran a las burbujas de gas y asciendan a la superficie, produciendo el concentrado. Además, cuanto más larga sea la cadena de hidrocarburo, mayor será la potencia del colector (Fuerstenau & Miller, 1967).

Estos reactivos se clasifican en dos categorías, ionizables y no ionizables. Los ionizables se dividen en colectores catiónicos y aniónicos, siendo estos últimos los más utilizados en la flotación (Fuerstenau & Han, 2003). En la Figura 2 se observa la adhesión del colector a la superficie del mineral.

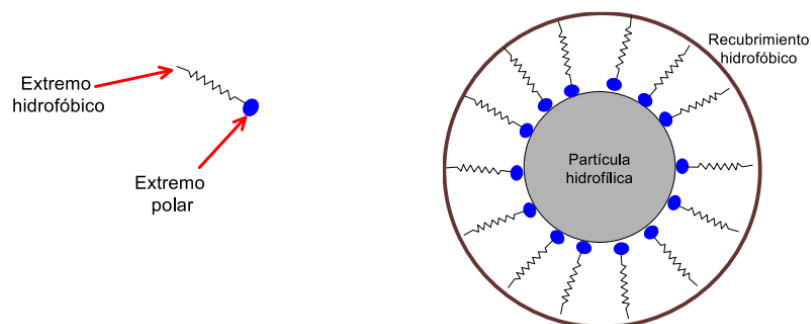


Figura 2. Adhesión del colector a la superficie del mineral (Gutiérrez, 2017).

2.4.2. Modificadores

Los modificadores son compuestos orgánicos o inorgánicos que actúan sobre las propiedades superficiales del mineral, modificando las condiciones fisicoquímicas del sistema y así aumentar la eficiencia del proceso de flotación. Se divide en cuatro categorías:

- **Reguladores de pH:** Los cuales regulan la composición iónica de la pulpa mediante el cambio de concentración del ion hidrógeno en la solución. Esto ayuda a mejorar la interacción del colector con las partículas del mineral de interés (Bulatovic, 2007).
- **Dispersantes:** Evitan la formación de agregados de partículas, asegurando su separación en la pulpa y mejorando la selectividad al mantener las partículas en suspensión (Wills & Finch, 2015).

- **Depresantes:** Son aquellos que inducen hidrofiliidad en las partículas hidrofóbicas, inhibiendo la adsorción del colector en la superficie de minerales no valiosos, por lo que reducen la flotabilidad de los minerales que no se requieren (Wills & Finch, 2015).
- **Activadores:** Facilitan y mejoran la adsorción de colectores en los minerales de interés, ya que intensifican la acción del colector sobre la superficie de los minerales, favoreciendo la formación de la película polar-no polar necesaria para la flotación. Pueden también dar flotabilidad a los minerales que previamente fueron deprimidos (Wills & Finch, 2015).

2.4.3. Espumantes

Los espumantes son compuestos tensoactivos heteropolares que están constituidos por un extremo polar que se orienta hacia la fase acuosa y un extremo radical hidrocarbonado que se orienta hacia la fase gas, capaz de adsorberse en la interfaz agua-burbuja. A diferencia de los colectores, el grupo polar de los espumantes tiene afinidad con el agua (OH^-) (Bulatovic, 2007).

Una de sus funciones es estabilizar las burbujas generadas en la pulpa, permitiendo que los minerales hidrofóbicos se adhieran a ellas y formen una espuma estable en la superficie, facilitando así su recuperación (Laskowski, 2007b). En la Figura 3 se observa la adhesión del espumante a la superficie de la burbuja.

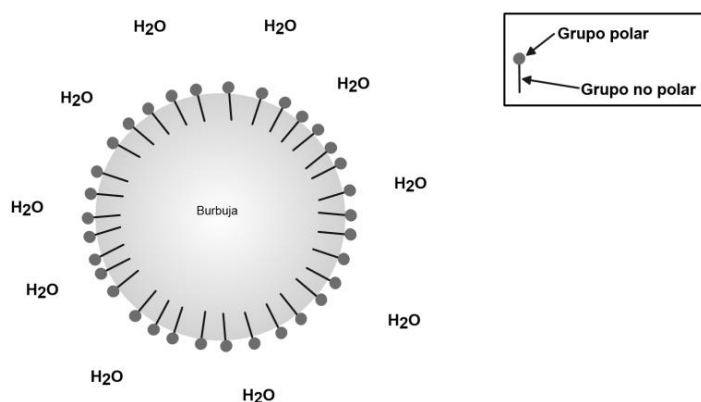


Figura 3. Adhesión del espumante a la superficie de la burbuja de aire (Gutiérrez, 2017).

Estos reactivos permiten modificar las propiedades superficiales de la burbuja con el fin de reducir la coalescencia, fenómeno donde dos o más burbujas se fusionan formando una burbuja más grande, lo que genera una menor área superficial por volumen, reduciendo la eficiencia del proceso. Para evitarlo, los espumantes cumplen la función de generar burbujas más pequeñas, para lograr incrementar el área superficial de contacto entre la burbuja y la partícula mineral (Melo & Laskowski, 2006).

Por otro lado, los espumantes disminuyen la tensión superficial del agua, lo que ayuda a mantener la estabilidad del colchón de espuma que se forma en la superficie, permitiendo que las partículas adheridas a las burbujas sean removidas antes que estas colapsen. Por consiguiente, se reduce el tiempo de inducción, es decir, el tiempo mínimo necesario para romper el film líquido existente entre la partícula-burbuja y que se puedan adherir de manera estable (Allendes, 2009). En cuanto a su clasificación, los espumantes pueden ser categorizados, de manera general, según cuatro criterios principales: su sensibilidad al pH, su solubilidad, su capacidad de espumación y la relación entre su selectividad y su poder de espumante (Khoshdast & Sam, 2011). Además, existen diversas técnicas para caracterizar los espumantes, entre ellas se encuentran: Mediciones de distribución de tamaño de burbuja, índice dinámico de espumabilidad (DFI), mediciones de tensión superficial, concentración crítica de coalescencia, entre otras.

Existen tres tipos principales de espumantes: los alcoholes, las alcoxiparafinas, los cuales no tienen mucha aplicación industrial y los éteres de poliglicol (Laskowski, 1998a).

Alcoholes

Los espumantes de tipo alcohol (R-OH) se caracterizan por su alta eficiencia, cinética rápida y selectividad hacia partículas de tamaño fino y medio. Operacionalmente, requieren dosis moderadas y son sensibles a las variaciones de pH, mostrando un mejor desempeño en rangos bajos a neutros. Desde un punto de vista físico, generan espumas de baja persistencia y naturaleza quebradiza, lo cual facilita el drenaje de la ganga y reduce el arrastre mecánico (Klimpel, 1995). La clasificación de estos reactivos se divide en tres categorías fundamentales, cuyos ejemplos y configuraciones estructurales se resumen en la Tabla 1.

- **Alcoholes alifáticos:** Son compuestos lineales o ramificados que contienen cadenas de carbono no aromáticas. Producen espumas más selectivas y de textura fina que son relativamente frágiles y, por tanto, no muy persistentes (Crozier, 1978). Los alcoholes alifáticos más comunes que se utilizan en la industria son el MIBC y el 2-etilhexanol (Xia, 2000).
- **Alcoholes cíclicos:** Son compuestos que contienen estructuras de anillos de carbono, lo que les confiere mayor estabilidad térmica. Producen espumas más densas y resistentes, son muy útiles cuando existen condiciones difíciles o cuando se requiere una espuma más estable (Wills & Finch, 2015).
- **Alcoholes aromáticos:** Son compuestos que contienen anillos aromáticos en su estructura molecular, lo que influye en sus propiedades superficiales. Estos espumantes proporcionan

una mayor estabilidad de espuma pero son menos selectivos. Además, su producción y uso tienden a ser más costosos en comparación con otros tipos de espumantes (Crozier, 1992).

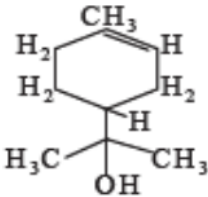
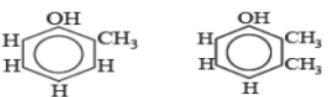
Éteres de poliglicol

Los espumantes del tipo éteres de poliglicol son compuestos generalmente no iónicos y que derivan de cadenas de polietilenglicol o polipropilenglicol que han sido modificadas mediante la introducción de grupos éter en sus extremos o a lo largo de la cadena, con el fin de ajustar su balance hidrofílico – lipofílico y su comportamiento en la interfase líquido-gas. Esta modificación estructural mejora su capacidad para reducir la tensión superficial del agua y estabilizar las burbujas de aire (Crozier, 1992). Además, están diseñados para producir espuma fina y persistente, con burbujas pequeñas que tienen mayor área superficial, lo cual favorece la adhesión de partículas minerales valiosas en la flotación (Castro, 2003). Estas características hacen que sean los preferidos en circuitos donde la estabilidad de la espuma y el control del tamaño de burbuja sean críticos. Dentro de los éteres de poliglicol se diferencian distintos subtipos, cuya clasificación, ejemplos representativos y estructura química general se presentan en la Tabla 1.

- **PPG-éter:** Constituyen uno de los grupos más versátiles de espumantes sintéticos y representan la segunda clase más importante a nivel comercial. Se caracterizan por generar espumas compactas, bien estructuradas y selectivas, asociadas a una menor solubilidad en agua (Xia, 2000). Estas propiedades favorecen la formación de espumas más secas, con burbujas de mayor tamaño y alto drenaje, lo que contribuye a reducir el arrastre mecánico y mejorar la selectividad del concentrado. Además, su persistencia puede ser controlada mediante la dosificación, permitiendo un adecuado manejo del nivel de espuma y del flujo del concentrado (Fuerstenau et al., 2007; Yianatos, 2005).
- **Éteres de glicol:** Corresponden a compuestos orgánicos formados por la unión de un alcohol con un grupo éter (-O-R). Esta estructura les confiere propiedades intermedias entre los alcoholes y los éteres, otorgándoles una buena capacidad para reducir la tensión superficial y generar espumas finas y estables. Se caracterizan por producir espumas más persistentes y homogéneas, favoreciendo la estabilidad del sistema líquido-gaseoso y, por ende, el transporte de partículas hidrofóbicas hacia la superficie (Szyszka, 2019).
- **BGE:** Derivan del etilenglicol y poseen una cadena butílica que aumenta su carácter hidrofóbico. Gracias a esta estructura, presentan una menor solubilidad en agua y una moderada capacidad espumante, lo que les permite generar espumas compactas y con buen drenaje. Este tipo de espumantes contribuye a mejorar el control de la estabilidad de la espuma y reducir el arrastre mecánico excesivo, manteniendo un equilibrio entre estabilidad y selectividad (Szyszka, 2019).

Los espumantes industriales más utilizados suelen ser los alcoholes de cadena corta o ramificados y los éteres de polipropilenglicol (Xia, 2000). Los de tipo éter de poliglicol son más eficientes para mejorar la recuperación de partículas gruesas, mientras que los de tipo alcohol pueden ser más efectivos con partículas finas (Klimpel & Hansen, 1991). En la Tabla 1 se observa los distintos tipos de espumantes con sus variaciones de estructura molecular y solubilidad.

Tabla 1. Espumantes comúnmente disponibles: sus estructuras y solubilidad en agua (Xia, 2000).

Espumante	Fórmula/Estructura	Solubilidad en agua
Alcoholes alifáticos MIBC (4-Metil-2-pentanol) 2-Etil hexanol	$R-OH$ $-R = C_nH_{2n+1}$ $\begin{array}{c} CH_3CHCH_2CHCH_3 \\ \quad \\ CH_3 \quad OH \end{array}$ $\begin{array}{c} CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_2OH \\ \\ CH_2CH_3 \end{array}$	Baja
Alcoholes cíclicos α -Terpinol ($C_{10}H_{17}OH$)		Baja
Alcoholes Aromáticos Ácido Crecílico (mezcla de cresoles y xilenoles)	 o-Cresol 2,3-Xylenol	Baja
Poliglicoles Dowfroth 250 Dowfroth 400 Dowfroth 1020	$R-(OC_3yO_6)_n-OH$ $n = 3-7$ $R-(OC_2yO_4)_n-OH$ $n = 3-7$	Total

2.6. Estabilidad de las espumas

La estabilidad de las espumas en el proceso de flotación es un factor determinante para asegurar una concentración eficiente de los minerales. Esta depende principalmente de las propiedades del espumante utilizado y de las condiciones operativas del sistema (Laskowski,

1998b). Una espuma estable es esencial para permitir que las partículas hidrofóbicas se mantengan adheridas a las burbujas hasta que asciendan a la superficie, sin embargo, una estabilidad excesiva puede dificultar la remoción de la espuma, de forma opuesta, una espuma inestable puede provocar la pérdida de minerales valiosos debido al colapso precipitado de las burbujas (Cho & Laskowski, 2002). La capacidad de un espumante para estabilizar la espuma está relacionada con su habilidad de reducir la tensión superficial y modificar la viscosidad de la película líquida que se encuentra alrededor de las burbujas, lo que ayuda a prevenir su coalescencia y mantener una estructura estable en la espuma. Además, factores como el tamaño de burbuja y la concentración del espumante influyen significativamente en este comportamiento (Wills & Finch, 2015).

Otra característica crucial en el proceso de flotación es la persistencia de la espuma, la cual afecta directamente la eficiencia de separación de minerales. Se define como la capacidad de la espuma para mantener su estructura en la superficie de la celda durante un tiempo determinado. Una persistencia adecuada favorece la recuperación del mineral, mientras que una excesiva puede incrementar la retención de material no deseado. En este contexto, los espumantes más solubles tienden a generar espumas menos persistentes y más móviles, mientras que aquellos de menor solubilidad y cadenas más largas se adsorben con mayor facilidad en la interfase líquido-gas, formando espumas más estables y persistentes (Laskowski, 2004).

2.7. Métodos de evaluación experimental para la estabilidad de la espuma

Existen varios métodos experimentales para evaluar la estabilidad de la espuma, los cuales nos permiten identificar el balance ideal entre la selectividad y la estabilidad adecuada, garantizando un proceso de flotación más eficiente (Wills & Finch, 2015).

2.6.1. Medición de tensión superficial

La tensión superficial es fundamental para entender el comportamiento de los espumantes, pues permite predecir como un espumante puede afectar el tamaño de burbuja y la estabilidad de la espuma.

- **Método del anillo de Du Noüy:** Permite determinar la tensión superficial mediante la medición de la fuerza necesaria para desprender un anillo de platino-iridio de la superficie de un líquido (Carrera et al., 2013). Como se ilustra en la Figura 4, el procedimiento consiste en elevar lentamente el anillo previamente sumergido, lo que estira la película líquida y genera un incremento gradual de la fuerza registrado en el diagrama de Fuerza vs. Tiempo. El punto de inflexión en dicha gráfica representa la fuerza máxima de tracción justo antes de la ruptura del menisco, valor que define la tensión superficial aparente. Finalmente, una caída abrupta

de la carga indica el desprendimiento total del anillo de la fase líquida. La precisión de este análisis, realizado mediante un tensiómetro de torsión, depende de que el instrumental esté estrictamente libre de residuos que puedan alterar la fuerza registrada (Carrera et al., 2013).

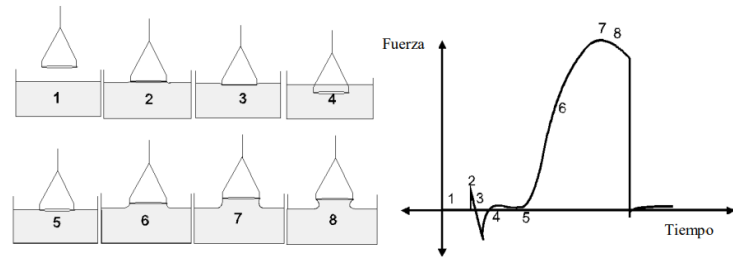


Figura 4. Etapas en la medición de la tensión superficial y diagrama de Fuerza vs Tiempo (Carrera et al., 2013).

2.6.2. DFI

Es un método que permite evaluar la capacidad de un espumante para generar espuma bajo condiciones dinámicas. La prueba consiste en inyectar gas a través de una columna o celda de flotación que contenga la solución con el espumante a evaluar (Laskowski, 1998a). Luego se calculan los tiempos de retención (rt) para cada concentración del espumante con la Ecuación 2:

$$rt = \frac{\Delta V}{\Delta F} \quad (2)$$

Donde rt es el tiempo de vida promedio de una burbuja en el sistema total (Malysa et al., 1987), ΔV es el cambio en el volumen de la espuma y ΔF es el cambio en el flujo de gas. Luego, para comparar las capacidades de dos espumantes se calcula el DFI utilizando la Ecuación 3, que relaciona la altura máxima de la espuma y el tiempo que tarda en formarse.

$$DFI = \left(\frac{\partial rt}{\partial c} \right)_{c \rightarrow 0} \quad (3)$$

Un valor elevado de DFI indica una mayor capacidad del espumante para generar espuma estable, mientras que un mayor tiempo de retención refleja una mayor estabilidad (Laskowski, 2003). Este comportamiento se asocia a la acción de los tensioactivos, que reducen la tensión superficial y estabilizan las burbujas. La estructura molecular del espumante condiciona su adsorción en la interfase líquido-gas, el drenaje de la espuma y la coalescencia de burbujas, lo que justifica el uso del DFI como criterio comparativo (Malysa et al., 1987). En la Figura 5 se presentan las etapas para la determinación del DFI. El Gráfico 1 ilustra la relación lineal entre el volumen de gas y el flujo de inyección, donde la pendiente de cada recta define el tiempo de retención (rt), mientras que el gráfico 2 muestra cómo (rt) evoluciona al aumentar la concentración del espumante y se define matemáticamente el DFI como la pendiente inicial de la curva cuando la concentración tiende a cero.

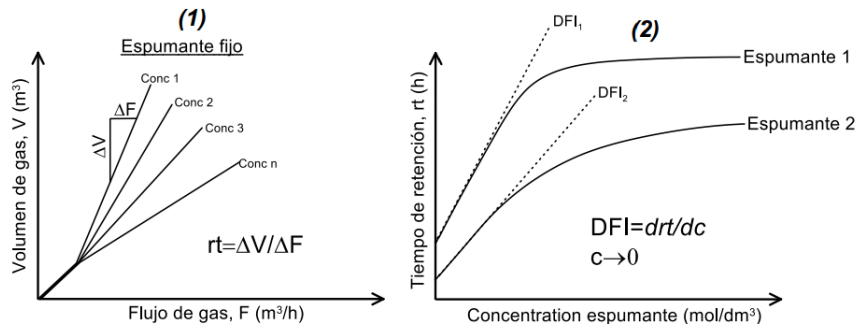


Figura 5. Representación gráfica de las etapas para la determinación del DFI (Gutiérrez, 2017).

2.6.3. CCC

Representa el umbral de saturación funcional de la interfase aire-agua. Físicamente, este valor indica la concentración mínima de reactivo necesaria para que las moléculas de espumante formen una capa protectora alrededor de las burbujas, creando una presión de desunión que impide que estas se fusionen al chocar entre sí. Como ilustra la Figura 6, este fenómeno se caracteriza por una curva descendente del tamaño de burbuja D_{32} frente a la concentración. En el tramo inicial, pequeñas dosis reducen drásticamente el diámetro, mientras que al alcanzar el "codo" de la curva o punto CCC, el sistema llega a una meseta de estabilización. Este comportamiento indica que el sistema ha alcanzado su máxima eficiencia técnica en la dispersión de gas, donde incrementos adicionales de reactivo no alteran significativamente el tamaño de la burbuja (Melo & Laskowski, 2006).

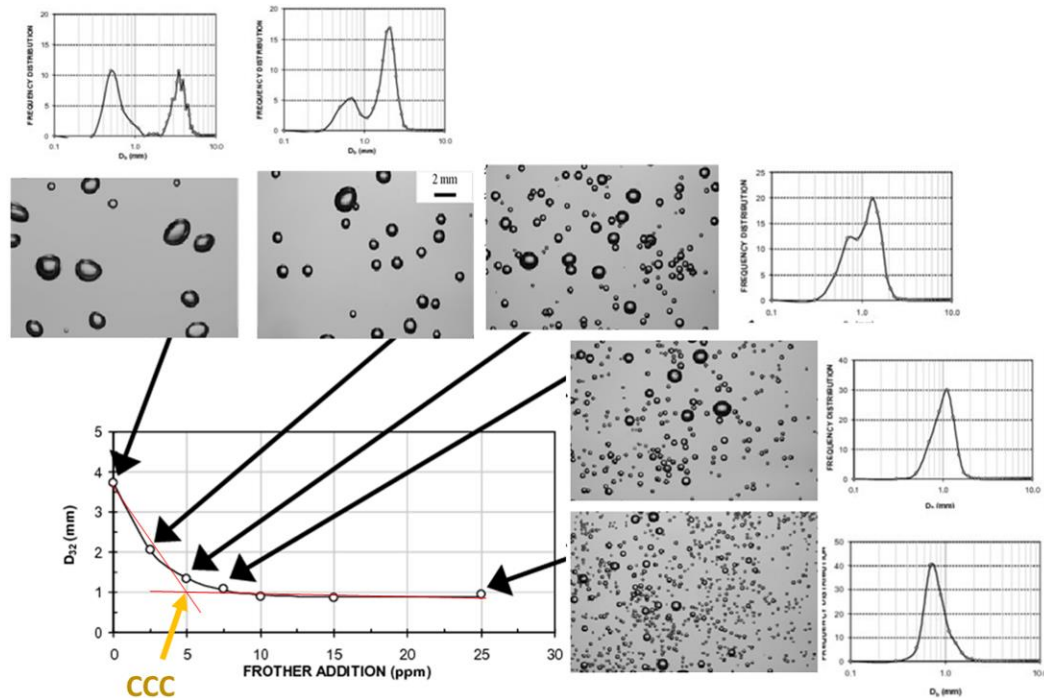


Figura 6. Efecto de la concentración de espumante en el D_{32} y la distribución de tamaño de burbujas (Ramírez, 2024).

2.6.4. Distribución de tamaño de burbuja

La distribución de tamaño de burbujas es un factor clave para evaluar la estabilidad de la espuma en procesos de flotación, ya que, nos permite evaluar la capacidad del espumante para generar burbujas pequeñas, lo que aumenta la eficiencia y la probabilidad que las partículas valiosas se adhieran a las burbujas (Cho & Laskowski, 2002). Las burbujas muy pequeñas (0,2–0,4 mm) presentan baja velocidad de ascenso, lo que puede provocar pérdidas de partículas hidrófobas hacia el relave (Yianatos, 2005). En contraste, burbujas demasiado grandes (>2,5 mm) disminuyen la capacidad de transporte y la estabilidad de la espuma. Por lo tanto, existe un diámetro óptimo de burbuja para una distribución de partículas dada (Yianatos, 2005).

En celdas y columnas de flotación, el tamaño y su distribución dependen principalmente del tipo de generador de burbujas, el flujo de aire y la adición de espumante (Lisperguier & Yianatos, 1998). Los valores típicos se encuentran entre 0,5–2,5 mm en celdas mecánicas y 0,5–2,0 mm en columnas industriales (Yianatos & Puelle, 1994). En la Figura 7 se observa el gráfico de distribución de tamaño de burbuja en una columna de flotación.

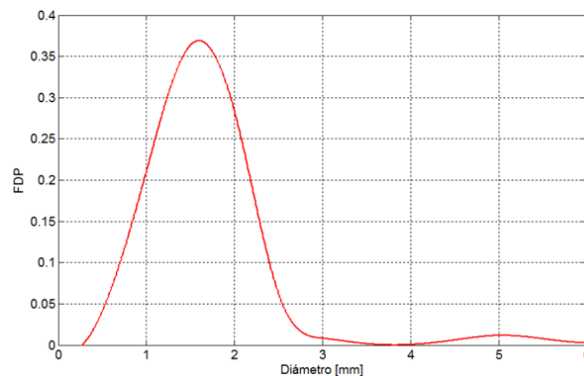


Figura 7. Distribución de tamaño de burbuja en columna de flotación (Paredes, 2012).

- **Medición del tamaño de burbujas:** Se determina mediante técnicas de captura de imágenes o análisis en línea, utilizando cámaras especializadas. Las imágenes obtenidas permiten analizar el diámetro y la distribución de las burbujas en diferentes puntos del sistema. Para ello, se generan burbujas mediante la inyección de aire en la celda de flotación, la cual contiene la solución con el espumante que se quiere evaluar (Mazahernasab et al., 2020).
- **Cálculo de la distribución de tamaño:** El parámetro más común para representar el tamaño de burbujas es el diámetro de Sauter o D_{32} , el cual se calcula mediante la Ecuación 4:

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (4)$$

Un menor tamaño promedio de burbujas suele asociarse con una espuma más estable, debido a que las burbujas pequeñas aumentan el área de contacto entre partícula-burbuja (Yoon & Wang, 2001).

El diámetro medio de Sauter D32 es el más representativo para caracterizar el tamaño de burbujas en procesos de flotación, ya que pondera el volumen de cada burbuja, reflejando su contribución al área de contacto partícula-burbuja. Este diámetro es especialmente útil en técnicas como la difracción laser y el análisis de imágenes, que se basan en distribuciones ponderadas por volumen o área (Zhang et al., 2014).

En contraste, el D10 representa el diámetro por debajo del cual se encuentra el 10% de las partículas, mientras que el D50 es el valor mediano, donde el 50% de las partículas son menores y el 50% son mayores. Estos valores no consideran la influencia del volumen o la superficie, lo que los hace menos adecuado para describir la interacción partícula-burbuja en flotación (Zhang et al., 2014). Por otro lado, el D43 pondera en mayor medida a las burbujas grandes, lo cual podría no ser ideal para describir el comportamiento global del sistema de flotación. Esto se debe a que las burbujas de mayor tamaño tienen una menor superficie específica y pueden afectar la estabilidad de la espuma (Vallebuona et al., 2008).

2.6.5. Recuperación de agua

Una forma de estimar el arrastre mecánico es a través de las pruebas de recuperación de agua, donde se utiliza un sistema bifásico (líquido-gas). Este método permite comparar el efecto de los espumantes sobre el arrastre no selectivo de sólidos en la espuma. En general, cuanto mayor es la recuperación de agua, mayor es el grado de arrastre, por otro lado, un espumante que genera una espuma muy estable o de gran volumen puede incrementar el arrastre de mineral no valioso, afectando negativamente la ley del concentrado obtenido (Dai et al., 1999). Estas pruebas son útiles porque permiten cuantificar indirectamente la proporción de agua que asciende junto con las burbujas y, con ella, las partículas finas que se incorporan de manera no selectiva al concentrado. De esta forma, la recuperación de agua se utiliza como un parámetro comparativo entre distintos espumantes, proporcionando información clave sobre la estabilidad y selectividad de la espuma durante la flotación.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Materiales

3.1.1. Reactivos

- **Espumantes comerciales:** Muestras de espumantes individuales proporcionados por la empresa Clariant (Tabla 2), las cuales fueron utilizadas para la preparación de diferentes mezclas, diseñadas con el propósito de mejorar el desempeño del proceso de flotación.

Tabla 2. Componentes de los espumantes comerciales utilizados en la formulación de las mezclas (Clariant, 2023).

Proveedor	Espumante
Clariant	Flotanol M (MIBC)
	PPG-éter
	BGE
	Éter de glicol
	Éteres de alcohol/glicol
	Alcohol ramificado

- **Espumante Pro - análisis:** Se utilizó Metil Isobutil Carbinol (MIBC) con una densidad relativa de 0.81 g/cm³ a 25°C. El MIBC corresponde a un espumante para análisis de alta pureza, empleado como referencia para evaluar y comparar su eficiencia frente a cuatro mezclas de espumantes formuladas para estudio.
- **Colector:** Se empleó Xantato como reactivo colector en las pruebas de flotación (sistema trifásico), dosificado a una concentración de 30 g/t.
- **Reguladores de pH:** Para el control del pH en los sistemas trifásicos se utilizó hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), mientras que en los sistemas bifásicos se emplearon hidróxido de sodio ($NaOH$) y ácido clorhídrico (HCl).

3.1.2. Medio acuoso

Para todas las pruebas de laboratorio se utilizó agua de red proveniente del suministro potable de la red pública local de Concepción. Por lo tanto, esta decisión implica que el sistema pudo estar sujeto a variaciones en la composición del agua, como la presencia de sales disueltas o impurezas, las cuales no están controladas y es posible que existan posibles alteraciones en los resultados.

3.1.3. Muestra material

Las muestras de mineral cuprífero utilizadas en esta investigación fueron adquiridas a través del Departamento de Metalúrgica de la Universidad de Concepción, provenientes de una faena minera de la zona norte de Chile. El material corresponde a un mineral de tipo sulfuro primario, con una ley de alimentación de 0.66% Cu y presenta una granulometría característica con un P80 de 205 μm . Desde el punto de vista químico y mineralógico, el mineral presenta contenidos de 5.53% de Fe y 0.75% de S, lo que sugiere la presencia de sulfuros de hierro asociados. El análisis de mineralogía modal identificó a la calcopirita como la principal especie portadora de cobre, representando el 1.19% de la masa total y el 72.29% del cobre presente. En menor proporción se identificaron sulfuros secundarios, principalmente calcocita y covellita, además de bornita.

3.2. Descripción de equipos

3.2.1. Celda mecánica de flotación

Las pruebas se realizaron en una celda mecánica de flotación (EDEMET). El equipo permite el control de variables operacionales como la velocidad del impulsor, el flujo de aire y el tiempo de operación, las cuales pueden ser ajustadas y registradas durante el ensayo. Estas variables controladas permiten reproducir condiciones comparables entre pruebas y evaluar el efecto de los reactivos bajo diferentes escenarios experimentales. El sistema está compuesto por una celda acrílica equipada con un impulsor, cuya función es mantener la pulpa en suspensión y facilitar la incorporación de aire durante el proceso de flotación. La adición de reactivos se realiza durante la etapa de acondicionamiento, incorporándolos directamente a la solución. En la Figura 8 se ilustra la celda mecánica y su panel de control.

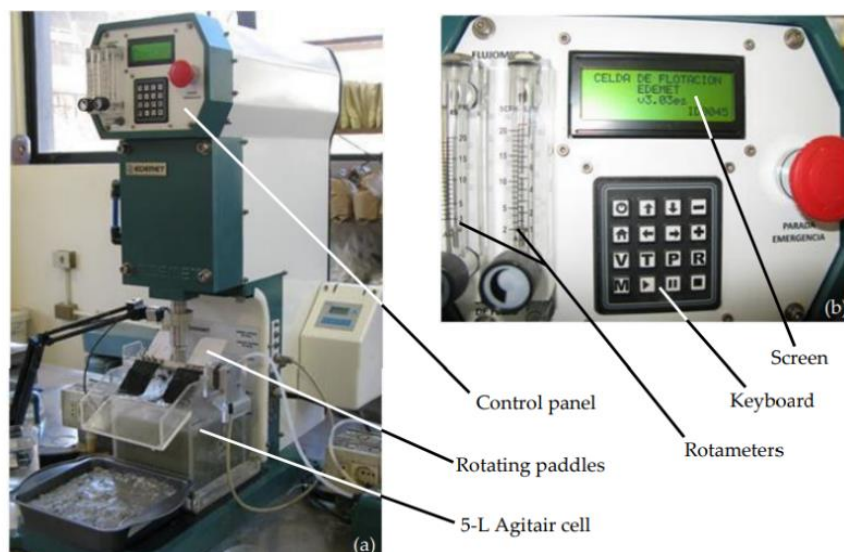


Figura 8. (a) Vista completa del equipo y (b) detalles del panel de control de la celda mecánica (Álvarez et al., 2014).

Como se observa en la Figura 9 las celdas acrílicas utilizadas en las pruebas fueron de 5 y 2.7 litros, con sus respectivos impulsores.

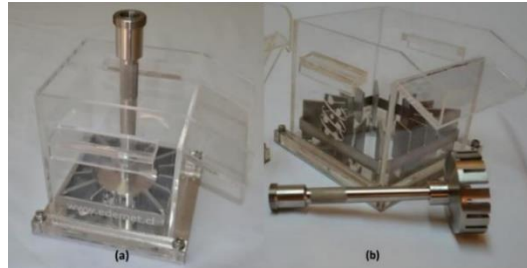


Figura 9. Impulsores tipo A y celdas asociadas: (a) Celda de 2,7 L y (b) Celda de 5 L (Álvarez et al., 2014).

3.2.2. Visor de burbujas (*Bubble Viewer*)

El visor de burbujas (*Bubble Viewer*) se integra a la celda mecánica mediante un tubo muestreador de PVC, posicionado bajo la interfase pulpa-espuma para captar burbujas representativas del proceso (Figura 10). Este conducto transporta las burbujas hacia un visor de vidrio transparente, el cual presenta una inclinación de 15° y un sistema de iluminación LED posterior para optimizar el contraste. Dicha geometría permite que las burbujas asciendan alineadas a la superficie del vidrio, minimizando errores de medición por superposición o formación de conglomerados. El ascenso se produce por el diferencial de presión hacia la superficie inclinada, donde se realiza la captura digital de las imágenes. El protocolo operacional exige que el visor esté saturado con el mismo medio acuoso de la celda antes de abrir la válvula de muestreo; esta condición asegura la homogeneidad del entorno químico y previene la coalescencia prematura de las burbujas (Gomez & Finch, 2002).



Figura 10. Visor de burbuja en su estructura, junto a la celda mecánica EDEMET (Fuente: Elaboración propia).

3.2.3. Cámara fotográfica de alta definición

Para las pruebas con el *Bubble Viewer* se utilizó una cámara Nikon D-5100 con un objetivo de 60 mm de distancia focal. En la Figura 11 se observa la cámara en el soporte de la estructura.



Figura 11. Cámara fotográfica Nikon D-5100 (Fuente: Elaboración propia).

3.2.4. Software de procesamiento de imágenes IMAGE-J

Para el análisis de las imágenes se utilizó el software Image-J, el cual permite identificar, cuantificar y analizar las burbujas muestreadas de cada prueba, generando los datos necesarios para construir los gráficos que determinen la distribución de tamaño de burbujas (Schneider et al., 2012). En la Figura 12 se observa la ventana inicial que se despliega al abrir el software.

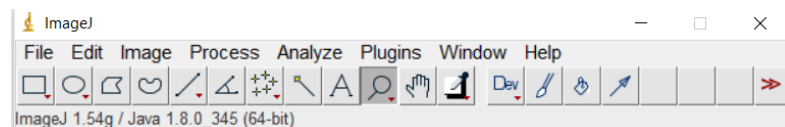


Figura 12. Ventana inicial que despliega el software Image-J (Fuente: Elaboración propia).

Se procede al análisis de imágenes mediante el software siguiendo estos pasos:

- **Conversión:** La imagen debe estar en escala de grises para permitir su procesamiento y análisis posterior.
- **Definición del umbral (*Thresholding*):** La imagen en escala de grises se binariza mediante la selección de un umbral que permite identificar las burbujas según la intensidad de los píxeles, evitando la sobreestimación del tamaño (Bailey et al., 2005).
- **Segmentación:** Los objetos binarizados (blobs), se segmentan eliminando ruido y objetos de tamaño no representativo, rellenándose además los agujeros internos antes del análisis.
- **Medición de propiedades:** El software calcula propiedades geométricas sobre cada objeto binarizado, tales como área, circularidad y ejes, para caracterizar las burbujas detectadas.
- **Aceptación:** Los objetos se validan según criterios de circularidad, aceptando aquellos compatibles con la forma esperada de las burbujas y descartando aglomerados o artefactos.

3.2.5. Tensiómetro

Se utilizó un tensiómetro con el método del anillo de Du Noüy para medir la tensión superficial de las soluciones líquidas. El método emplea un anillo metálico delgado de platino-iridio asegurado en una grampa. La escala está graduada de cero a noventa y la posición cero de la balanza se alcanza cuando el brazo que lleva el anillo coincide con la línea horizontal grabada sobre un pequeño círculo de fondo blanco. La plataforma que soporta el recipiente de líquido se puede elevar o bajar utilizando una grampa sobre un eje vertical. El ajuste fino de la plataforma se logra a través de un tornillo micrométrico. En la Figura 13 se observa el tensiómetro y el anillo utilizado en las pruebas.

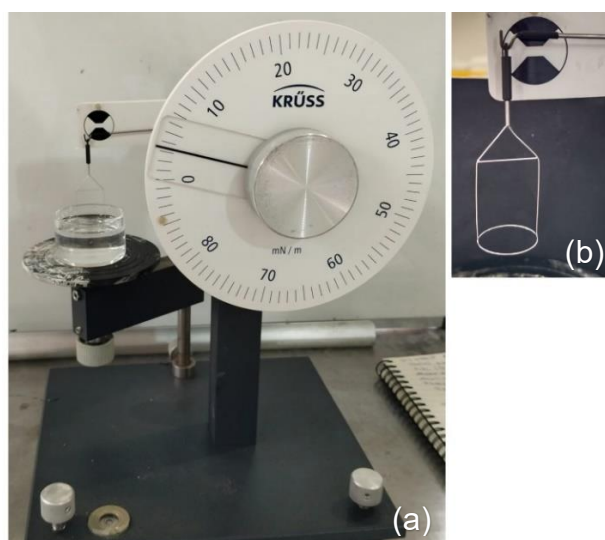


Figura 13. (a) Tensiómetro de fuerza K6 de KRÜSS y (b) Anillo de platino-iridio (Fuente: Elaboración propia).

3.2.6. Montaje experimental para la prueba DFI

El montaje experimental utilizado para la determinación del DFI consistió en una columna de vidrio conectada a un sistema de suministro y regulación de aire comprimido, el cual fue previamente regulado a una presión constante de 1 kg/cm^2 . Desde esta línea principal, el aire se dirigía hacia una válvula de tres vías, que actuaba como distribuidor principal. Esta válvula presentaba tres conexiones, una correspondiente a la línea de entrada del aire desde la red, y las otras dos conectadas a flujómetros de distinto rango operativos: uno de alta capacidad ($1\text{-}10 \text{ L/min}$) y otro de precisión para caudales reducidos ($0.1\text{-}0.5 \text{ L/min}$).

La válvula de tres vías permite seleccionar el flujómetro adecuado según el requerimiento del ensayo, dirigiendo el flujo hacia la base de la columna. Esta configuración asegura un suministro de aire estable y controlado, condición crítica para la formación de espuma y la posterior cuantificación de la capacidad espumante del reactivo. En la Figura 14 se observa el montaje utilizado.



Figura 14. Montaje experimental para las pruebas del DFI: (a) vista frontal y (b) posterior (Fuente: Elaboración propia).

3.3. Procedimiento experimental

3.3.1. Preparación de reactivos espumantes

Con el fin de optimizar la eficiencia en la flotación de minerales cupríferos, se formularon cuatro mezclas de espumantes para evaluar su desempeño experimental. Se utilizó el espumante MIBC como estándar de referencia para contextualizar los resultados. Si bien es el reactivo predominante en la industria, presenta limitaciones respecto a la dinámica y estabilidad de la espuma, por esta razón, se propone el diseño de mezclas que complementen o superen el rendimiento del MIBC.

La preparación de las mezclas de espumantes se realizó en el laboratorio de la empresa Clariant. En una primera etapa, se elaboraron cuatro mezclas las cuales fueron formuladas a partir de tres reactivos principales: MIBC, PPG-éter y BGE, variando sus porcentajes de participación en cada caso. Posteriormente, se llevó a cabo una segunda etapa de preparación, en la que se generó otras cuatro mezclas. En esta ocasión, además de los reactivos utilizados previamente, se incorporaron otros compuestos espumantes, con el objetivo de evaluar un mayor rango de comportamientos en la formación y estabilidad de la espuma. De las ocho formulaciones obtenidas, se seleccionaron aquellas que presentaron una mayor estabilidad de fase y homogeneidad en la mezcla para su evaluación en las pruebas experimentales. Los reactivos restantes fueron descartados debido a que sus proporciones no permitieron un estudio sistemático del proceso. De esta manera, se utilizaron las mezclas de espumantes identificadas como 1, 2, 3 y 4, cuyas proporciones volumétricas específicas se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición de las mezclas de espumantes (Fuente: Elaboración propia).

Nombre	Espumante	% v/v
Espumante 1	Alcohol (MIBC)	50%
	PPG-éter	20%
	BGE	30%
Espumante 2	Alcohol (MIBC)	20%
	PPG-éter	10%
	BGE	70%
Espumante 3	Alcohol (MIBC)	60%
	PPG-éter	10%
	Éter de glicol	30%
Espumante 4	Éter de alcohol/glicol	30%
	Alcohol ramificado	40%
	Éter de glicol	30%

La medición de los reactivos se realizó utilizando pipetas graduadas y una balanza analítica Mettler Toledo, ya que, los porcentajes en volumen fueron convertidos a masa (g) para facilitar una dosificación más precisa. Se utilizaron frascos con tapa hermética como recipiente, donde cada componente fue añadido directamente en el frasco, siguiendo el orden establecido en la formulación. Posteriormente, se utilizó un agitador magnético durante 10 minutos para asegurar una mezcla homogénea, asegurando la miscibilidad de los espumantes antes de su uso en las pruebas experimentales. Además, se procedió a calcular la densidad de cada mezcla de espumantes, donde se utilizó nuevamente la balanza analítica previamente tarada y una pipeta automática. El procedimiento consistió en introducir la pipeta en el frasco y extraer exactamente 1000 μL de la solución, que corresponde a 1 mL. La diferencia de masa registrada en la balanza tras la extracción corresponde a la densidad de la mezcla en g/mL. Finalmente, los frascos fueron etiquetados con su nombre de mezcla correspondiente (Espumante 1, 2, 3 y 4) y almacenados a temperatura ambiente.

3.3.2. Preparación de la muestra de mineral de cobre

El mineral cuprífero se somete a conminución en un molino de bolas durante 10.5 min, con el objetivo de obtener el tamaño de partícula adecuado para las pruebas de flotación. Al finalizar la molienda, la muestra se filtra para eliminar el exceso de humedad y posteriormente se seca en un horno a temperatura controlada. Una vez seca, la muestra se homogeneiza y se fracciona mediante el método de cuarteo, hasta obtener una porción representativa de 200 g, la cual se utiliza para verificar el tamaño de partícula objetivo. Para ello, se realiza un análisis granulométrico en seco utilizando un agitador Ro-Tap (Figura 15), utilizando un set de siete mallas estándar (N° 48, 70, 100, 140, 200, 270 y 325), con un tiempo de análisis de 10 minutos. Finalmente, se registra la masa retenida en cada malla y se construye la distribución acumulativa de tamaño, a partir de la cual se determina que el material presentaba un P_{80} cercano a 205 μm , valor considerado representativo y técnicamente adecuado para los ensayos de flotación que se desarrollan en este estudio.



Figura 15. Agitador Ro-Tap con sus mallas correspondientes al ensayo (Fuente: Elaboración propia).

3.3.3. Medición de la tensión superficial

Las mediciones de tensión superficial se realizan utilizando un tensiómetro de anillo Du Noüy, equipado con un anillo de platino-iridio. En primera instancia, se preparan soluciones acuosas de espumante a concentraciones de 15, 25, 30 y 45 mg/L, utilizando agua de la red como medio de disolución, correspondientes a las formulaciones de los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC. Cada solución se homogeneiza mediante agitación magnética durante 5 minutos y posteriormente, el pH se ajusta a valores de 9.5, 10 y 11.5 mediante HCl o NaOH, utilizando un pH-metro calibrado.

Previo a cada medición, el recipiente y el anillo de platino-iridio se limpian rigurosamente con el fin de evitar contaminaciones. El anillo se lava con agua y posteriormente se somete a calentamiento directo en la llama de un soplete para eliminar impurezas orgánicas. Una vez limpio, se instala en el brazo del tensiómetro, verificando su correcta alineación horizontal y ausencia de

deformaciones. El instrumento se calibra posicionando la balanza en la referencia cero, correspondiente al alineamiento del brazo con la línea horizontal del visor.

Para la medición, la plataforma que sostiene el recipiente se eleva mediante el tornillo micrométrico hasta posicionar el anillo paralelo a la superficie del líquido. Luego, el anillo se sumerge lentamente en la solución y la plataforma se desciende de forma gradual, permitiendo la formación del menisco en la interfase líquido-gas. El valor máximo de fuerza registrado al momento del desprendimiento del menisco corresponde a la tensión superficial de la solución. Para cada condición experimental se realizan tres mediciones, reportándose el valor promedio. La Figura 16 ilustra la secuencia del desprendimiento del menisco.

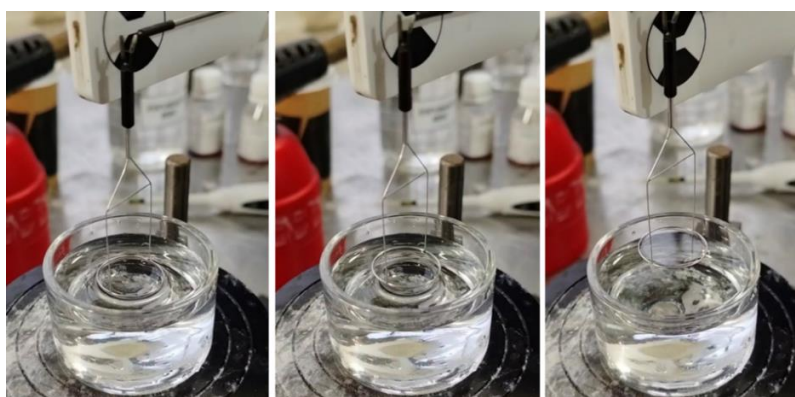


Figura 16. Desprendimiento del menisco durante la medición de la tensión superficial (Fuente: Elaboración propia).

3.3.4. DFI

Las pruebas se realizan en una columna de vidrio de 45 mm de diámetro interno y 1400 mm de altura, equipada en su parte inferior con un disco de filtro fritado (frita N°2), con un tamaño de poro nominal de 40–100 μm . El sistema cuenta además con un flujómetro, mediante el cual se regula el caudal de aire suministrado desde la red de aire de la universidad. El suministro de aire se ajusta previamente a una presión de 1 kg/cm² mediante una válvula de control, antes de ingresar al flujómetro que dosifica el aire hacia la columna. Para cada ensayo, se preparan soluciones de 400 mL de volumen total, correspondientes a concentraciones de espumante de 15, 25 y 30 mg/L, las cuales se agitan durante 5 minutos para asegurar una dilución homogénea del espumante en el agua. Durante esta etapa, el pH de la solución se ajusta y controla mediante un pH-metro calibrado, utilizando NaOH o HCl según corresponda. En estas pruebas, el pH 10 se descarta debido a que, de acuerdo con los resultados de tensión superficial, no presenta diferencias significativas respecto a los otros valores evaluados, mostrando un comportamiento intermedio. En contraste, los pH 9.5 y 11.5 representan condiciones de menor y mayor alcalinidad, respectivamente, en las cuales se observan diferencias claras en la formación, estabilidad y ruptura de la espuma. La Figura 17 presenta el esquema del montaje experimental empleado en las pruebas del DFI.

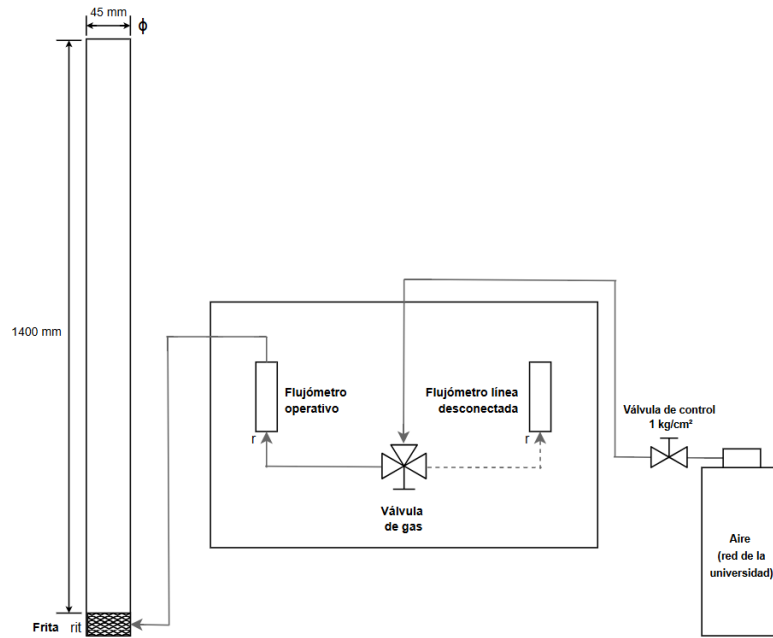


Figura 17. Esquema del montaje experimental para las pruebas del DFI (Fuente: Elaboración propia).

Una vez preparada, la solución se trasvasija a la columna de vidrio y se registra la altura inicial del líquido antes del ingreso de aire. Posteriormente, se introduce un flujo de aire controlado mediante el flujómetro, dentro del rango de 0.5 a 3 L/min, según las condiciones establecidas para cada ensayo. Tras el inicio del suministro de aire, la espuma se mantiene en observación durante aproximadamente 15 minutos, hasta alcanzar una altura constante, correspondiente al equilibrio de la espuma. En este punto, se registra la altura de la espuma, determinada como la diferencia entre la altura total de la espuma y la altura inicial del líquido.

Todas las pruebas se realizan a temperatura ambiente (25 ± 2 °C) y cada medición se repite tres veces, reportándose el valor promedio. Finalmente, para la determinación del tiempo de retención, se grafica el volumen total de gas en función del caudal de gas, obteniéndose la pendiente correspondiente a este parámetro.

3.3.5. Distribución de tamaño de burbujas (*Bubble Viewer*)

La medición del tamaño de las burbujas se realiza en un sistema bifásico utilizando una celda de flotación mecánica (Edemet) de 5 L, empleando el equipo *Bubble Viewer*. El método se basa en la captura y procesamiento de imágenes obtenidas por retroiluminación mediante un dispositivo de muestreo. Para la adquisición de imágenes se utiliza una cámara digital Nikon D5100, equipada con un objetivo macro de 60 mm, obteniéndose imágenes con una resolución de 4928 x 3264 píxeles y una escala entre 170 y 180 píxeles/mm. La Figura 18 presenta el esquema del montaje experimental.

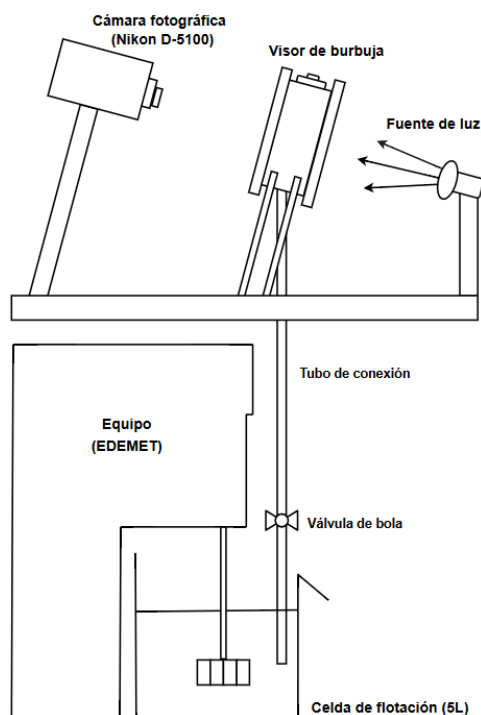


Figura 18. Esquema del montaje experimental para la medición del tamaño de burbujas (Fuente: Elaboración propia).

Para el ensayo, se prepara la solución en un recipiente de 20 L, mezclando 12 L de agua con las dosis de espumante correspondientes (15, 25, 30 y 45 mg/L). La mezcla se homogeneiza mediante agitación durante 5 minutos y el pH se ajusta utilizando HCl o NaOH, mediante un pH-metro calibrado. Las pruebas se efectúan únicamente a pH 9.5, seleccionado por ser el más representativo en términos de estabilidad de espuma según los ensayos de tensión superficial y DFI. Posteriormente, se cargan 8 L de solución en el visor de burbujas y 4 L en la celda acrílica, se enciende la fuente de luz del dispositivo y se inicia la operación de la celda bajo las condiciones de acondicionamiento indicadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de acondicionamiento (Fuente: Elaboración propia).

Flujo de aire (L/min)	Velocidad de agitación (rpm)	Volumen de celda (L)	pH	Tiempo (min)
0	700	5	9.5	3

Una vez iniciada la etapa de flotación, se abre la válvula del tubo colector de burbujas, permitiendo el ascenso de las burbujas hacia la zona de exposición. En paralelo, se procede a la captura del set de imágenes. Los detalles relativos a la operación y configuración de la cámara fotográfica se presentan en el Anexo N°3. Durante la etapa de flotación, la celda opera bajo las condiciones indicadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de flotación (Fuente: Elaboración propia).

Flujo de aire (L/min)	Velocidad de agitación (rpm)	Volumen de celda (L)	pH	Tiempo (min)
10	1000	5 L	9.5	12 min

Procesamiento de imágenes (Image - J)

Como se muestra en la Figura 19, se importó una imagen de una cinta métrica para calibrar la escala y establecer una referencia espacial que permita convertir los píxeles en milímetros. Posteriormente, la imagen original en formato RGB se convirtió a 8-bit, lo que facilitó el procesamiento y la aplicación del umbral de segmentación para distinguir las burbujas del fondo.

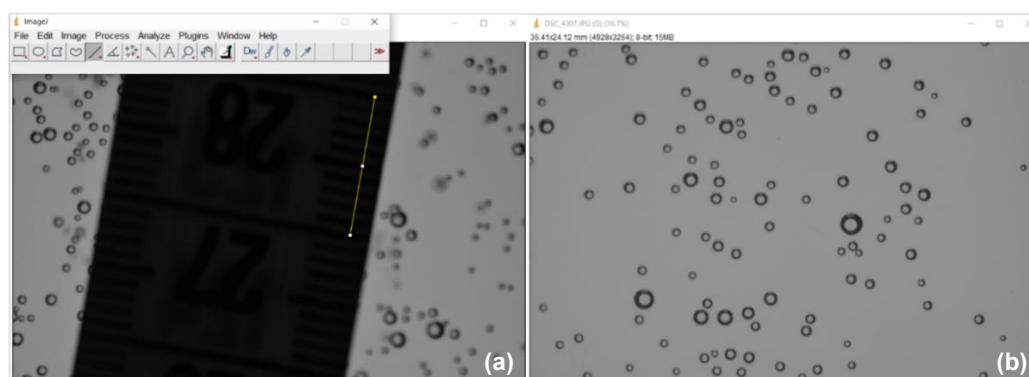


Figura 19. (a) Escala de píxeles a mm para análisis de imágenes y (b) Imagen en 8-bit (Fuente: Elaboración propia).

Como se observa en la Figura 20, la segmentación de las burbujas se realiza ajustando el *Threshold* para convertir la imagen a binaria (a). Posteriormente, se aplica *Fill Holes* para rellenar automáticamente los agujeros internos (b). Finalmente, mediante *Analyze Particles*, se detectan y miden las burbujas, restringiendo la circularidad a valores superiores a 0.85 para excluir formas irregulares. Una vez que se filtran los *clusters*, se obtienen los datos que permiten calcular los D32.

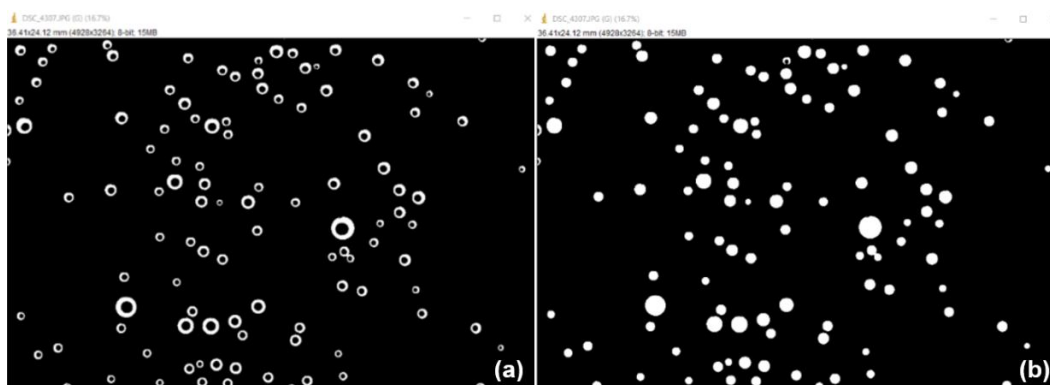


Figura 20. (a) Ajuste *Threshold* aplicado y (b) ajuste *Fill Holes* aplicado (Fuente: Elaboración propia).

3.3.6. Recuperación de agua

Para las pruebas de recuperación de agua en un sistema bifásico se utiliza una celda de flotación mecánica Edemet de 2.7 L, empleando agua de red y los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC. Previo a la flotación, se preparan cinco bandejas de vidrio, las cuales se numeran y pesan en seco, registrándose estos valores como peso inicial. Con el fin de evaluar la capacidad de recuperación de agua, se realizan ensayos a tres concentraciones de espumante (15, 25 y 30 mg/L), ajustando el pH a 9.5 mediante la adición de NaOH o HCl, según corresponda. El acondicionamiento y flotación de la pulpa se realiza según los parámetros indicados en la Tabla 6.

Tabla 6. Condiciones de acondicionamiento (Fuente: Elaboración propia).

	Flujo de aire (L/min)	Velocidad de agitación (rpm)	Volumen de celda (L)	pH	Tiempo (min)
Acondicionamiento	0	700	2.7	9.5	3
Flotación	7	1000	2.7	9.5	5

La espuma generada fue recolectada manualmente en las bandejas numeradas, en intervalos de 15 segundos (cuatro veces por minuto) durante cinco minutos de ensayo, registrándose los periodos 0–1, 1–2, 2–3, 3–4 y 4–5 minutos. Al finalizar cada prueba, las bandejas se pesan nuevamente con el agua recuperada. La determinación del volumen de agua recolectada se obtiene por diferencia entre el peso final y el peso inicial de cada bandeja.

3.3.7. Flotación en sistema trifásico para la evaluación del desempeño de los espumantes

Para las pruebas de flotación en sistema trifásico (líquido–sólido–gas) se utiliza una celda mecánica Edemet de 2,7 L. La fase líquida corresponde a agua de red, la fase sólida a un mineral cuprífero de la zona norte de Chile, previamente conminuido hasta un tamaño adecuado, y la fase gaseosa se genera mediante aireación controlada. Se evalúan cinco tipos de espumantes a concentraciones de 15, 25 y 30 g/t, junto con un colector tipo xantato dosificado a 30 g/t. El pH del sistema se mantiene en 9.5, seleccionado por criterios metalúrgicos y fisicoquímicos, al presentar mayor estabilidad de espuma y una mejor respuesta del mineral de cobre bajo condiciones ligeramente alcalinas, en concordancia con la literatura (Wills & Finch, 2015). El pH se ajusta mediante la adición de lechada de cal ($Ca(OH)_2$) y se controla con un pH-metro calibrado. El acondicionamiento y flotación de la pulpa se realiza según los parámetros indicados en la Tabla 7.

Tabla 7. Condiciones de acondicionamiento y flotación (Fuente: Elaboración propia).

	Flujo de aire (L/min)	Velocidad de agitación (rpm)	Volumen de celda (L)	pH	Tiempo (min)
Acondicionamiento	0	700	2.7	9.5	5
Flotación	7	1000	2.7	9.5	12

Durante el ensayo, el concentrado espumoso se recolecta a intervalos de 30 segundos durante un tiempo total de 12 minutos, utilizando bandejas previamente identificadas. De forma complementaria, se realiza la limpieza de la celda mediante una piseta para arrastrar material adherido a las paredes internas y al impulsor. Finalizada la flotación, las bandejas con concentrado se llevan a un horno de secado para eliminar la humedad y permitir su posterior análisis. En paralelo, la fracción de colas se somete inicialmente a filtrado para reducir el contenido de agua libre y luego se seca bajo las mismas condiciones que el concentrado. Este procedimiento se repite en todos los ensayos, variando únicamente el tipo de espumante y la concentración evaluada.

Una vez secas, las muestras de concentrado y colas se preparan mediante roleo, técnica que permite homogeneizar el material por extendido y enrollado sobre una superficie lisa. Posteriormente, se aplica el método de cuarteo por división en cuartos hasta obtener una fracción representativa, asegurando la homogeneidad de las submuestras destinadas al análisis.

Finalmente, las fracciones seleccionadas se pesan y se analizan químicamente mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF), utilizando un analizador portátil tipo pistola. Este análisis permite determinar la composición elemental de las muestras, donde el porcentaje de Cu obtenido corresponde a la ley de cobre de cada muestra, información fundamental para el posterior cálculo de recuperaciones metalúrgicas teóricas basada en las leyes.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Medición de la tensión superficial

Las Figuras 21, 22 y 23 presentan las curvas de tensión superficial en función de la concentración de los espumantes, evaluados a diferentes pH. Para los valores obtenidos de tensión superficial ver Anexo N°1.

En el caso del espumante 1 (Figura 21a), se observa una disminución abrupta de la tensión superficial al dosificar 25 mg/L; seguida de un aumento al incrementar la concentración a 30 y 45 mg/L. Este comportamiento no lineal se asocia a fenómenos de adsorción competitiva entre los componentes de la mezcla. El alto contenido de MIBC, presenta una adsorción rápida pero menos estable, el PPG-éter una adsorción más lenta y persistente, y el BGE actúa como co-tensioactivo modificando la organización interfacial. A concentraciones intermedias se alcanza una saturación parcial de la interfaz, mientras que a mayores dosis el reposicionamiento molecular explica el aumento posterior de la tensión superficial. En términos generales, el espumante 1 muestra mayor actividad tensioactiva a pH 9.5 y 10, con valores mínimos cercanos a 62–64 mN/m.

Por su parte, el espumante 2 (Figura 21b) presenta un comportamiento más estable y predecible. Su proporción de BGE (70%) favorece una adsorción más homogénea en la interfaz, manteniendo la tensión superficial dentro de un rango más estrecho (60–67 mN/m) y sin cambios abruptos con la concentración. Si bien reduce menos la tensión superficial que el espumante 1, su respuesta es más lineal, lo que evidencia un efecto tensioactivo moderado pero estable.

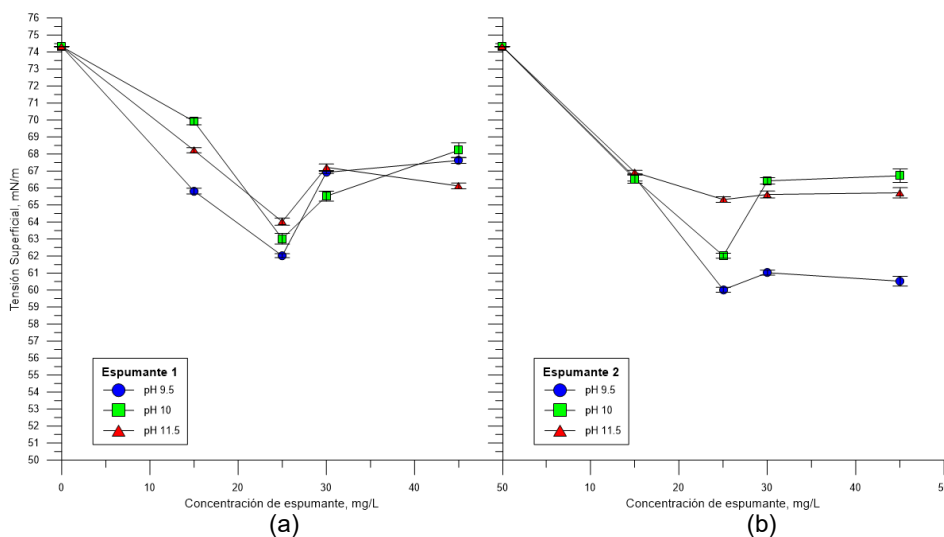


Figura 21. Tensión superficial versus concentración de espumantes a diferentes pH; (a) Espumante 1 (MIBC, PPG-éter, BGE) y (b) Espumante 2 (MIBC, PPG-éter, BGE) (Fuente: Elaboración propia).

El espumante 3 (Figura 22a) exhibe una baja actividad tensioactiva en todo el rango de pH y concentración estudiado, con valores elevados de tensión superficial (≈ 71 – 73 mN/m) y variaciones

mínimas entre dosis. Solo se observa una reducción apreciable a pH 11,5 y 45 mg/L. Este comportamiento se asocia a su alta fracción de MIBC (60%), cuya eficacia se ve limitada por la presencia de éter de glicol y PPG-éter, los cuales actúan como co-tensoactivos que modifican la estructura interfacial sin generar una disminución significativa de la tensión superficial, resultando en una mezcla de baja eficiencia tensioactiva.

En contraste, el espumante 4 (Figura 22b) presenta una reducción marcada y consistente de la tensión superficial (≈ 50 – 52 mN/m) en todos los pH y concentraciones evaluadas, con curvas prácticamente planas. Este comportamiento se atribuye a su alto contenido de alcohol ramificado (40%), que favorece una adsorción rápida y eficiente en la interfaz líquido-aire, formando una capa molecular compacta. Los éteres presentes en la formulación complementan esta acción, promoviendo una orientación favorable y una mayor estabilidad de la película interfacial. De este modo, el espumante 4 se comporta como un tensoactivo fuerte y altamente eficiente, capaz de saturar la interfaz incluso a bajas dosis.

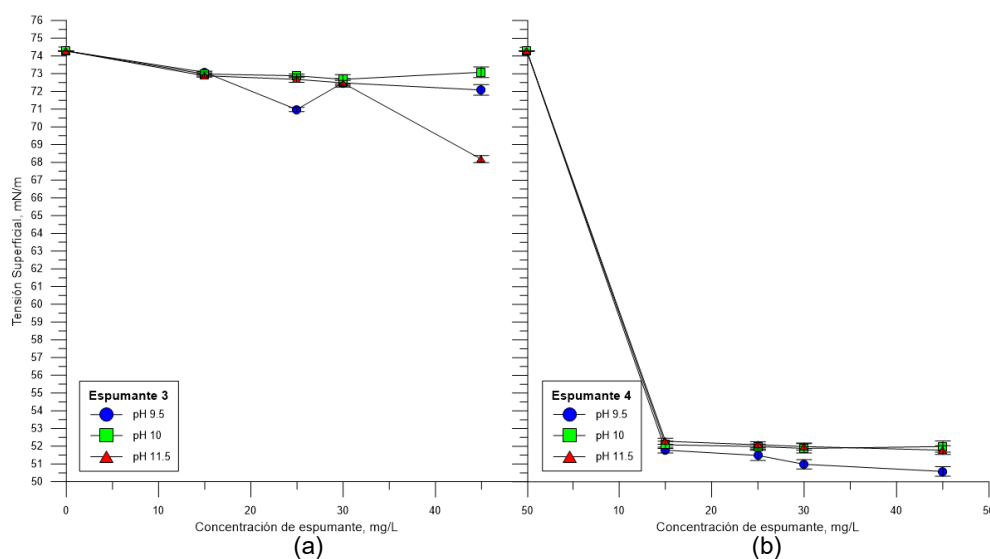


Figura 22. Tensión superficial versus concentración de espumantes a diferentes pH; (a) Espumante 3 (MIBC, PPG-éter, Éter de glicol) y (b) Espumante 4 (Éteres de glicol, Alcohol ramificado) (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 23 se presentan las curvas de tensión superficial en función de la concentración del MIBC a diferentes valores de pH. Este espumante es un alcohol de cadena relativamente corta y, a bajas concentraciones, sus moléculas no son suficientes para formar una monocapa coherente en la interfaz líquido-aire, por lo que la tensión superficial se mantiene cercana a la del agua (Rosen & Kunjappu, 2012). Como se observa en la Figura 23, entre 15 y 30 mg/L la tensión superficial permanece prácticamente constante, con valores en torno a 74,3 mN/m, lo que indica que el sistema aún no alcanza una cobertura interfacial efectiva. A 45 mg/L se produce una disminución abrupta de la tensión superficial, asociada al inicio de una adsorción cooperativa y a una mayor organización molecular en la interfaz, comportamiento característico de alcoholes ramificados como el MIBC

(Schramm, 2014). La diferencia respecto a los valores reportados en la literatura se atribuye a que el rango de dosificación evaluado no alcanza completamente la zona de saturación interfacial descrita para este espumante. Estudios previos indican que el MIBC continúa reduciendo la tensión superficial a concentraciones superiores, hasta alcanzar un valor de equilibrio asociado a la formación de una monocapa estable (Fuerstenau et al., 2007). En este contexto, los resultados obtenidos son coherentes con el comportamiento esperado del MIBC y sugieren que, a dosificaciones mayores, la tensión superficial continuaría disminuyendo hasta estabilizarse.

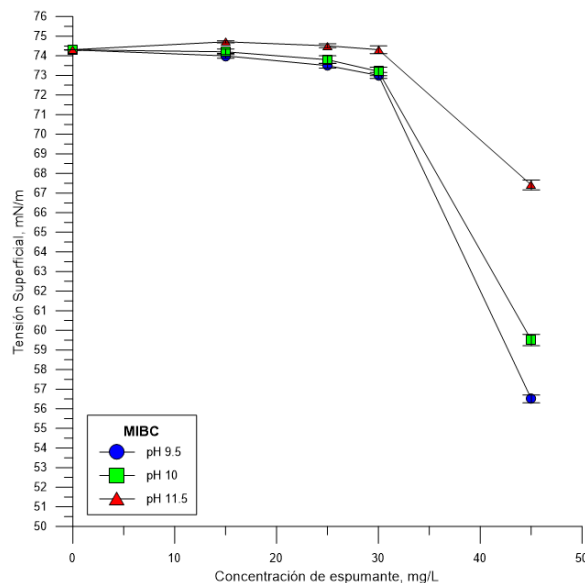


Figura 23. Tensión superficial versus concentración del espumante MIBC a diferentes pH (Fuente: Elaboración propia).

4.2. DFI

Las Figuras 24 a la 28 muestran el volumen total de gas retenido en la columna versus el caudal de gas, evaluados a diferentes concentraciones (ver Anexo N°2).

El espumante 1 presentó una buena capacidad de generación de espuma, aunque con estabilidad limitada a caudales elevados. En ensayos preliminares, a 3 L/min la espuma no alcanzó una condición de estabilidad dinámica, evidenciándose ruptura continua de burbujas y ausencia de un estado estacionario reproducible; por esta razón, se seleccionó 2 L/min como caudal máximo de evaluación. En la Figura 24 se observa que, en ambos pH, el volumen de espuma aumenta con la concentración. A pH 9.5 (Figura 24a), el incremento del caudal genera un aumento progresivo y controlado del volumen, manteniendo una espuma estable. En cambio, a pH 11.5 (Figura 24b) se registra un aumento más marcado del volumen, especialmente a caudales altos, lo que indica una mayor estabilidad de espuma en medio alcalino; sin embargo, el exceso de volumen impide alcanzar un estado estacionario, evidenciando una pérdida de estabilidad de la espuma.

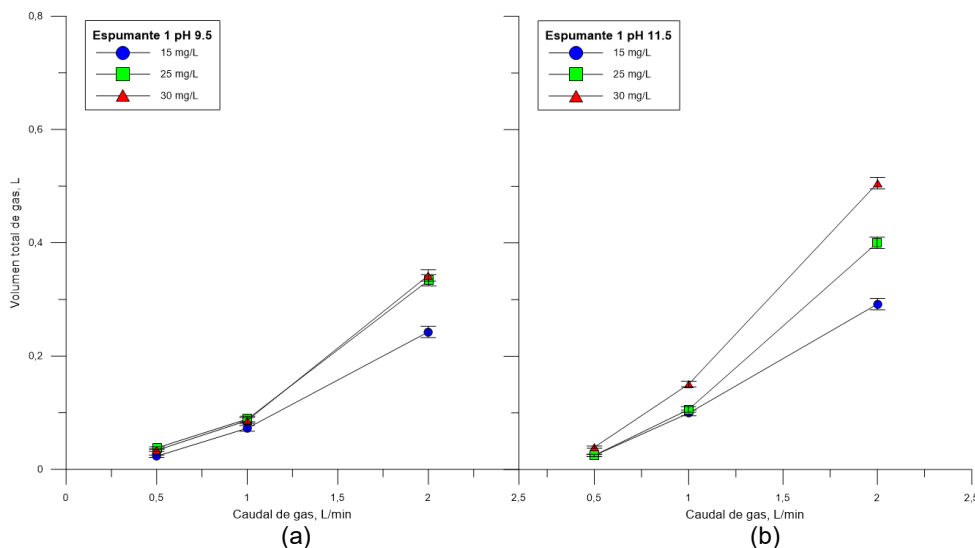


Figura 24. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 1 (MIBC, PPG-éter, BGE); (a) 9.5 y (b) 11.5 (Fuente: Elaboración propia).

El espumante 2 presentó volúmenes de espuma comparables o superiores al 1, confirmando su mayor capacidad espumante y mejor estabilidad. Al operar a 3 L/min, no se logró establecer un estado estacionario reproducible, por lo que se seleccionó 2 L/min como caudal máximo de evaluación. En la Figura 25 se observa un aumento progresivo del volumen de espuma con la concentración y el caudal. A pH 9.5 (Figura 25a), el incremento del volumen fue gradual y controlado, característico de espumantes con buena cinética de adsorción interfacial. La alta proporción de BGE favorece una rápida reducción de la tensión superficial, mientras que el PPG-éter aporta elasticidad a la película líquida, retardando el drenaje y la coalescencia. Mientras que a pH 11.5 (Figura 25b), el aumento del volumen es más marcado, especialmente a caudales altos, lo que indica una mayor estabilidad de la película espumosa en medio alcalino.

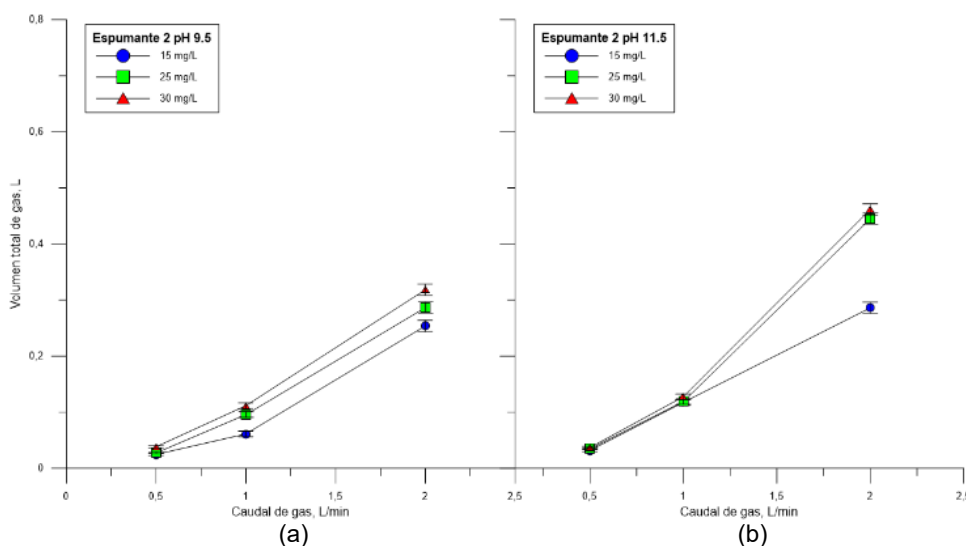


Figura 25. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 2 (MIBC, PPG-éter, BGE); (a) 9.5 y (b) 11.5 (Fuente: Elaboración propia).

El espumante 3 presentó volúmenes de espuma bajos a caudales reducidos, aumentando de forma abrupta al incrementar el caudal a 3 L/min. Este comportamiento indica la existencia de un umbral de aireación, a partir del cual la tasa de generación de burbujas supera la tasa de colapso de la espuma, permitiendo la formación de una franja estable medible. Como se observa en la Figura 26, el espumante mostró un aumento del volumen de espuma con la concentración en ambos pH. Sin embargo, a pH 11.5 (Figura 26b) los volúmenes obtenidos fueron sistemáticamente menores que a pH 9.5, evidenciando una menor eficiencia espumante en condiciones más alcalinas. En particular, a 3 L/min y pH 11.5 se observó una reducción del volumen de espuma, lo que se atribuye a la elevada fracción de MIBC en la mezcla, cuyo desempeño es más favorable en rangos de pH moderadamente alcalinos.

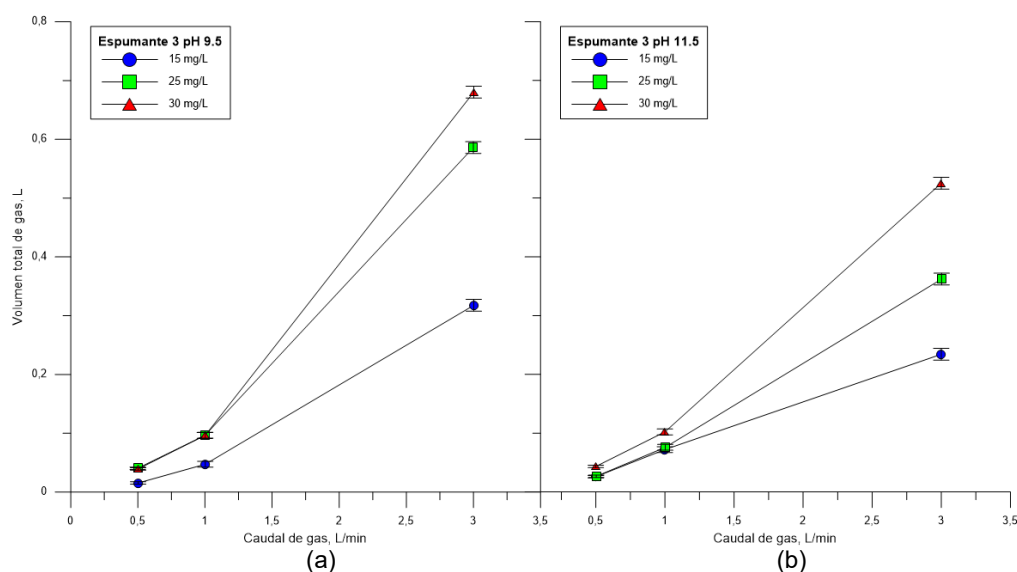


Figura 26. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 3 (MIBC-PPG-éter, Éter de glicol); (a) 9.5 y (b) 11.5 (Fuente: Elaboración propia).

El espumante 4 presentó volúmenes de espuma bajos y similares en ambos pH, como se observa en la Figura 27a para pH 9.5 y la Figura 27b para pH 11.5, lo que evidencia una baja estabilidad y persistencia de la espuma. Este comportamiento se asocia a su alta proporción de alcohol ramificado, que favorece la coalescencia rápida de las burbujas y la formación de películas interfaciales poco elásticas, limitando la acumulación de espuma (Fuerstenau et al., 2007).

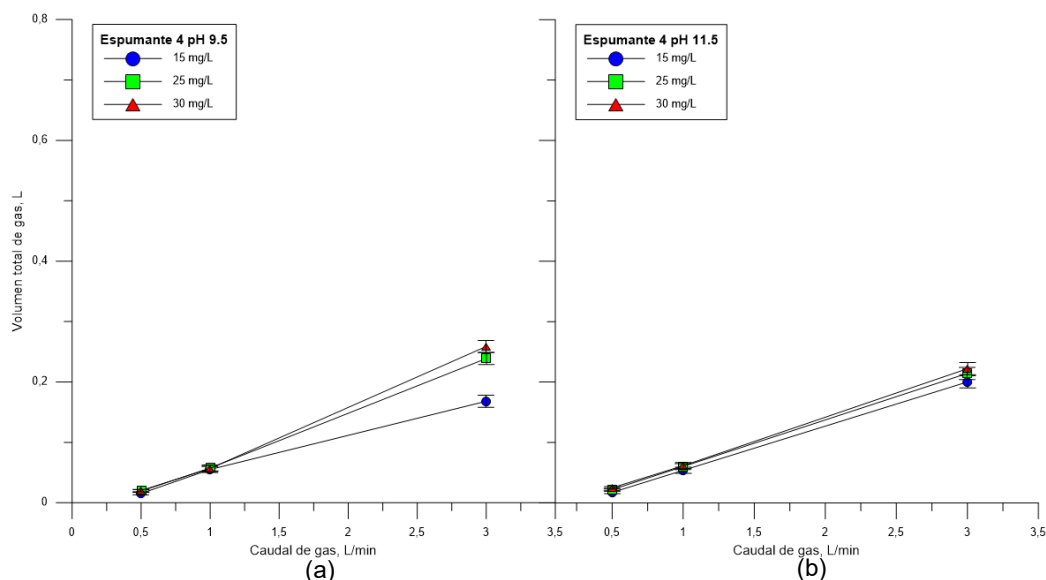


Figura 27. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 4 (Éteres de glicol, alcohol ramificado); (a) 9.5 y (b) 11.5 (Fuente: Elaboración propia).

El MIBC presentó un comportamiento típico de un alcohol de cadena ramificada, caracterizado por una alta generación inicial de burbujas y estabilidad de espuma limitada. Se observa en la Figura 28(a) para pH 9.5 y Figura 28(b) para pH 11.5, que el volumen de espuma aumenta con el incremento del caudal, lo que es característico de espumantes de rápida adsorción interfacial. No obstante, los volúmenes máximos alcanzados son moderados en comparación con las mezclas formuladas. El aumento de la concentración incrementa el volumen de espuma, con una tendencia similar en ambos pH, evidenciando baja sensibilidad a la alcalinidad del medio. Este comportamiento concuerda con lo reportado para alcoholes de bajo peso molecular, los cuales forman películas líquidas delgadas y de rápida ruptura, favoreciendo la coalescencia y el drenaje rápido (Laskowski, 2003c).

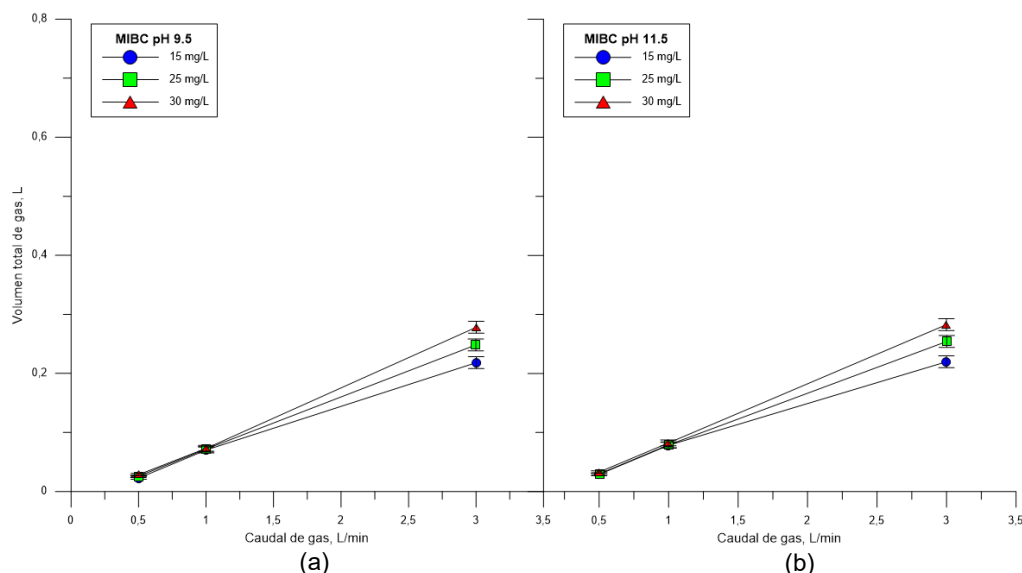


Figura 28. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del MIBC; (a) 9.5 y (b) 11.5 (Fuente: Elaboración propia).

La Figura 29 muestra r_t en función de la concentración, utilizando soluciones con los espumantes 1, 2, 3 y 4 a pH 9.5 y 11.5. Para los valores obtenidos en las pruebas ver Anexo N°2.

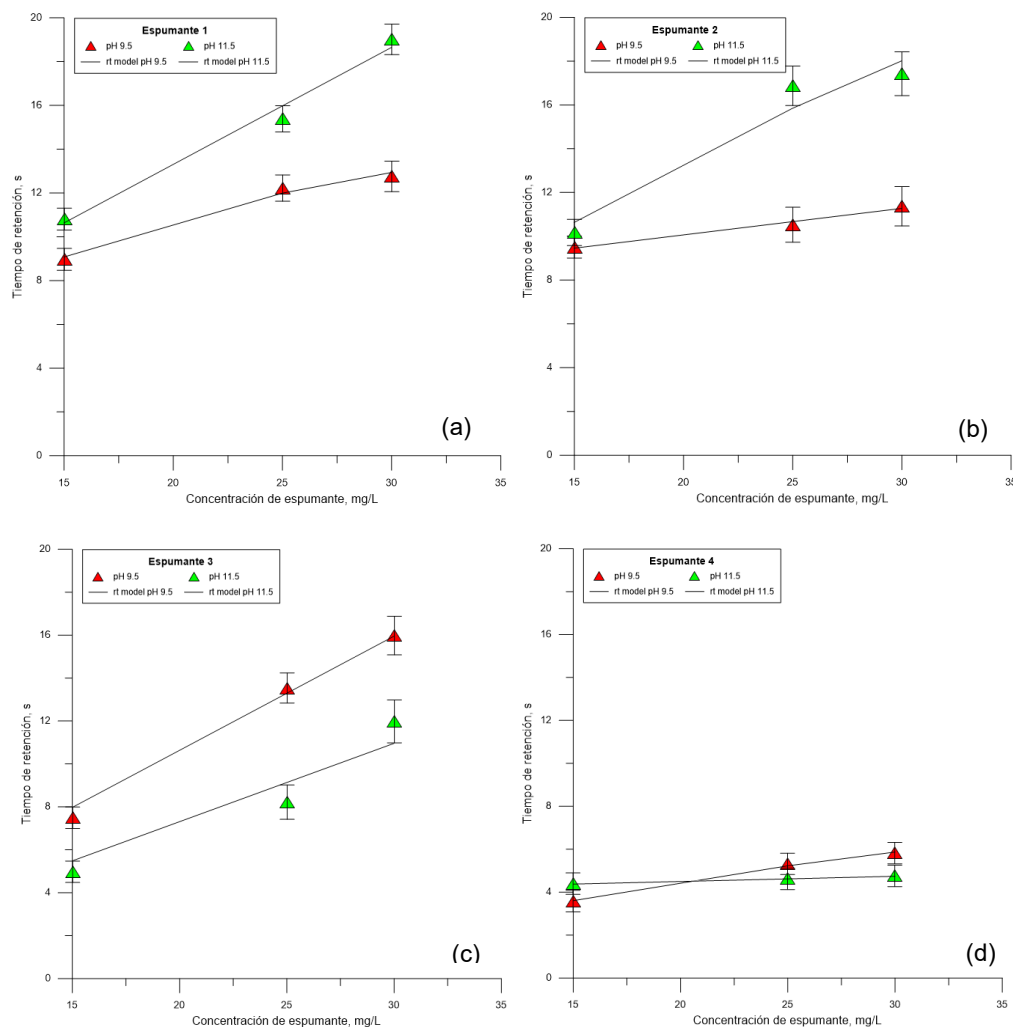


Figura 29. r_t vs concentración de espumantes a pH 9.5 (rojo) y 11.5 (verde); (a) Espumante 1 (MIBC, PPG-éter, BGE), (b) Espumante 2 (MIBC, PPG-éter, BGE), (c) Espumante 3 (MIBC, PPG-éter, Éter de glicol) y (d) Espumante 4 (Éteres de glicol, alcohol ramificado) (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 29a, el espumante 1 presenta un incremento progresivo de r_t a pH 9.5 y pH 11.5, siendo este último claramente superior. Este comportamiento es coherente con su alto DFI en ambos pH, lo que confirma su elevada capacidad espumante y buena estabilidad de espuma, intensificada en medio más alcalino, con películas líquidas más estables y una menor tasa de ruptura de burbujas. Mientras que el espumante 2 (Figura 29b) presenta un comportamiento similar al espumante 1, con un aumento sostenido de r_t con la concentración en ambos pH, destacando el fuerte incremento a pH 11.5. Este resultado es consistente con su alto DFI a pH 11.5.

En la Figura 29c, el espumante 3 evidencia un aumento marcado de r_t con la concentración en ambos pH, siendo más pronunciado a pH 9.5. A pH 11.5, los valores de r_t son menores, en

concordancia con la disminución de su DFI, lo que indica una reducción moderada de la estabilidad de la espuma en condiciones más alcalinas. En la Figura 29d, el espumante 4 presenta los menores tiempos de retención entre los espumantes evaluados, con baja sensibilidad a la concentración, especialmente a pH 11.5. Este comportamiento concuerda con su bajo DFI, particularmente a pH 11.5, confirmando su limitada capacidad para estabilizar la espuma, lo que explica además la baja altura de espuma observada experimentalmente.

Finalmente, en la Figura 30, el MIBC presenta valores bajos y relativamente constantes de r_t en ambos pH, con incrementos leves al aumentar la concentración. En consecuencia, el valor de DFI obtenido es inferior a los valores típicamente reportados en la literatura para este espumante. Esta diferencia se atribuye a que el rango de dosificación evaluado no alcanza las concentraciones en las que el MIBC desarrolla completamente su capacidad estabilizante de espuma. Estudios previos indican que el DFI del MIBC aumenta a dosificaciones más elevadas, alcanzando valores del orden de 30.000–35.000, asociados a una mayor persistencia de la espuma (Schramm, 2014). En este contexto, los resultados obtenidos del MIBC son coherentes con el comportamiento esperado y reflejan una condición de subdosificación relativa en los ensayos realizados.

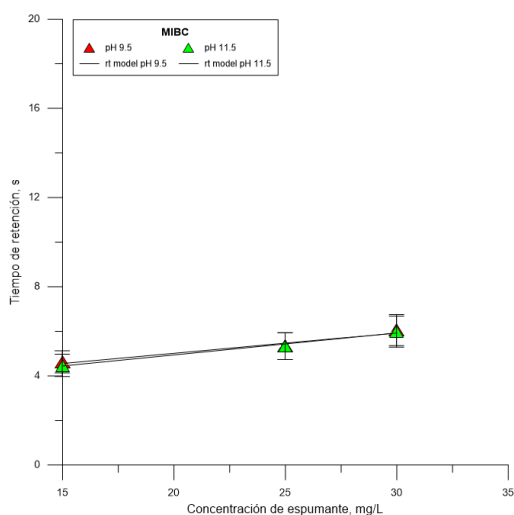


Figura 30. r_t vs concentración de espumante (MIBC) a pH 9.5 y 11.5 (Fuente: Elaboración propia).

En la tabla 8 se pueden observar los valores obtenidos de DFI para cada espumante y pH.

Tabla 8. Datos obtenidos del DFI para los diferentes espumantes a pH 9.5 y pH 11.5 (Fuente: Elaboración propia).

Espumantes	DFI, sL/mol	
	pH 9.5	pH 11.5
Espumante 1	146,265	86,932
Espumante 2	31,078	213,967

Espumante 3	67,876	46,561
Espumante 4	59,182	4,949
MIBC	9,410	10,223

4.3. Distribución de tamaño de burbujas

La Figura 31 a la 35 muestran las distribuciones de tamaño de burbujas obtenidas usando los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC, a pH 9.5. Para los valores obtenidos ver Anexo N°3.

Para el espumante 1 (Figura 31), la distribución se desplaza progresivamente hacia burbujas de menor tamaño al aumentar la concentración. A 15 mg/L, se observa una distribución ancha, con burbujas entre 0.13 y 0.92 mm, evidenciando una población heterogénea y mayor probabilidad de coalescencia. A 25 mg/L, la distribución se estrecha significativamente, con un máximo dominante en 0.06 mm, indicando una población de burbujas finas y más uniforme. En 30 mg/L, los tamaños se mantienen en el rango fino (0.05–0.43 mm), aunque con mayor dispersión, mientras que a 45 mg/L la distribución se concentra fuertemente en burbujas ultrafinas, con un pico marcado en 0.03 mm, reflejando un sistema altamente estabilizado.

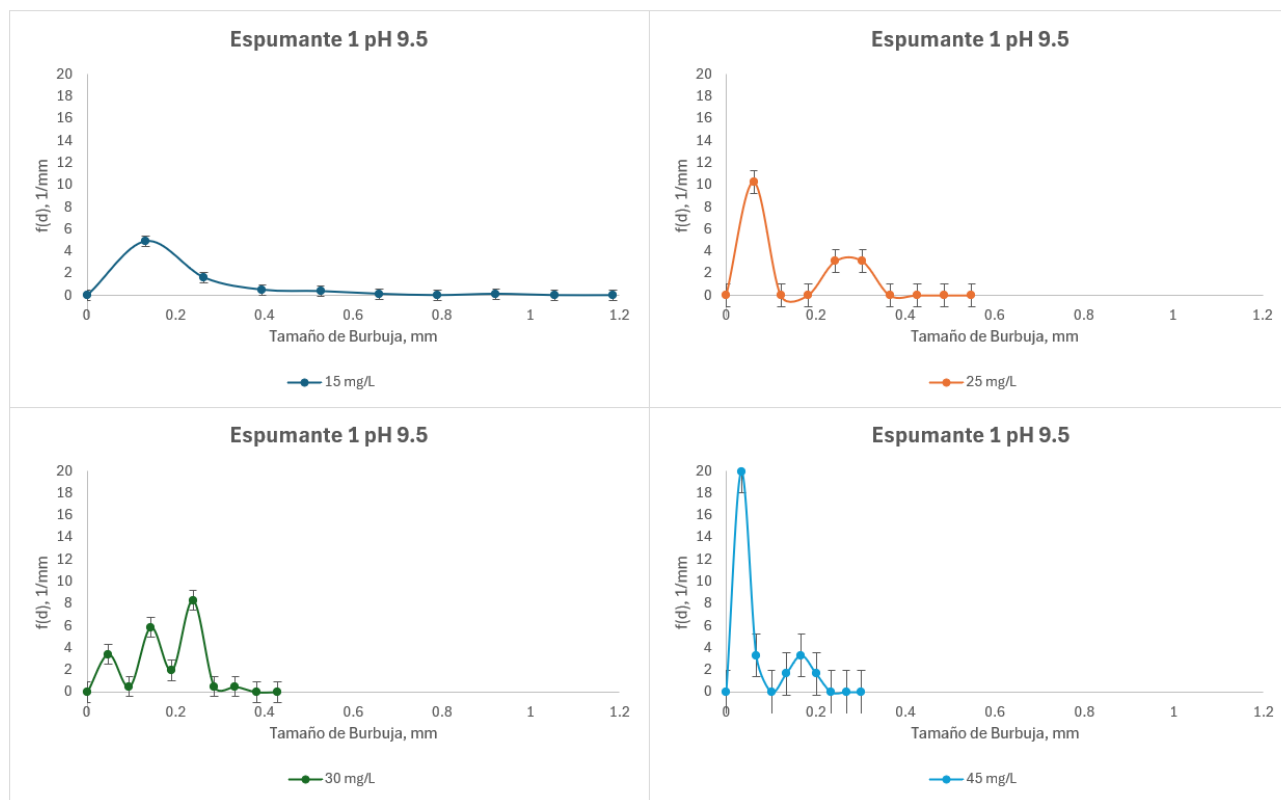


Figura 31. Distribución de tamaño de burbujas usando el Espumante 1 (MIBC, PPG-éter, BGE) a diferentes dosificaciones (Fuente: Elaboración propia).

En el caso del espumante 2 (Figura 32), a 15 mg/L predominan burbujas de tamaño medio, concentradas principalmente entre 0.38 y 0.54 mm, con dos máximos de frecuencia bien definidos, lo que indica un control limitado de la fragmentación del gas a baja dosificación. Al aumentar la concentración a 25 mg/L, la distribución se desplaza hacia tamaños menores, con presencia significativa de burbujas en el rango 0.08–0.40 mm, evidenciando una mayor eficiencia en la generación de burbujas finas. A 30 mg/L, se observa una distribución estrecha, dominada por burbujas finas con un máximo de frecuencia en torno a 0.06 mm. Finalmente, a 45 mg/L, la distribución se mantiene en el rango fino (≤ 0.07 mm), con un patrón similar al de 30 mg/L, lo que sugiere la entrada del sistema en una condición de saturación interfacial, sin reducciones adicionales relevantes en el tamaño de burbuja.

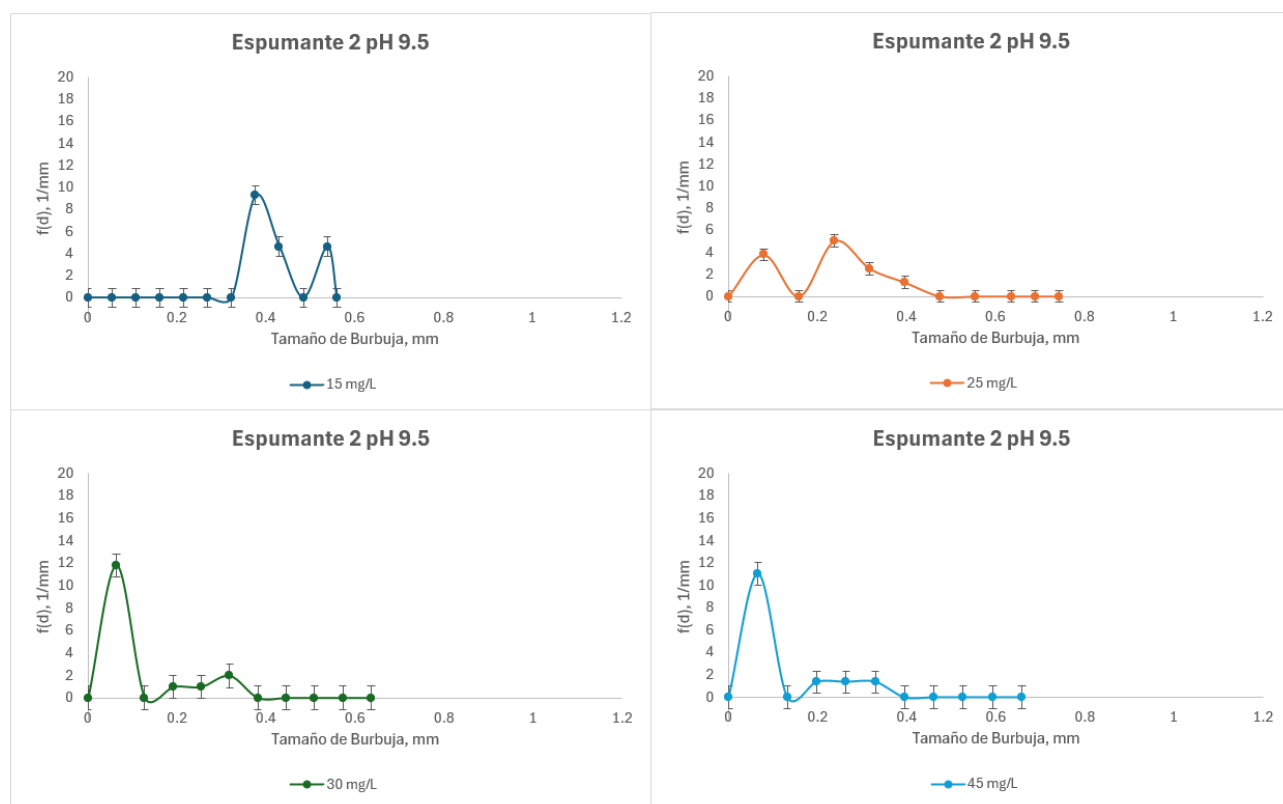


Figura 32. Distribución de tamaño de burbujas usando el Espumante 2 (MIBC, PPG-éter, BGE) a diferentes dosificaciones (Fuente: Elaboración propia).

Para el espumante 3 (Figura 33), la concentración influye de manera clara en la fragmentación y uniformidad del tamaño de burbuja. A 15 mg/L, la distribución es amplia, con tamaños que alcanzan hasta ≈ 1.48 mm y un máximo de frecuencia en el rango 0.21–0.42 mm, lo que evidencia una población heterogénea, dominada por burbujas medianas y con presencia significativa de tamaños mayores. Al aumentar a 25 mg/L, la distribución se desplaza hacia tamaños menores, concentrándose principalmente entre 0.10 y 0.38 mm, con un pico dominante en 0.10 mm, lo que

indica una mayor generación de burbujas finas y una reducción efectiva de la coalescencia. A 30 mg/L, predominan tamaños pequeños a intermedios (0.11–0.65 mm), con la presencia de varios picos de frecuencia. Este patrón refleja una buena fragmentación del gas, aunque con una dispersión de tamaños más marcada, lo que sugiere el inicio de una sobredosificación local del espumante. Finalmente, a 45 mg/L, la distribución se amplía levemente hacia tamaños mayores, abarcando un rango de 0.13–0.64 mm, con picos tanto en el rango fino (≈ 0.13 mm) como intermedio (≈ 0.51 mm), lo que refleja una pérdida de uniformidad asociada al exceso de espumante.

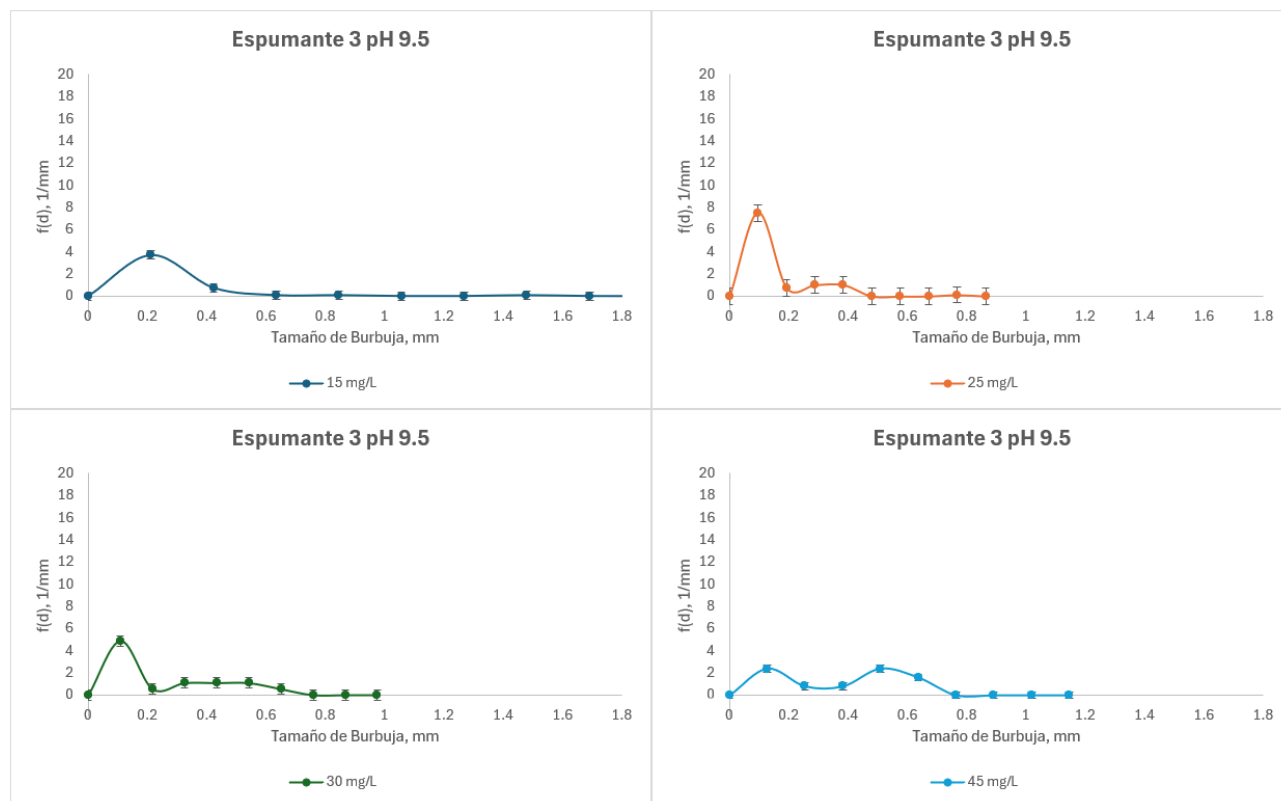


Figura 33. Distribución de tamaño de burbujas usando el Espumante 3 (MIBC, PPG-éter, Éter de glicol) a diferentes dosificaciones (Fuente: Elaboración propia).

En el caso del espumante 4 (Figura 34), la distribución se desplaza hacia tamaños pequeños en todas las concentraciones, evidenciando una alta capacidad de fragmentación del gas, aunque con limitada estabilidad del sistema. A 15 mg/L, la distribución es heterogénea, con burbujas entre 0.11 y 0.57 mm. A 25 mg/L, se observa una distribución muy estrecha, con un máximo dominante en ≈ 0.07 mm, indicativo de una fuerte acción tensoactiva; sin embargo, la generación de películas líquidas muy delgadas limita la estabilidad de la espuma. A 30 mg/L, predominan tamaños finos (0.08–0.39 mm), con ligera mejora en la uniformidad. Finalmente, a 45 mg/L, la distribución se concentra casi exclusivamente en tamaños ultrafinos (0.03–0.13 mm), con un pico marcado en 0.03 mm, lo que refleja sobredosificación y una mayor susceptibilidad a drenaje rápido y ruptura.

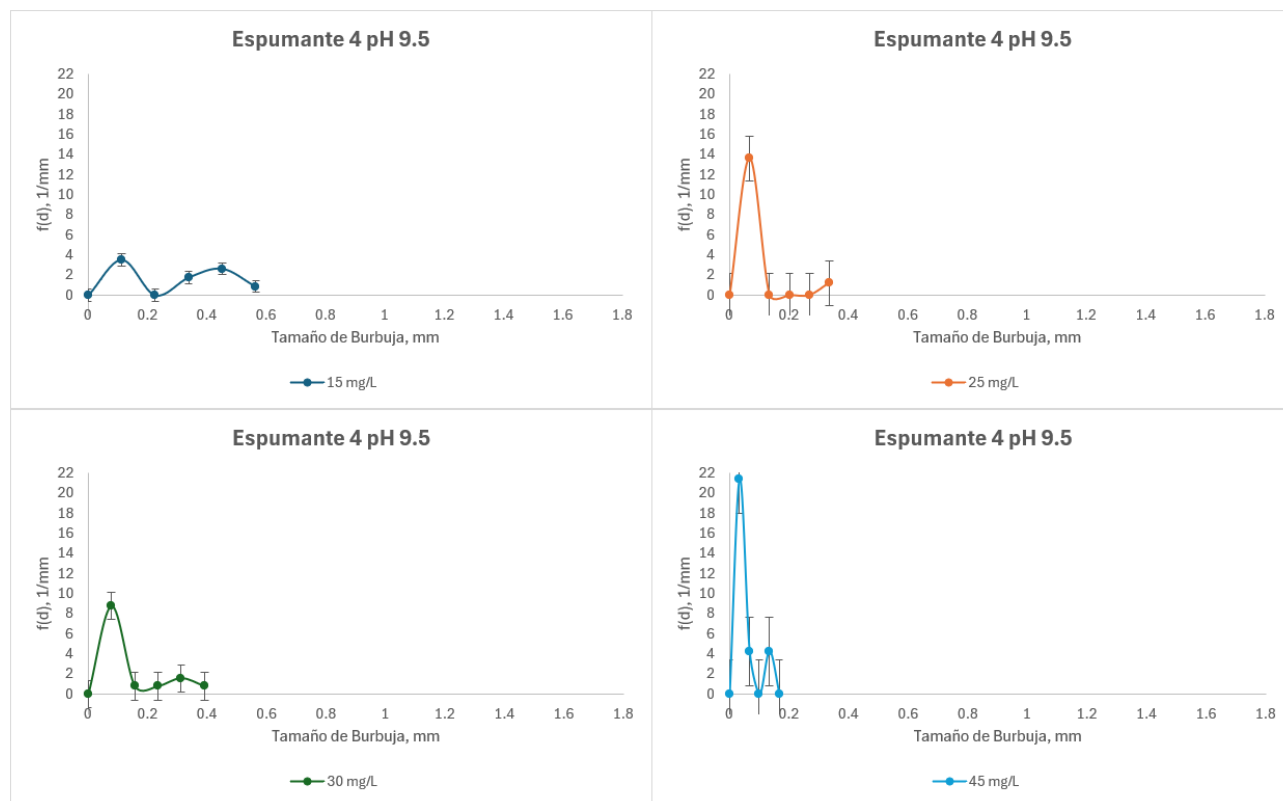


Figura 34. Distribución de tamaño de burbujas usando el Espumante 4 (Éteres de glicol, alcohol ramificado) a diferentes dosificaciones (Fuente: Elaboración propia).

El MIBC (Figura 35) presenta una distribución de tamaños de burbuja amplia a bajas concentraciones, que se desplaza hacia tamaños más finos al aumentar la dosificación. A 15 mg/L, la distribución abarca desde 0.23 hasta 1.17 mm, evidenciando burbujas medianas a grandes y una fragmentación del gas poco controlada. A 25 mg/L, la distribución se concentra principalmente en el rango 0.08–0.32 mm, con un aumento en la frecuencia de burbujas pequeñas, lo que refleja una mayor adsorción interfacial y una reducción parcial de la coalescencia; sin embargo, aún persiste una distribución de tamaños dispersa. A 30 mg/L, predominan burbujas finas en el rango 0.08–0.17 mm, con un máximo dominante en tamaños finos, indicando un régimen de mayor estabilidad de espuma; sin embargo, se detecta presencia de burbujas mayores (≈ 0.50 mm). Finalmente, a 45 mg/L, la distribución se mantiene principalmente entre 0.07 y 0.33 mm, con un leve ensanchamiento de la curva, lo que sugiere la proximidad a una zona de saturación interfacial, donde el aumento de concentración no mejora significativamente la uniformidad del tamaño de burbuja.

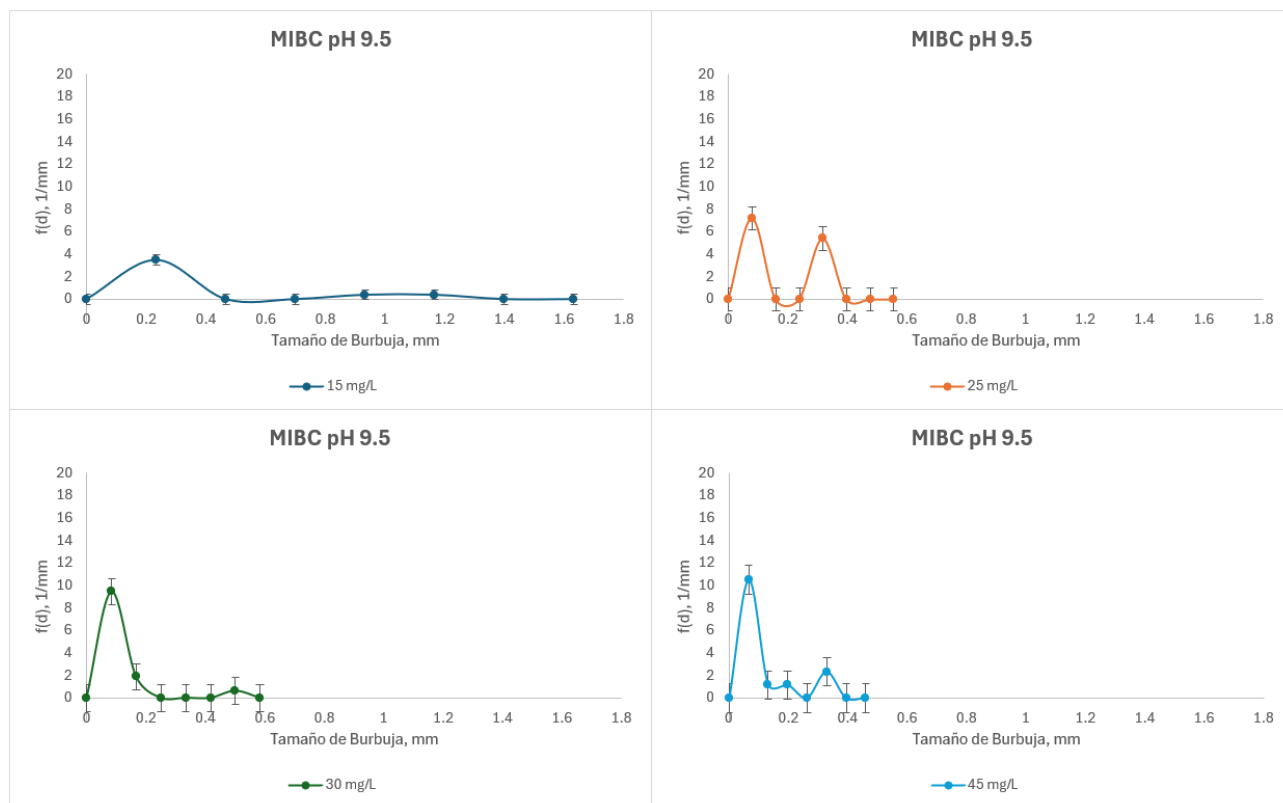


Figura 35. Distribución de tamaño de burbujas usando espumante (MIBC) a pH 9.5 (Fuente: Elaboración propia).

En la Tabla 9 se pueden observar los valores obtenidos del D32 para cada espumante.

Tabla 9. Distribución de tamaño de burbujas (D32) para los espumantes a pH 9.5 (Fuente: Elaboración propia).

	Espumante 1	Espumante 2	Espumante 3	Espumante 4	MIBC
Conc. (mg/L)	D32 (mm)	D32 (mm)	D32 (mm)	D32 (mm)	D32 (mm)
15	0.53	0.41	0.58	0.39	0.59
25	0.25	0.22	0.36	0.17	0.32
30	0.21	0.21	0.36	0.14	0.31
45	0.20	0.21	0.34	0.14	0.30

En la Figura 36 se muestran los resultados del D32 en función de las concentraciones de los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC a pH 9.5. Para los valores obtenidos en esta prueba ver Anexo N°3.

Como se observa en la Figura 36, el espumante 1 presenta, junto con el espumante 4, la reducción más pronunciada del tamaño medio de burbuja (D32). Este comportamiento se atribuye a su alto contenido de éteres, compuestos reconocidos por su capacidad para generar espumas

densas. La disminución abrupta del D32 al aumentar la concentración indica una supresión efectiva de la coalescencia, coherente con el comportamiento de espumantes de carácter hidrofílicos (Cho & Laskowski, 2002).

El espumante 2 muestra una estabilidad intermedia, generando burbujas pequeñas y una lámina de espuma suficientemente resistente para el transporte de mineral. Este comportamiento se explica por su elevada proporción de éter de butilglicol, que produce un efecto similar al del espumante 1; sin embargo, el D32 inicial es más bajo, lo que indica una generación de burbujas finas incluso a bajas concentraciones (Cho & Laskowski, 2002).

El espumante 3 presenta el mayor D32 a 15 mg/L (0.58 mm), lo que refleja una capacidad espumante moderada debido a su alta fracción de MIBC (60%). Con el aumento de la dosificación, la presencia de glicoles reduce progresivamente el tamaño de burbuja, dando lugar a burbujas de tamaño intermedio y a una espuma estable, pero no excesivamente densa.

El espumante 4, cuya formulación está dominada por éteres de alcohol/glicol y alcohol ramificado, presenta valores bajos de D32 debido a su elevada capacidad para reducir la tensión superficial y limitar la coalescencia. No obstante, al tratarse de un espumante basado en glicoles de mayor peso molecular, genera películas líquidas delgadas, con alta tasa de drenaje y baja altura de espuma, lo que afecta negativamente las recuperaciones (Fuerstenau et al., 2007).

En el caso del MIBC, los valores de D32 son coherentes con lo reportado para alcoholes ligeros utilizados como espumantes en flotación. El aumento de la concentración genera una disminución sostenida del tamaño medio de burbuja, debido a una mayor cobertura interfacial que reduce la energía requerida para la formación de nuevas interfaces. Esta relación inversa entre concentración de espumante y tamaño de burbuja ha sido ampliamente documentada (Finch & Dobby, 1990; Laskowski, 2007a). En los resultados se observa una reducción más marcada del D32 entre 25 y 30 mg/L, rango asociado al establecimiento de una cobertura superficial más completa y a un régimen de burbujas más estable.

A partir del comportamiento del D32 en función de la concentración de espumante, se determinó la CCC para cada sistema. Esta se identificó como el punto de transición entre el régimen de disminución pronunciada del D32 y la zona de estabilización, empleando el método de intersección de rectas ajustadas a ambos regímenes, lo que indica la saturación de la interfase líquido–gas y la inhibición efectiva de la coalescencia. El espumante 1 presenta su CCC de 30.5 mg/L, ya que por sobre esta dosificación el D32 no muestra variaciones significativas, evidenciando que la cobertura interfacial suficiente se alcanza recién a concentraciones relativamente elevadas. En el caso del espumante 2, la CCC se ubica en 26.3 mg/L, lo que refleja una saturación interfacial

más rápida y un alto poder anticoalescente. El espumante 3 alcanza su CCC en 40 mg/L, valor considerablemente superior al resto de los sistemas, lo cual se asocia a su menor eficiencia tensioactiva, evidenciada por la baja reducción de la tensión superficial. Su alta proporción de MIBC (60%), combinada con un contenido limitado de PPG-éter (10%) y éter de glicol (30%), genera una adsorción interfacial menos efectiva y más heterogénea, requiriendo mayores concentraciones para inhibir la coalescencia de burbujas. Para el espumante 4, la CCC se identificó en 27 mg/L, indicando que, pese a generar burbujas de menor tamaño, requiere una dosificación relativamente mayor para controlar la coalescencia, lo que concuerda con la baja estabilidad de espuma observada experimentalmente. Finalmente, el MIBC presenta una CCC de 27.2 mg/L, comportamiento típico de espumantes alcohólicos simples, donde el control de la coalescencia es moderado y depende fuertemente de la dosificación.

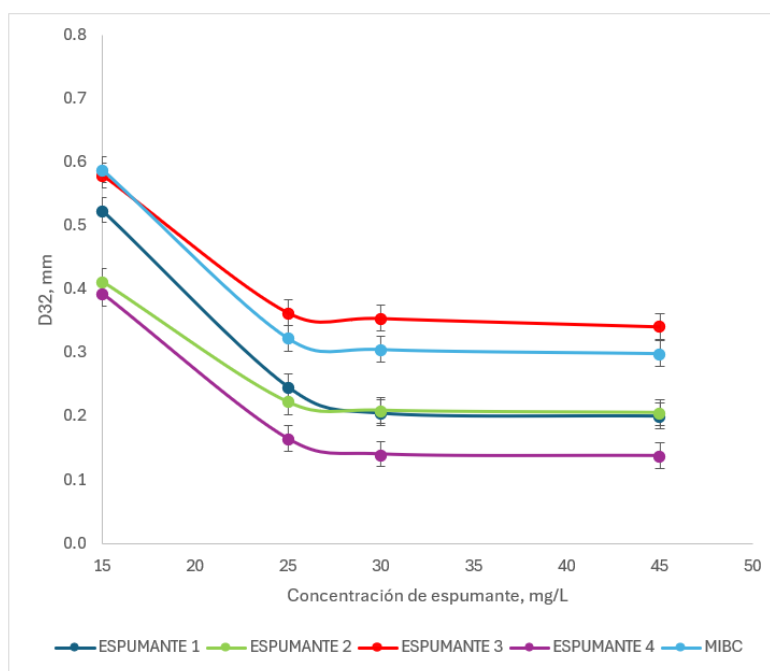


Figura 36. D32 en función de la concentración de espumante a pH 9,5 (Fuente: Elaboración propia).

4.4. Recuperación de agua

Las Figuras 37, 38 y 39 muestran los resultados de recuperación de agua obtenidos para los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC, relacionados directamente con el tiempo (Anexo N°4). Los resultados de recuperación de agua obtenidos en sistema bifásico líquido-gas muestran diferencias muy marcadas entre los espumantes evaluados, evidenciando la fuerte influencia que ejerce la composición química de cada mezcla sobre la estabilidad de la espuma.

En la Figura 37a, el espumante 1 muestra recuperaciones entre 721 y 959 g durante los primeros cinco minutos, indicando una espuma altamente estable con película líquida gruesa y

drenaje reducido. Esto se atribuye a su composición, donde el BGE y PPG-éter favorecen films lamelares resistentes, con adsorción estructurada y persistente en la interfaz líquido-gas, disminuyendo la velocidad de drenaje y prolongando la vida de la espuma (Laskowski, 2007a).

Mientras que el espumante 2 (Figura 37b) presenta recuperaciones muy similares, confirmando estabilidad de espuma, aunque con película ligeramente menos viscosa por su mayor proporción de BGE y menor PPG-éter. Aun así, supera ampliamente al MIBC, consistente con estudios que muestran que los éteres de glicol generan películas interfaciales más persistentes y menos drenantes que los alcoholes alifáticos (Zanin et al., 2009).

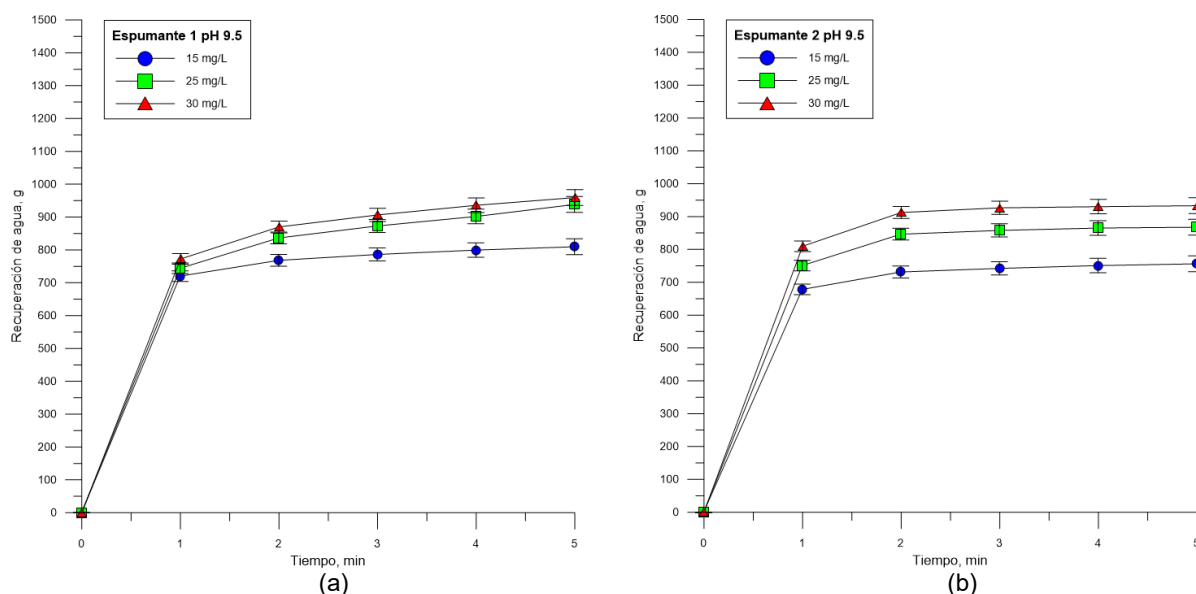


Figura 37. Agua recuperada en función del tiempo a diferentes concentraciones utilizando (a) Espumante 1 (MIBC, PPG-éter, BGE) y (b) Espumante 2 (MIBC, PPG-éter, BGE), a pH 9.5 (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 38a, el espumante 3 presenta recuperaciones intermedias, entre 504 y 759 g, reflejando espuma de estabilidad moderada. Su comportamiento se explica por la mezcla de 60% MIBC, que mantiene drenaje rápido, y 30% éter de glicol más 10% PPG-éter, que aportan cierta estabilización. Esto coincide con la literatura, que señala que mezclas dominadas por alcoholes de cadena corta forman espumas más drenantes, incluso con pequeñas fracciones de compuestos estructurantes (McFadzean et al., 2016).

Mientras que el espumante 4 (Figura 38b), exhibe recuperaciones extremadamente bajas (103-243 g), indicando espuma poco estable y altamente drenante, característica de espumantes basados en alcoholes ramificados, los cuales producen burbujas con paredes delgadas y drenaje rápido. La presencia de éteres de alcohol tampoco contribuye de manera significativa a la estabilización, ya que estos compuestos tienen menor capacidad de aumentar la viscosidad interfacial.

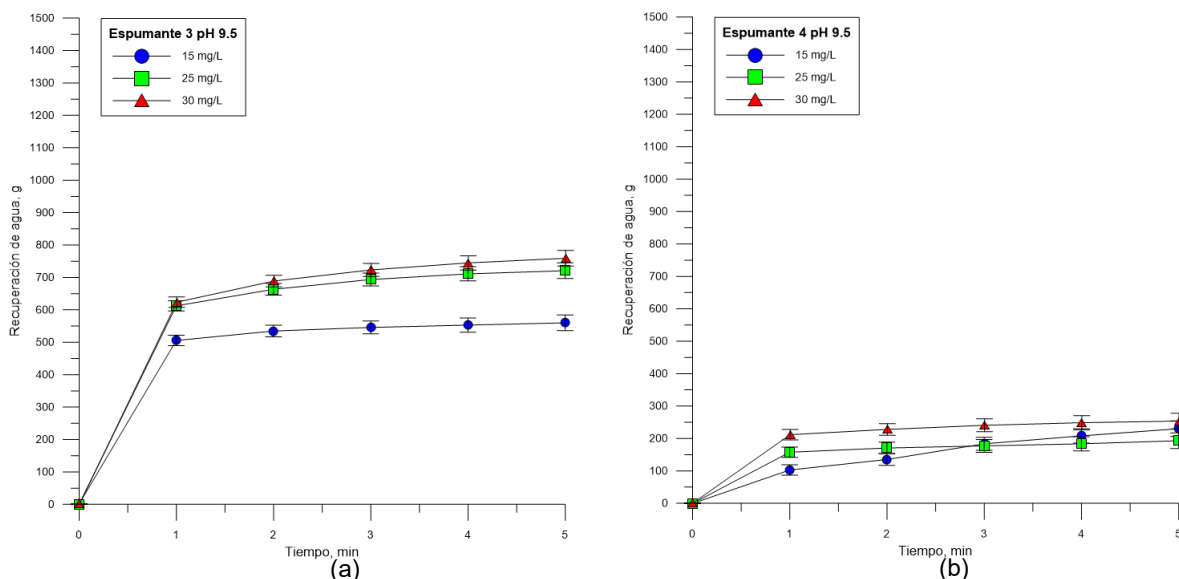


Figura 38. Agua recuperada en función del tiempo a diferentes concentraciones utilizando (a) Espumante 3 (MIBC, PPG-éter, Éter de glicol) y (b) Espumante 4 (Éteres de glicol, alcohol ramificado), a pH 9.5 (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 39, el MIBC presenta una espuma poco estable, con recuperaciones entre 241 y 546 g, consistente con su baja viscosidad interfacial y rápida desorción desde la interfaz. Este rango coincide con lo reportado por (Finch & Nasset, 2012) para celdas < 5 L, reafirmando que el MIBC, si bien es industrialmente útil para generar un proceso más selectivo con espumas livianas y controlables, no asegura estabilidad. Comparativamente, todas las mezclas excepto el espumante 4 superan al MIBC en recuperación de agua, destacando los espumantes 1 y 2, que duplican o triplican sus valores. Este comportamiento favorece la estabilidad de la espuma; sin embargo, afecta la selectividad del proceso de flotación, aumentando el arrastre de ganga hacia el concentrado.

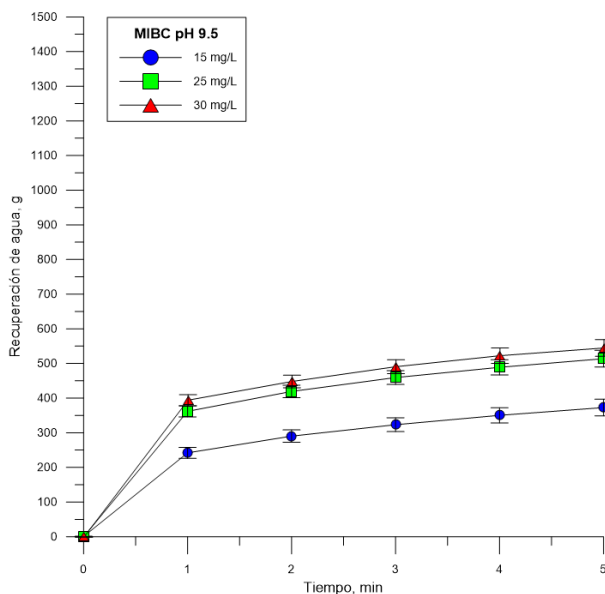


Figura 39. Agua recuperada en función del tiempo a diferentes concentraciones (MIBC) para pH 9.5 (Fuente: Elaboración propia).

4.5. Efecto de la R_w sobre la RCu y la ley del concentrado

La Figura 40 nos muestra la recuperación de cobre en función de la recuperación en peso, para los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC a pH 9.5 (valores en Anexo N°5). En todos los espumantes se observa una relación directa entre la recuperación de cobre y la recuperación en peso, es decir, al aumentar la dosificación de espumante aumenta el arrastre de material hacia el concentrado, lo que se traduce en mayores valores de R_w y, simultáneamente, en un incremento de la recuperación metálica.

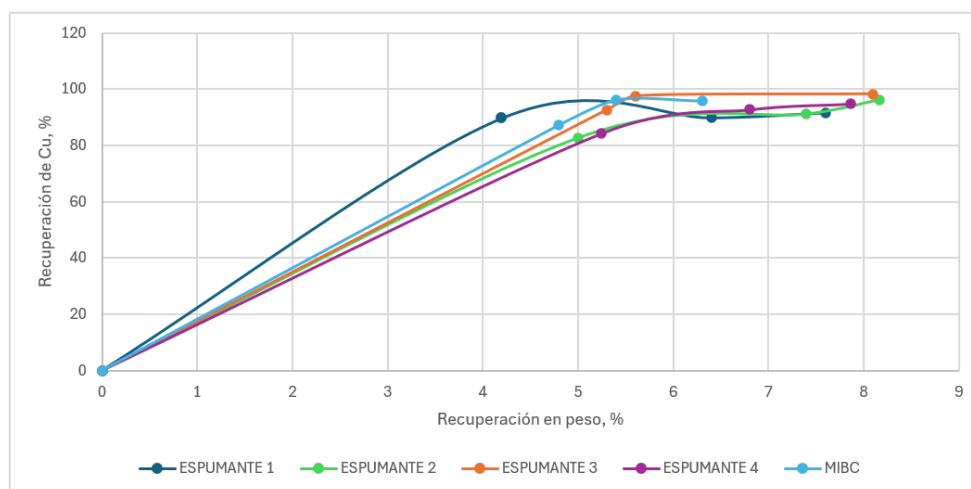


Figura 40. R_{Cu} en función de la R_w para los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC a pH de 9.5 (Fuente: Elaboración propia).

Como se observa en la Figura 40, el espumante 1 muestra un incremento moderado y progresivo de la recuperación de cobre ($\approx 89.8 \rightarrow 91.7$ %) acompañado de un aumento gradual de la recuperación en peso ($4.2 \rightarrow 7.6$ %). Este comportamiento indica un control relativamente estable del arrastre, donde el aumento de R_w contribuye principalmente a la recuperación de Cu sin un salto brusco en la masa recuperada. Gracias a su contenido de BGE y PPG-éter, forma películas lamelares más viscosas que reducen el drenaje y permiten retener más partículas hidrofóbicas.

El espumante 2 presenta una fuerte mejora en la recuperación de cobre al aumentar la dosificación, alcanzando valores superiores al 96 % a 30 g/t, junto con un incremento de R_w hasta 8.16 %. Esto sugiere una alta eficiencia de captura de Cu, aunque con un aumento más marcado del arrastre de masa, especialmente a mayores concentraciones. Su alto contenido de BGE explica esta sensibilidad a la sobredosificación.

El espumante 3 destaca por alcanzar altas recuperaciones de cobre incluso a bajas recuperaciones en peso, especialmente a 15 y 25 g/t ($RCu > 92$ % con $R_w \approx 5$ -5.6 %), la combinación de 60% MIBC y 40% glicoles mejora la estabilidad, compensando parcialmente el drenaje y logrando una recuperación final elevada. Este comportamiento es indicativo de una alta selectividad, donde

el aumento de recuperación metálica no está dominado por el arrastre mecánico, sino por una eficiente adhesión partícula–burbuja. A 30 g/t, el aumento de R_w hasta 8.1 % se asocia a una ganancia marginal de RCu , sugiriendo el inicio de un régimen de mayor arrastre.

El espumante 4 presenta un comportamiento intermedio, con incrementos simultáneos de RCu (84.2 → 94.8 %) y R_w (5.24 → 7.86 %). La pendiente del incremento de R_w es más marcada que en el espumante 1, lo que sugiere que el aumento de recuperación metálica está parcialmente asociado al arrastre de masa.

Por último, al aumentar la dosificación del MIBC desde 15 a 25 g/t se observa un incremento significativo de la recuperación de cobre, acompañado de un aumento moderado de la recuperación en peso. Sin embargo, al incrementar la concentración hasta 30 g/t, la recuperación de cobre se mantiene prácticamente constante, mientras que la recuperación en peso continúa aumentando. Este comportamiento evidencia que el sistema alcanza una condición cercana a saturación del espumante, donde mayores dosificaciones de MIBC no generan mejoras sustanciales en la recuperación metálica, pero sí favorecen el arrastre mecánico, lo cual es consistente con el comportamiento clásico del MIBC descrito en la literatura.

La Figura 41, muestra la variación de la ley de Cu en el concentrado en función de la R_w de los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC a pH 9.5. En términos generales, se observa una tendencia decreciente de la ley de Cu al aumentar la recuperación en peso, comportamiento típico asociado al incremento del arrastre mecánico de ganga a mayores dosificaciones de espumante. Para los valores obtenidos, ver Anexo N°5. A mayor estabilidad y densidad de espuma, mayor arrastre de ganga y menor ley, relación que se observa claramente en los resultados.

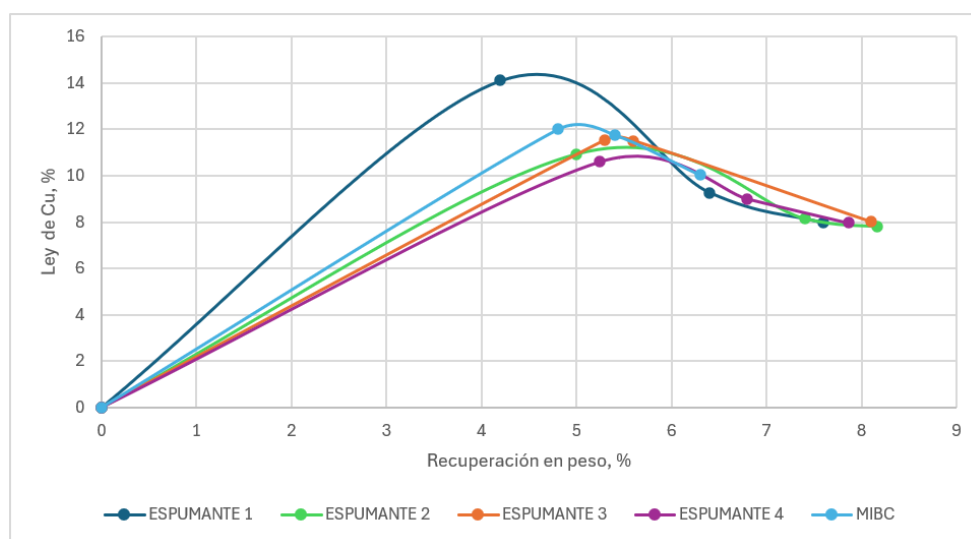


Figura 41. Ley de concentrado de Cu en función de la R_w para los espumantes 1, 2, 3, 4 y MIBC a pH de 9.5 (Fuente: Elaboración propia).

El espumante 1 presenta una fuerte caída de ley al aumentar la R_w , pasando de 14.11% a 7.96% cuando la recuperación en peso aumenta de 4.2% a 7,6%. Este comportamiento indica que, si bien el espumante incrementa la estabilidad de la espuma, lo hace a expensas de la selectividad, favoreciendo el arrastre de partículas hidrofílicas hacia el concentrado, reflejando su capacidad de retener agua y sólidos no valiosos, característica de espumas densas y poco drenantes formadas por glicoles y PPG-éter (Zhang et al., 2012). Sin embargo, su efecto en recuperación indica que es una mezcla eficiente si se busca maximizar extracción sin priorizar selectividad.

El espumante 2 muestra una disminución progresiva y relativamente controlada de la ley de Cu (de 10.92% a 7.79%) a medida que aumenta la R_w . El compromiso entre recuperación en peso y ley es más equilibrado que en el espumante 1, aunque sigue evidenciando pérdida de selectividad a dosificaciones elevadas. Su comportamiento metalúrgico es consistente con su capacidad para formar espumas muy estables que arrastran partículas finas y agua. Es una mezcla que maximiza recuperación pero compromete la selectividad.

El espumante 3 destaca por mantener leyes altas y estables a bajas dosificaciones ($\approx 11.5\%$ entre 15 y 25 g/t, con $R_w \sim 5.3-5.6\%$), lo que indica una alta selectividad inicial. Sin embargo, al aumentar la dosificación a 30 g/t, la ley cae abruptamente a 8.01%, coincidiendo con un aumento significativo de la recuperación en peso.

El espumante 4 presenta una tendencia intermedia, con una caída gradual de la ley desde 10.60% a 7.96% al aumentar la R_w . Si bien mejora la R_w , no logra mantener leyes elevadas, lo que indica una selectividad moderada y un control limitado del arrastre a altas dosificaciones.

Finalmente, el MIBC exhibe el mejor compromiso entre ley y recuperación en peso. Aun cuando la R_w aumenta de 4.8% a 6.3%, la ley de Cu se mantiene relativamente alta, disminuyendo solo de 12.01% a 10.05%. Esto confirma su comportamiento típico como espumante alcohólico selectivo, capaz de generar espumas suficientemente estables sin promover excesivamente el arrastre mecánico.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de tensión superficial muestran diferencias claras entre las formulaciones. El espumante 4 presenta la menor tensión superficial, seguido por MIBC, 2, 1 y, finalmente, 3 con el valor más alto. Este orden indica que 4 tiene la mayor actividad tensioactiva a las concentraciones ensayadas, mientras que 3 es el menos eficiente reduciendo la tensión superficial.

El análisis del DFI y r_t evidencian que los espumantes 1 y 2 poseen una elevada capacidad para generar y mantener espumas estables, particularmente a pH 11.5. El espumante 3 presenta una estabilidad intermedia. El espumante 2 alcanza el valor más alto de DFI, lo que indica una espuma altamente persistente. En contraste, el espumante 4 presenta el valor más bajo de DFI y r_t , confirmando su escasa capacidad de estabilización de espuma. El MIBC, en comparación, presenta valores bajos de DFI y r_t dentro del rango de dosificaciones evaluado, lo que se atribuye a una condición de subdosificación relativa, ya que este espumante requiere concentraciones más elevadas para desarrollar plenamente su capacidad de estabilización de espuma.

El estudio del D32 confirma que el aumento de la concentración reduce el tamaño de burbuja hasta la saturación interfacial (CCC). Los espumantes 1 y 2 producen burbujas más finas y uniformes que el MIBC; el espumante 3 genera tamaños intermedios, adecuados para favorecer la colisión partícula-burbuja sin generar una espuma excesivamente persistente. Mientras que el espumante 4 no logra estabilizar adecuadamente las burbujas pequeñas.

Los resultados en recuperación de agua evidenciaron que una espuma más estable incrementa el arrastre mecánico. En este sentido, los espumantes 1 y 2 muestran los valores más altos, seguidos del espumante 3 con valores intermedios, mientras que el espumante 4 y MIBC presentan los valores más bajos. Esto confirma que 3 logra un compromiso entre estabilidad y control de arrastre, mientras que 1 y 2 tienden a generar un arrastre no selectivo más elevado.

Las pruebas metalúrgicas de flotación indican que los espumantes 1 y 2 incrementan la RCu al aumentar la Rw , pero con una disminución marcada de la ley del concentrado, lo que evidencia un aumento del arrastre mecánico y una menor selectividad a altas dosificaciones. El espumante 3 presenta el mejor compromiso a bajas Rw , combinando altas RCu con leyes elevadas, aunque este comportamiento se deteriora a mayores Rw . El espumante 4 muestra un desempeño más limitado, con incrementos moderados de RCu acompañados de una pérdida sostenida de ley. Por su parte, el MIBC exhibe un aumento controlado de la RCu con Rw relativamente bajas, manteniendo las leyes más estables, lo que confirma su carácter más selectivo frente a las mezclas evaluadas.

En términos globales, se concluye que las formulaciones evaluadas no logran superar al MIBC en todos los parámetros, sino que presentan ventajas parciales según el criterio de evaluación: 1 y

2 destacan por su alta estabilidad de espuma, 3 por un comportamiento intermedio, y 4 resulta inadecuada para la flotación bajo las condiciones estudiadas. Por tanto, las mezclas desarrolladas son técnicamente viables, pero requieren optimización antes de considerar un reemplazo industrial directo del MIBC.

Recomendaciones

Se recomienda profundizar el estudio de los espumantes 1 y 2, debido a su alto potencial espumante, ajustando sus proporciones para disminuir el arrastre mecánico sin perder la estabilidad de la espuma. En particular, se sugiere realizar barridos de concentración más acotados en el entorno de sus CCC para determinar rangos óptimos de operación.

Se propone evaluar nuevas formulaciones híbridas a partir de combinaciones entre componentes de los espumantes 2 y 3, buscando un equilibrio entre estabilidad, tamaño de burbuja y selectividad metalúrgica.

Se recomienda realizar ensayos adicionales bajo condiciones más cercanas a planta, considerando variaciones de carga sólida, velocidad superficial de gas (J_g), aguas de proceso reales, circuitos múltiples (rougher–cleaner–scavenger), arrastre hidráulico (*entrainment*) y lavado de espuma, para evaluar el comportamiento industrial y su impacto en recuperación y selectividad.

Se sugiere incorporar estudios de compatibilidad con distintos colectores, modificadores y depresores, además de analizar la estabilidad química de las mezclas a largo plazo.

Se recomienda incluir variables económicas y de impacto ambiental en futuros estudios, con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica y económica frente al MIBC. Esto incluye determinar el costo unitario por punto de recuperación adicional, consumo específico (g/t), impacto en los costos operacionales (OPEX) y evaluar posibles sobreconsumos asociados a espumas altamente estables, como mayores requerimientos de lavado de espuma o pérdidas por arrastre de agua.

Desde el punto de vista ambiental, resulta igualmente relevante evaluar la toxicidad, biodegradabilidad, persistencia en el medio y posibles efectos en circuitos de recirculación de agua, ya que una formulación químicamente eficiente pero ambientalmente desfavorable puede limitar su aplicación industrial por normativas ambientales. La integración de variables técnico-económicas y ambientales permitiría realizar una evaluación integral de factibilidad, importante para proyectar estas formulaciones desde el laboratorio hacia una eventual escala piloto o industrial.

BIBLIOGRAFÍA

- Adamson, A., & Gast, A. (1997). *Physical Chemistry of Surfaces*.
- Ahmed, N., & Jameson, G. (1989). *Flotation Kinetics. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*.
- Allendes, M. (2009). *Implementación de una metodología para selección de espumantes de flotación*.
- Álvarez, J., Gómez, C., & Wen, L. (2014). *Caracterización de la dispersión de gases de una celda de flotación mecánica de laboratorio*. www.onlinedoctranslator.com
- Bulatovic, S. (2007). *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice Flotation of Sulfides Ores*.
- Carrera, A., Rodríguez, F., & González, J. (2013). *Aplicación de tecnologías limpias en la metalurgia a través del diseño de recipientes industriales*. *Revista de Metalurgia*, 405–415.
- Castro, S. (2003). *Influencia de los espumantes en la flotación de minerales sulfurados*. *Universidad de Chile*.
- Cho, Y., & Laskowski, J. (2002). *Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability*. *Int. J. Miner. Process*, 64, 69–80. www.elsevier.com/locate/ijminpro
- Clariant. (2023). *Corporate*.
- Crozier, R. (1978). *Flotation: Theory, Reagents and Ore Testing*.
- Crozier, R. (1992). *Flotation: Theory, Reagents and Ore Testing*. Pergamon Press.
- Dai, Z., Fornasiero, D., & Ralston, J. (1999). *Particle-bubble attachment during mineral flotation: The role of hydrophobicity*. *Minerals Engineering*.
- Finch, J., & Dobby, G. (1990). *Column Flotation*. Pergamon Press.
- Finch J., & Nasset, J. (2012). *Benchmarking Tool for Assessing Flotation Cell Performance*.
- Fuerstenau, M., Jameson, G., & Yoon, R. (2007). *Froth Flotation: A Century of Innovation*. *Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME)*.
- Fuerstenau, M., & Han, K. (2003). *Principles of Mineral Processing*. *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME)*.
- Fuerstenau, M., & Miller, C. (1967). *The Role of Collectors in the Flotation of Sulfide Minerals*. *Mining and Metallurgy*.
- Gomez, & Finch, J. (2002). *Bubble size measurement in flotation machines*. *Minerals Engineering*.
- Gutiérrez, L. (2017). *Flotacion de sulfuros*.
- Khoshdast H., & Sam, A. (2011). *Flotation Frothers: Review of Their Classifications, Properties and Preparation*.
- Klimpel, R. (1995). *The influence of frother type on the flotation of ores*. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*.
- Klimpel, R., & Hansen, R. (1991). *Frother partitioning in dual-frother systems: Development of analytical methods*.

- Laskowski, J. (1998a). *Frothers and Frothing, Frothing in Flotation II: Recent Advances in Coal Processing*. CRC Press.
- Laskowski, J. (1998b). *Fundamental principles of frother action in flotation*.
- Laskowski, J. (2001). *Developments in Mineral Processing: Coal Flotation and Fine Coal Utilization*.
- Laskowski, J. (2003a). *Froth Flotation: Amer Chemical Society*.
- Laskowski, J. (2003b). *Fundamental properties of flotation frothers. Proceedings of the 22nd International Mineral Processing Congress (IMPC)*.
- Laskowski, J. (2007a). *Current understanding of the mechanism of polysaccharide adsorption at the mineral/aqueous solution interface*.
- Laskowski, J. (2007b). *Frothers and Frothing*
- Laskowski, J. (2003c). *Frothing in Flotation*. Elsevier.
- Laskowski, J. (2004). *Testing Frothers: The Persistence of Froth Test. Separation Science and Technology*.
- Lisperguier, & Yianatos, J. (1998). *Estudio de efecto espumante de lignosulfonatos en flotación*.
- Bailey, C. Gómez, & Finch, J. (2005). *Development and application of an image analysis method for wide bubble size distributions. Minerals Engineering*.
- Malysa, K., Surowiak, A., & Laskowski, J. (1987). *Quantifying contributions to froth stability in porphyry copper plants. International Journal of Mineral Processing*.
- Mazahernasab, R., Ahmadi, R., & Ravanasa, E. (2020). *Direct Bubble Size Measurement in a Mechanical Flotation Cell by Image Analysis and Laser Diffraction Technique - A Comparative Study. Iranian Journal of Chemical Engineering*.
- McFadzean, B., Marozva, T., & Wiese, J. (2016). *Flotation frother mixtures: Decoupling the sub-processes of froth stability, froth recovery and entrainment. Minerals Engineering*.
- Melo, F., & Laskowski, J. S. (2006). *Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation. Minerals Engineering*, 19(6–8), 766–773.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.09.031>
- Mesa, D. (2015). *Estudio del efecto del tipo y concentración de espumante*.
- Paredes, B. (2012). *Determinación de la Distribución de Tamaño de Burbujas vía Análisis de Imágenes: Análisis y Alternativas*.
- Ramírez, A. (2024). *Metalúrgica Extractiva*.
- Rosen, & Kunjappu. (2012). *Surfactants and Interfacial Phenomena*.
- Schneider, Rasband, W., & Eliceiri, K. (2012). *NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nature Methods*.
- Schramm, L. (2014). *Foams: Fundamentals and Industrial Applications*.
- Schulze, H. (1984). *Physico-Chemical Elementary Processes in Flotation: Analysis from the Point of View of Colloid Science Including Process Engineering Considerations. Developments in Mineral Processing*.
- Szyszk, D. (2019). *Frother-Assisted Flotation of Different Origin Pyrites*.

- Vallebuona, G., Casali, A., Rodríguez, F., & Endara, D. (2008). *Distribuciones de tamaño de burbujas en celdas de flotación de laboratorio e industrial y modelación del efecto de las variables de operación. Revista de Metalurgia.*
- Wills, B., & Finch, J. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.*
- Xia, Y. (2000). *Dynamic Property Evaluation of Frother.*
- Yianatos, J., Contreras, F., & Díaz, F. (2010). *Gas holdup and RTD measurement in an industrial flotation cell. Minerals Engineering.*
- Yianatos, J. (2005). *Flotación de Minerales.*
- Yianatos, J., & Puelle, P. (1994). *Development and calibration of a flotation bubble size sensor.*
- Yoon, R., & Wang, D. (2001). *Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. International Journal of Mineral Processing.*
- Zanin, M., Wightman, E., & Grano, S. (2009). *Quantifying contributions to froth stability in porphyry copper plants. International Journal of Mineral Processing.*
- Zhang, W., Nasset, J., & Finch, J. (2014). *Correspondence of bubble size and frother partitioning in flotation. Journal of Central South University.*
- Zhang, W., Cappuccitti, F., & Finch, J. (2012). *Characterizing frothers through water carrying rate and froth stability. International Journal of Mineral Processing.*

ANEXOS

Anexo N°1: Datos de tensión superficial de los espumantes a diferentes pH.

Tabla 10. Tensión superficial del Espumante 1, a diferentes concentraciones.

Espumante 1 Tensión Superficial , mN/m				
mg/L	Tens. Sup. Agua	pH 9.5	pH 10	pH 11.5
0	74.3	74.3	74.3	74.3
15	74.3	65.8	69.9	68.2
25	74.3	62.0	63.0	64.0
30	74.3	66.9	65.5	67.2
45	74.3	67.6	68.2	66.1

Tabla 11. Tensión superficial del Espumante 2, a diferentes concentraciones.

Espumante 2 Tensión Superficial , mN/m				
mg/L	Tens. Sup. Agua	pH 9.5	pH 10	pH 11.5
0	74.3	74.3	74.3	74.3
15	74.3	66.6	66.5	66.9
25	74.3	60.0	62.0	65.3
30	74.3	61.0	66.4	65.6
45	74.3	60.5	66.7	65.7

Tabla 12. Tensión superficial del Espumante 3, a diferentes concentraciones.

Espumante 3 Tensión Superficial , mN/m				
mg/L	Tens. Sup. Agua	pH 9.5	pH 10	pH 11.5
0	74.3	74.3	74.3	74.3
15	74.3	73.1	73.0	72.9
25	74.3	71.0	72.9	72.7
30	74.3	72.5	72.7	72.5
45	74.3	72.1	73.1	68.2

Tabla 13. Tensión superficial del Espumante 4, a diferentes concentraciones.

Espumante 4 Tensión Superficial , mN/m				
mg/L	Tens. Sup. Agua	pH 9.5	pH 10	pH 11.5
0	74.3	74.3	74.3	74.3
15	74.3	51.8	52.1	52.3

25	74.3	51.5	52.0	52.1
30	74.3	51.0	51.9	52.0
45	74.3	50.6	52.0	51.8

Tabla 14. Tensión superficial de MIBC, a diferentes concentraciones.

MIBC Tensión Superficial , mN/m				
mg/L	Tens. Sup. Agua	pH 9.5	pH 10	pH 11.5
0	74.3	74.3	74.3	74.3
15	74.3	74.0	74.2	74.7
25	74.3	73.5	73.8	74.5
30	74.3	73.0	73.2	74.3
45	74.3	56.5	59.5	67.4

Anexo N°2: Datos del índice dinámico de espumabilidad (DFI)

Tabla 15. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 1, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.

Espumante 1	pH 9.5			pH 11.5		
	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L
Caudal de gas, L/min	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L
0.5	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04
1	0.07	0.09	0.09	0.10	0.11	0.15
2	0.24	0.33	0.34	0.29	0.40	0.51

Tabla 16. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 2, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.

Espumante 2	pH 9.5			pH 11.5		
	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L
Caudal de gas, L/min	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L
0.5	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04
1	0.06	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13
2	0.25	0.29	0.32	0.29	0.45	0.46

Tabla 17. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 3, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.

Espumante 3	pH 9.5			pH 11.5		
	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L
Caudal de gas, L/min	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L

0.5	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04
1	0.05	0.10	0.10	0.07	0.08	0.10
3	0.32	0.59	0.68	0.23	0.36	0.52

Tabla 18. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones del Espumante 4, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.

Espumante 4	pH 9.5			pH 11.5		
	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L
Caudal de gas, L/min	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L
0.5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
1	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
3	0.17	0.24	0.26	0.20	0.21	0.22

Tabla 19. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de MIBC, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.

MIBC	pH 9.5			pH 11.5		
	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L
Caudal de gas, L/min	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L	Volumen, L
0.5	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
1	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08
3	0.22	0.25	0.28	0.22	0.25	0.28

Tabla 20. Tiempo de retención versus concentración del Espumante 1, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.

Espumante 1	pH 9.5		pH 11.5		
	Ci, mol/L	rt, s	rt model, s	rt, s	rt model, s
15	8.982	9.076	10.812	10.619	
25	12.24	11.994	15.390	15.964	
30	12.774	12.936	19.02	18.635	

Tabla 21. Tiempo de retención versus concentración del Espumante 2, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.

Espumante 2	pH 9.5		pH 11.5		
	Ci, mol/L	rt, s	rt model, s	rt, s	rt model, s
15	9.504	9.457	10.17	10.645	
25	10.524	10.669	16.866	15.860	
30	11.370	11.272	17.424	18.028	

Tabla 22. Tiempo de retención versus concentración del Espumante 3, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.

Espumante 3	pH 9.5		pH 11.5		
	Ci, mol/L	rt, s	rt model, s	rt, s	rt model, s
15	7.500	7.979	4.962	5.474	
25	13.548	13.297	8.208	9.123	
30	15.990	15.956	11.970	10.947	

Tabla 23. Tiempo de retención versus concentración del Espumante 4, evaluada a pH 9.5 y pH 11.5.

Espumante 4	pH 9.5		pH 11.5		
	Ci, mol/L	rt, s	rt model, s	rt, s	rt model, s
15	3.588	3.613	4.392	4.388	
25	5.316	5.236	4.620	4.631	
30	5.820	5.875	4.758	4.750	

Tabla 24. Tiempo de retención versus concentración de MIBC, evaluado a pH 9.5 y pH 11.5.

MIBC	pH 9.5		pH 11.5	
Ci, mol/L	rt, s	rt model, s	rt, s	rt model, s
15	4.62	4.568	4.488	4.454
25	5.328	5.482	5.346	5.443
30	6.042	5.937	6.000	5.935

Anexo N°3: Datos de distribución de tamaño de burbujas D32.**Tabla 25.** Distribución de tamaño de burbuja para el Espumante 1 a pH 9.5.

Espumante 1 pH 9.5							
15 mg/L		25 mg/L		30 mg/L		45 mg/L	
Rango	fi/dx	Rango	fi/dx	Rango	fi/dx	Rango	fi/dx
mm		mm		mm		mm	
0	0	0	0	0	0	0	0
0.13	4.90	0.06	10.26	0.05	3.41	0.03	19.93
0.26	1.59	0.12	0.00	0.10	0.49	0.07	3.32
0.40	0.49	0.18	0.00	0.14	5.85	0.10	0.00
0.53	0.37	0.24	3.08	0.19	1.95	0.13	1.66
0.66	0.12	0.30	3.08	0.24	8.28	0.17	3.32
0.79	0.00	0.37	0.00	0.29	0.49	0.20	1.66
0.92	0.12	0.43	0.00	0.33	0.49	0.23	0.00
1.05	0.00	0.49	0.00	0.38	0.00	0.27	0.00
1.19	0.00	0.55	0.00	0.43	0.00	0.30	0.00

Tabla 26. Distribución de tamaño de burbuja para el Espumante 2 a pH 9.5.

Espumante 2 pH 9.5							
15 mg/L		25 mg/L		30 mg/L		45 mg/L	
Rango	fi/dx	Rango	fi/dx	Rango	fi/dx	Rango	fi/dx
mm		mm		mm		mm	
0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0.00	0.08	3.78	0.06	11.80	0.07	11.05
0.11	0.00	0.16	0.00	0.13	0.00	0.13	0.00
0.16	0.00	0.24	5.04	0.19	0.98	0.20	1.38
0.22	0.00	0.32	2.52	0.25	0.98	0.26	1.38
0.27	0.00	0.40	1.26	0.32	1.97	0.33	1.38
0.32	0.00	0.48	0.00	0.38	0.00	0.39	0.00
0.38	9.29	0.56	0.00	0.44	0.00	0.46	0.00
0.43	4.64	0.63	0.00	0.51	0.00	0.53	0.00
0.48	0.00	0.69	0.00	0.57	0.00	0.59	0.00
0.54	4.64	0.74	0.00	0.64	0.00	0.66	0.00

Tabla 27. Distribución de tamaño de burbuja para el Espumante 3 a pH 9.5.

Espumante 3 pH 9.5							
15 mg/L		25 mg/L		30 mg/L		45 mg/L	
Rango	fi/dx	Rango	fi/dx	Rango	fi/dx	Rango	fi/dx
mm		mm		mm		mm	
0	0	0	0	0	0	0	0
0.21	3.74	0.10	7.50	0.11	4.88	0.13	2.36
0.42	0.75	0.19	0.76	0.22	0.54	0.25	0.79
0.63	0.08	0.29	1.02	0.33	1.09	0.38	0.79
0.85	0.08	0.38	1.02	0.43	1.09	0.51	2.36
1.06	0.00	0.48	0.00	0.54	1.09	0.64	1.57
1.27	0.00	0.58	0.00	0.65	0.54	0.76	0.00
1.48	0.08	0.67	0.00	0.76	0.00	0.89	0.00
1.69	0.00	0.77	0.13	0.87	0.00	1.02	0.00
1.90	0.00	0.86	0.00	0.98	0.00	1.15	0.00

Tabla 28. Distribución de tamaño de burbuja para el Espumante 4 a pH 9.5.

Espumante 4 pH 9.5							
15 mg/L		25 mg/L		30 mg/L		45 mg/L	
Rango	fi/dx	Rango	fi/dx	Rango	fi/dx	Rango	fi/dx
mm		mm		mm		mm	
0	0	0	0	0	0	0	0
0.11	3.54	0.07	13.64	0.08	8.78	0.03	21.44
0.23	0.00	0.13	0.00	0.16	0.80	0.07	4.29

0.34	1.77	0.20	0.00	0.23	0.80	0.10	0.00
0.45	2.65	0.27	0.00	0.31	1.60	0.13	4.29
0.57	0.88	0.34	1.24	0.39	0.80	0.17	0.00

Tabla 29. Distribución de tamaño de burbuja para el MIBC a pH 9.5.

MIBC pH 9.5							
15 mg/L		25 mg/L		30 mg/L		45 mg/L	
Rango	fi/dx	Rango	fi/dx	Rango	fi/dx	Rango	fi/dx
mm		mm		mm		mm	
0	0	0	0	0	0	0	0
0.23	3.51	0.08	7.21	0.08	9.48	0.07	10.53
0.47	0.00	0.16	0.00	0.17	1.90	0.13	1.17
0.70	0.00	0.24	0.00	0.25	0.00	0.20	1.17
0.93	0.39	0.32	5.40	0.33	0.00	0.26	0.00
1.17	0.39	0.40	0.00	0.42	0.00	0.33	2.34
1.40	0.00	0.48	0.00	0.50	0.63	0.39	0.00
1.63	0.00	0.56	0.00	0.58	0.00	0.46	0.00

Operación de cámara fotográfica

La cámara Nikon D5100 debe estar en la modalidad de disparo MANUAL y se debe establecer la siguiente configuración en el SHOOTING MENU:

1. IMAGE QUALITY: JPEG FINE
2. IMAGE SIZE: LARGE
3. SET PICTURE CONTROL: MONOCHROME
4. HIGH ISO NR: NORMAL
5. ISO SENSITIVITY SETTING: 1250
6. Ajustar la abertura del diagrama (F) para que la velocidad de obturación sea (4.000).

La adquisición de imágenes se programó mediante la función *Interval Timer Shooting* configurada para capturar una fotografía cada 2 segundos hasta completar un total de 200 imágenes por ensayo y así evitar la duplicación de burbujas en la secuencia. En la Figura 40 se observan las imágenes de burbujas capturadas en el proceso de flotación, utilizando el Espumante 1.

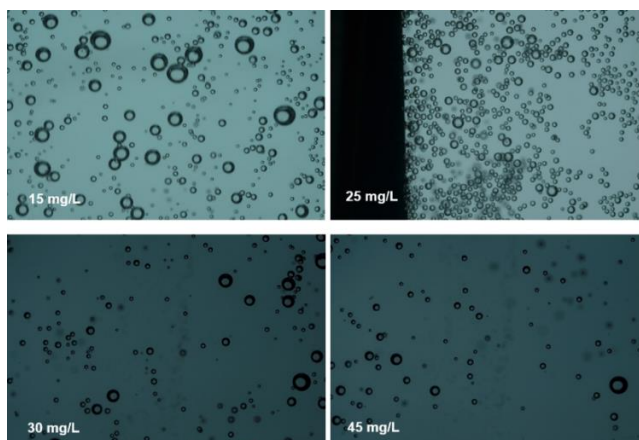


Figura 42. Fotos de las burbujas capturadas en el proceso de flotación con el Espumante 1 en diferentes concentraciones (Fuente: Elaboración propia).

Anexo N°4: Datos de recuperación de agua a diferentes concentraciones.

Tabla 30. Datos de recuperación de agua versus concentración del Espumante 1 a pH 9.5.

Espumante 1 pH 9.5			
	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L
t, min	Recuperación de agua, g	Recuperación de agua, g	Recuperación de agua, g
0	0	0	0
1	721	744	773
2	769	837	870
3	787	873	907
4	800	902	936
5	810	938	959

Tabla 31. Datos de recuperación de agua versus concentración del Espumante 2 a pH 9.5.

Espumante 2 pH 9.5			
	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L
t, min	Recuperación de agua, g	Recuperación de agua, g	Recuperación de agua, g
0	0	0	0
1	679	752	809
2	732	847	912
3	743	859	927
4	751	866	930
5	757	869	933

Tabla 32. Datos de recuperación de agua versus concentración del Espumante 3 a pH 9.5.

Espumante 3 pH 9.5			
--------------------	--	--	--

	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L
t, min	Recuperación de agua, g	Recuperación de agua, g	Recuperación de agua, g
0	0	0	0
1	504	613	623
2	534	664	688
3	545	694	723
4	552	712	744
5	559	722	759

Tabla 33. Datos de recuperación de agua versus concentración del Espumante 4 a pH 9.5.

Espumante 4 pH 9.5			
	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L
t, min	Recuperación de agua, g	Recuperación de agua, g	Recuperación de agua, g
0	0	0	0
1	103	158	211
2	136	171	227
3	184	178	240
4	209	184	248
5	231	193	253

Tabla 34. Datos de recuperación de agua versus concentración de MIBC a pH 9.5.

MIBC pH 9.5			
	15 mg/L	25 mg/L	30 mg/L
t, min	Recuperación de agua, g	Recuperación de agua, g	Recuperación de agua, g
0	0	0	0
1	241	362	395
2	290	420	449
3	323	460	492
4	350	489	523
5	372	514	546

Anexo N°5: Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas, R_{Cu} y R_w , a diferentes concentraciones.

Tabla 35. Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas y recuperaciones del Espumante 1 a pH 9.5.

Espumante 1 pH 9.5				
g/t	Ley concentrado Cu (%)	Ley colas Cu (%)	Recuperación Cu (%)	Recuperación en peso (%)

15	14.11	0.14	89.8	4.2
25	9.27	0.11	89.9	6.4
30	7.96	0.10	91.7	7.6

Tabla 36. Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas y recuperaciones del Espumante 2 a pH 9.5.

Espumante 2 pH 9.5				
g/t	Ley concentrado Cu (%)	Ley colas Cu (%)	Recuperación Cu(%)	Recuperación en peso (%)
15	10.92	0.14	82.7	5.0
25	8.14	0.12	91.2	7.4
30	7.79	0.13	96.3	8.2

Tabla 37. Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas y recuperaciones del Espumante 3 a pH 9.5.

Espumante 3 pH 9.5				
g/t	Ley concentrado Cu (%)	Ley colas Cu (%)	Recuperación Cu(%)	Recuperación en peso (%)
15	11.53	0.14	92.6	5.3
25	11.50	0.12	97.6	5.6
30	8.01	0.10	98.3	8.1

Tabla 38. Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas y recuperaciones del Espumante 4 a pH 9.5.

Espumante 4 pH 9.5				
g/t	Ley concentrado Cu (%)	Ley colas Cu (%)	Recuperación Cu(%)	Recuperación en peso (%)
15	10.60	0.17	84.2	5.2
25	9.00	0.14	92.7	6.8
30	7.96	0.14	94.8	7.9

Tabla 39. Datos de Leyes de Cu en concentrado, colas y recuperaciones del MIBC a pH 9.5.

MIBC pH 9.5				
g/t	Ley concentrado Cu (%)	Ley colas Cu (%)	Recuperación Cu(%)	Recuperación en peso (%)
15	9.98	0.11	87.3	4.8
25	11.87	0.14	96.3	5.4
30	12.55	0.13	95.9	6.3

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: EVALUACIÓN TÉCNICA DE FORMULACIONES ESPUMANTES PARA OPTIMIZAR LA ESTABILIDAD DE ESPUMA EN LA FLOTACIÓN DE MINERALES CUPRÍFEROS.

Nombre Memorista: Victoria Francisca Canio Altamirano

Modalidad	Investigación	Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto	Sobresaliente	Prof. Andrés Ramírez M.
Calificación	6.9	
Fecha	23/01/2026	
Prof. Froilán Vergara G.		Ingeniero Supervisor: Sr. Patricio Zárate
		Institución:

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Leopoldo Gutiérrez B.	Prof. Luver Echeverry V.
-----------------------------	--------------------------

Resumen

En esta memoria se evaluaron formulaciones espumantes orientadas a mejorar la estabilidad de la espuma en la flotación de un mineral sulfurado de cobre (0,66 % Cu; P80 = 205 μ m). Se desarrollaron cuatro mezclas: : Espumante 1 (50% MIBC, 20% PPG-éter, 30% BGE), Espumante 2 (20% MIBC, 10% PPG-éter, 70% BGE), Espumante 3 (60% MIBC, 10% PPG-éter, 30% éter de glicol) y Espumante 4 (60% Éteres de glicol y 40 % alcohol ramificado) y se compararon con MIBC mediante ensayos de tensión superficial, DFI, tamaño de burbuja (D32), recuperación de agua y pruebas de flotación. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en actividad tensioactiva y estabilidad de espuma, sin una relación directa entre menor tensión superficial y mayor estabilidad. Los espumantes 1 y 2 presentaron alta generación y persistencia de espuma, asociada a mayor arrastre mecánico y menor selectividad. El espumante 3 mostró un comportamiento intermedio, logrando un mejor compromiso entre recuperación de cobre y selectividad. El espumante 4 presentó el desempeño menos favorable. En términos globales, las formulaciones evaluadas presentan ventajas parciales frente al MIBC, demostrando que el diseño de mezclas de espumantes es una alternativa técnicamente viable, aunque requiere optimización para su aplicación industrial.