

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



METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Memoria presentada por:

JORGE NICOLÁS LAMILLA MONTTI

Como requisito para optar al título de:

INGENIERO CIVIL METALÚRGICO

Profesor guía:

Marco A. Vera

Valparaíso, Julio 2020

Título de la memoria

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Autor:

Jorge Nicolás Lamilla Montti

Trabajo de memoria presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Civil Metalúrgico de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Eng. Marco A. Vera

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la institución.

Julio 2020

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres (Cecilia y Jorge) por la oportunidad que me dieron de poder estudiar y por el apoyo incondicional que siempre obtuve de ellos, les agradezco su constante esfuerzo que pusieron en mí. En segundo me gustaría agradecer al departamento de metalurgia y materiales de la universidad por brindarme las herramientas necesarias para poder desenvolverme en el ámbito laboral. Por otro lado, me gustaría agradecer a Solvay, específicamente a Carmina, quienes patrocinaron y facilitaron las condiciones para poder ejecutar este estudio. Agradezco el apoyo del profesor Marco Vera, quien me ayudo y me acompañó en todo el proceso de análisis y escritura crítica del proyecto.

Finalmente agradecer a mi hermana, mi polola, a mis tíos y mis amigos cercanos quienes siempre estuvieron apoyándome y motivándome para terminar pronto mi etapa universitaria.

RESUMEN

En la presente investigación se desarrolló una metodología que permitió evaluar espumantes en un contexto de flotación batch. Esta tiene el potencial de ser transferida a una situación de operación en continuo a nivel comercial. La metodología se fundamenta en la medición de la concentración de aire (gas holdup, ε_g) en la zona de colección, la cual es una medida que es representativa del volumen de la pulpa. Este estudio arrojó resultados que permitieron relacionar la métrica del aire, desempeño metalúrgico y características de los diferentes surfactantes evaluados. La importancia que tuvo realizar este estudio radica en la oportunidad que ofrece a empresas del rubro minero evaluar la adición de reactivos de flotación de una forma representativa del contexto del proceso unitario (i.e., aire, líquidos y sólidos). Se espera que la propuesta de este proyecto de titulación se implemente en el quehacer diario de plantas de flotación y así poder optimizar la caracterización metalúrgica con nuevos aditivos.

Específicamente, se evaluaron cuatro tipos de espumantes (MIBC – F501 – F549 y F507) a diferentes concentraciones (5, 10, 15 y 20 ppm) en una celda de flotación batch (2,3 L) adaptada con electrodos (placas de acero inoxidable) las cuales se utilizaron para estimar el gas holdup a partir de la conductividad eléctrica. Se analizaron estos espumantes en sistema bifásico y trifásico (cinética de flotación), y de esta forma se pudo relacionar la métrica del aire con la metalurgia (e.g., recuperación, ley, constante cinética y selectividad). El diámetro de burbuja se determinó a partir de ecuaciones empíricas lo cual permitió relacionar dicho parámetro con la concentración de espumante, y así abordar el concepto de la concentración crítica de coalescencia (CCC). Este proyecto fue mandatado por la empresa Solvay Chile, la cual patrocinó la investigación de esta memoria de titulación.

Se determinó que el tipo y concentración de espumantes tienen un efecto significativo sobre la métrica del aire y a su vez un efecto sobre la metalurgia (i.e., recuperación de Cu, Ley, constante cinética, entre otras). Se identificó que los sólidos tienen un efecto sobre el gas holdup, aumentándolo. Se introdujo un modelo el cual permitió obtener valores de gas holdup asociado a la ausencia de espumante y cuando el valor es igual

al CCC. Esto es una contribución ya que permite la estimación de CCC sin medir tamaño de burbujas.

ABSTRACT

This thesis study was developed a methodology to evaluate frothers at laboratory batch flotation scale. This proposed approach has the potential to be transferred to a continuously operated flotation system at commercial level.

The methodology was based on the continuous measurement of gas hold-up (ε_g) in the flotation collection zone. This measurement captures a significant pulp volume within the flotation cell which represents very well the pulp zone from an air dispersion viewpoint. Therefore, air metric within the flotation reactor can be related to the metallurgical performance obtained with different physico-chemical conditions (i.e., surfactants or frothers).

The importance of this study was to establish a standardized protocol to evaluate the effect of flotation chemical reagents (i.e., frothers) on metallurgical performance. It is expected that this investigation helps plant operators optimize plant performance when new reagents are used.

The Project evaluated four types of flotation frothers (namely, MIBC, F501, F549 and F507) at different concentrations (viz., 5, 10, 15 and 20 ppm) in a batch laboratory flotation cell (2.3 L). Plate electrodes (stainless steel) were mounted inside the flotation cell. These electrodes were used to measured electrical conductivity which was used to determine gas hold-up (by means of Maxwell equation). Two-phase and three-phase experiments were conducted. The latter did allow metallurgical performance (i.e., kinetic, recovery, grade and selectivity) to be related to air metric.

Bubble size diameter (D_b) was inferred using semi-empirical air related flotation relationships. Having obtained D_b , it was possible to explore the relationship with frother concentration, and thus determine the frother critical coalescence concentration (CCC). This project was sponsored by Solvay Chile.

It was learned that the frother type and concentration influenced the air metric, and consequently, the metallurgical performance (i.e., copper recovery, grade, kinetic rate constant, among others). It was also observed that solids (i.e., particles) affected gas hold-up (increasing it). Additionally, a three-parameter semi-empirical model was derived. Parameter 1, a gas hold-up value without frother was identified, Parameter 2, a gas hold-up value at CCC frother concentration was regressed, and Parameter 3, frother related value was also included. This model helps estimate the value of CCC without measuring bubble size which is a significant contribution because the estimate is based on a well-represented gas hold-up measurement.

INDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	19
1.1. Introducción General	19
1.2. Definición del problema	20
1.3. Hipótesis.....	20
1.4. Objetivos.....	21
1.4.1. Objetivo General	21
1.4.2. Objetivos específicos	21
1.5. Estructura de la memoria.....	21
2. CAPÍTULO 2. REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA	23
2.1. Introducción al proceso de flotación	23
2.2. Reactivos de flotación	24
2.2.1. Colectores.....	24
2.2.2. Reactivos Modificadores	26
2.2.3. Espumantes	27
2.2.3.1. Tipos de espumantes	32
2.3. Efecto e impacto del tipo y concentración de espumante.....	34
2.3.1. Recuperación de agua y arrastre de partículas	35
2.3.1.1. Medición del arrastre hidráulico.....	38
2.3.1.2. Selectividad del proceso de flotación	45
2.3.2. Medidas de dispersión de aire	48
2.3.2.1. Velocidad superficial de gas (Jg).....	48
2.3.2.2. Flujo de área superficial de burbujas (Sb)	51
2.3.2.3. Gas holdup (εg).....	53
2.3.2.4. Distribución de tamaños de burbuja	57
2.3.2.5. Efecto del solido en el gas holdup (εg) y diámetro de burbuja (Db)	59
2.3.3. Métodos de clasificación y evaluación de espumantes	59
3. CAPÍTULO 3. METODOLOGIA Y DESCRIPCION EXPERIMENTAL.....	65
3.1. MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPOS.....	65
3.1.1. MINERAL DE ALIMENTACIÓN	65
3.1.2. Reactivos	68

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

3.1.3. Equipos.....	70
3.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	73
3.2.1. Cinética de molienda.....	73
3.2.2. Flotación batch y obtención de concentrados	74
3.2.3. Pruebas en sistema bifásico	79
3.2.4. Pruebas en sistema Trifásico	81
3.3. Medición y estimación de parámetros	81
3.3.1. Medición de gas holdup	81
3.3.2. Estimación del diámetro de burbuja	83
3.3.3. Medición de recuperación de agua	85
3.4. Condiciones de molienda y flotación batch	90
3.5. Metodología de calculo.....	91
3.5.1. Balance metalúrgico.....	91
3.5.2. Modelos cinéticos.....	92
3.5.3. Modelo de recuperación versus razón de enriquecimiento	98
3.5.4. Reconciliación de datos	100
3.5.5. Propagación de error	102
4. CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	103
4.1. Exactitud del método de medición.....	104
4.2. Precisión del método de medición.....	107
4.3. Validación del método de medición de gas holdup.....	131
4.4. Mediciones en sistema bifásico	135
4.5. Relación en el sistema trifásico (metalurgia y métrica del aire)	148
5. CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	182
5.1. Conclusiones	182
5.2. Recomendaciones.....	184
6. REFERENCIAS	185
7. APÉNDICES	189

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática del proceso de flotación batch (adaptado de wills) [3].	24
Figura 2. Proceso de adsorción de moléculas de colector en la superficie del mineral [3].	25
Figura 3. Orientación de las moléculas de espumantes en la superficie de la burbuja (Adaptado de wills) [3].	28
Figura 4. Representación esquemática del proceso de coalescencia de dos burbujas en colisión: aproximación (i-ii), aplanamiento de la película interpuesta (iii), drenaje a un espesor crítico (iv), ruptura de la película (v), y la formación de una sola burbuja (vi) (proveniente de Jiao 2015) [11].	28
Figura 5. Variación de la tensión superficial de la solución acuosa de en función de la concentración de surfactante en solución (Adaptado de Ghosh 2009) [12].	30
Figura 6. Cuadro de burbujas con (a) Pentanol y (b) F150 las cuales permanecen en contacto con la solución original (proveniente de Finch 2008) [15].	31
Figura 7. Molécula de MIBC (alcohol alifático) (proveniente de finch2008) [15].	33
Figura 8. Molécula de DF250 (poliglicol) (proveniente de Finch2008) [15].	34
Figura 9. Burbuja ascendiendo con capa de agua y estela adjunta (Smith and Warren 1989) [20].	36
Figura 10. Capas de agua que se encuentran alrededor de una burbuja (Adaptado de Rodel 1981) [22].	36
Figura 11. Interpretación de la formación de capa de agua ligada resultante en presencia de espumante (adaptado de Finch y Gelinas 2006) [19].	37
Figura 12. Determinación de la contribución de arrastre hidráulico en prueba de flotación batch (línea continua recuperación debido a entrainment y línea segmentada recuperación total) (Adaptado Trahar 1981) [24].	39
Figura 13. Determinación de flotación verdadera y arrastre hidráulico por el método de Warren (1985) [25].	40
Figura 14. Ejemplo de aplicación del método de Warren para un test de flotación batch (Adaptado de Warren) [25].	41
Figura 15. Determinación de la flotación verdadera y recuperación por arrastre hidráulico mediante el método de Ross (adaptado de Ross) [21].	43
Figura 16. Aplicación del método Ross a una prueba en particular de flotación batch (Adaptado de Ross) [21].	44
Figura 17. Curva de separabilidad para Cu y Fe de un test de flotación batch.	47
Figura 18. Gráfico especulativo del comportamiento del diámetro de burbuja (d_b) en función de la velocidad superficial de gas (J_g).	49
Figura 19. Gráfico especulativo del comportamiento del gas holdup (ε_g) en función de la velocidad superficial (J_g) (adaptado de Finch y Dobby 1990) [30].	50
Figura 20. Relación entre constante cinética de primer orden y flujo de área superficial de burbujas (adaptado de Alexander 2000) [33].	51
Figura 21. Flujo de área superficial de burbujas y gas holdup en celdas mecánicas de laboratorio (adaptado de Finch 2000) [34].	52

Figura 22. Diagrama ilustrativo del gas holdup, diámetro de burbuja y velocidad de ascenso para 3 condiciones diferentes.	54
Figura 23. Medición de gas holdup por conductividad (Adaptado de cortes-Lopez 1998) [36].	56
Figura 24. Diagrama esquemático del efecto de la concentración de espumante sobre el diámetro de burbuja (adaptado de Grau 2005) [39].	58
Figura 25. Diagrama ilustrativo del método estático y dinámico utilizado para evaluar espumantes.	60
Figura 26. Gráfico de volumen de gas en función del caudal de gas inyectado para n-heptanol a 3 concentraciones diferentes.	61
Figura 27. Aporte de Cobre por especie mineralógica.	67
Figura 28. Diseño de la celda de flotación batch modificada para medir conductividad eléctrica (las unidades del diagrama se encuentran en milímetros).	71
Figura 29. Diagrama de la máquina de flotación utilizada en la ejecución de este proyecto de memoria.	72
Figura 30. Arreglo experimental utilizado para la ejecución de los experimentos de flotación batch. (1) medidor de conductividad eléctrica modificado; (2) medidor de flujo de aire; (3) Máquina de flotación batch Denver D12; y (4) celda de flotación batch modificada.	73
Figura 31. Diagrama del proceso experimental de flotación batch utilizado para la evaluación metalúrgica de espumantes.	75
Figura 32. Filtros utilizados para la memoria para remover el exceso de agua de los concentrados y relave.	78
Figura 33. Diagrama global de las pruebas realizadas en sistema bifásico (primer set).	80
Figura 34. Diagrama del sistema implementado para medir el gas holdup mediante conductividad eléctrica.	82
Figura 35. Balance de agua en celda de flotación batch.	85
Figura 36. Concentración remanente de valor en función del tiempo (orden cero).	93
Figura 37. Logaritmo natural de la concentración remanente de valor en función del tiempo (orden 1).	94
Figura 38. Recíproco de la concentración remanente de valor en función del tiempo (orden 2).	94
Figura 39. Distribución rectangular del modelo de Klimpel (adaptado de Yianatos) [53].	96
Figura 40. Gráfico de paridad de la recuperación experimental y modelada de Cu, utilizando el modelo de Garcia-Zuñiga.	97
Figura 41. Gráfico de paridad de la recuperación experimental y modelada de Cu, utilizando el modelo de Klimpel.	98
Figura 42. Diagrama de recuperación de Cu versus la razón de enriquecimiento para la prueba realizada con 10 ppm de F507.	99
Figura 43. Diagrama del proceso de flotación donde muestra las principales fuentes de error.	104

Figura 44. Celda de flotación batch con placas de acero instaladas en forma paralela para la medición de conductividad, y la eventual estimación de gas holdup. La figura muestra las conexiones a dichas placas y un conductivímetro usado para medir la conductancia.	105
Figura 45. Conectores tipo caimán utilizados para conectar las placas de acero inoxidable y los polos del conductímetro (Fuente Google).	106
Figura 46. Secuencia de la evaluación metalúrgica llevada a cabo con los diferentes tipos de espumantes evaluados (i.e., recuperación de Cu, ley de Cu, constante cinética y selectividad).....	108
Figura 47. Resultados de gas holdup (%) en función del tiempo de flotación para pruebas con MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.	109
Figura 48. Efecto de la inyección de aire sobre las propiedades fisicoquímicas de los espumantes.	110
Figura 49. Resultados de diámetro de burbuja (μm) en función del tiempo para pruebas de MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm (pruebas realizadas en triplicado).....	111
Figura 50. Resultados de recuperación de agua acumulada en función del tiempo para pruebas con MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.	112
Figura 51. Diagrama representativo de un sistema batch el cual opera a volumen constante (i.e., Vol. de agua reposición = Vol. De concentrado recuperado).	113
Figura 52. Gráfico de barras con los errores (%) entre el volumen repuesto y el volumen removido, obtenidos para las pruebas con los espumantes MIBC y F501. Notar que los valores reportados para MIBC son resultantes de experimentación en triplicado (A, B y C). De la misma forma los test realizados para F501 fueron ejecutados en triplicado (D, E y F).	114
Figura 53. Resultados de recuperación másica acumulada en función del tiempo para las pruebas con espumantes MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.	115
Figura 54. Gráfico de barras con la masa porcentual recuperada para cada tiempo en triplicado (10 ppm de MIBC).	116
Figura 55. Gráfico de barras con los errores absolutos asociados entre el volumen removido y el volumen repuesto para cada tiempo en triplicado (10 ppm con MIBC).	116
Figura 56. Gráfico de barras con la masa porcentual recuperada para cada tiempo en triplicado (10 ppm de F501).	117
Figura 57. Gráfico de barras con los errores absolutos asociados entre el volumen removido y el volumen repuesto para cada tiempo en triplicado (10 ppm con F501)..	117
Figura 58. Diagrama con 3 casos en donde en A se observa que el sistema opera a volumen constante (caso ideal), en B el vol. removido es mayor que el repuesto por ende hay déficit dentro de la celda (caso en escasez) y en C el vol. removido es menor que el repuesto produciendo un exceso de volumen dentro de la celda (caso en exceso).	118
Figura 59. Recuperación Metalúrgica de Cu y Fe para pruebas con MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.	120
Figura 60. Ley acumulada de Cu y Fe para pruebas de MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.	121

Figura 61. Razón de enriquecimiento para Cu y Fe con pruebas realizadas con MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.	122
Figura 62. Curva de separación de Cu para las pruebas en triplicado con MIBC y F501 a 10 ppm.	125
Figura 63. Curva de separación de Fe para las pruebas en triplicado con MIBC y F501 a 10 ppm.	127
Figura 64. Curvas de diámetro de burbuja versus concentración de espumante, la curva azul corresponde a las mediciones realizadas por Tucker mientras que la curva amarilla corresponde a la estimación del tamaño de burbuja usando la metodología ejecutada en esta memoria.	132
Figura 65. Distribución F de Fisher con los valores críticos a un intervalo de confianza al 95% y con los grados de libertad de ambos tratamientos (4 y 4).	134
Figura 66. Ilustración de una celda de flotación identificando conceptos fundamentales de la métrica del aire.	135
Figura 67. Diámetro de burbuja Sauter en función de la velocidad superficial de gas (adaptado de Vinnett 2014).	138
Figura 68. Diámetro de burbuja promedio estimado para pruebas de espumación en función de la velocidad superficial de gas.	140
Figura 69. Curvas de εg versus Jg para MIBC (izquierda) y F501 (derecha) a distintas concentraciones (5, 10, 15 y 20 ppm).	141
Figura 70. Curvas de εg versus Jg para F549 (izquierda) y F507 (derecha) a distintas concentraciones (5, 10, 15 y 20 ppm).	142
Figura 71. Curvas de εg versus Jg a 5 ppm (izquierda) y 10 ppm (derecha) para los distintos tipos de espumantes.	143
Figura 72. Curvas de εg versus Jg a 15 ppm (izquierda) y 20 ppm (derecha) para los distintos tipos de espumantes.	144
Figura 73. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante para MIBC (Izquierda) y F501 (derecha).	145
Figura 74. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante para F549 (Izquierda) y F507 (derecha).	145
Figura 75. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fija (6 [L/min]).	146
Figura 76. Diferencia entre el gas holdup medido en sistema bifásico y trifásico con 8 ppm de MIBC.	147
Figura 77. Secuencia y dependencia de las respuestas metalúrgicas en función de la acción de los espumantes.	148
Figura 78. Curvas de gas holdup (εg) en función del tiempo para MIBC (grafico de la izquierda) y F501 (grafico de la derecha) para pruebas en sistema trifásico.	149
Figura 79. Curvas de gas holdup (εg) en función del tiempo para F549 (grafico de la izquierda) y F507 (grafico de la derecha) para pruebas en sistema trifásico.	150
Figura 80. Curvas de gas holdup (εg) en función del tiempo para 5 ppm (grafico de la izquierda) y 10 ppm (grafico de la derecha) para pruebas en sistema trifásico.	151
Figura 81. Curvas de gas holdup (εg) en función del tiempo para 15 ppm (gráfico de la izquierda) y 20 ppm (gráfico de la derecha) para pruebas en sistema trifásico.	151

Figura 82. Comparativa entre mediciones de gas holdup realizadas en sistema bifásico (grafico izquierdo) y sistema trifásico (grafico derecho).	152
Figura 83. Histogramas de gas holdup (%) obtenidos a partir de cinéticas de flotación bifásica (izquierda) y trifásica (derecha).	154
Figura 84. Diámetro de burbuja (μm) en función de la concentración de espumante (ppm) para distintos tipos (MIBC-F501-F549-F507) en sistema bifásico (grafico izquierdo) y sistema trifásico (grafico derecho).	155
Figura 85. Recuperación de agua acumulada (%) versus el gas holdup (%) para los experimentos realizados en sistema trifásico con diferentes espumantes y distintas concentraciones.	156
Figura 86. Recuperación másica acumulada (%) versus el gas holdup (%) para los experimentos realizados en sistema trifásico con diferentes espumantes a distintas concentraciones.	157
Figura 87. Recuperación másica acumulada (%) en función de la recuperación de agua acumulada (%) para los experimentos realizados en sistema trifásico con diferentes espumantes a distintas concentraciones.	158
Figura 88. Recuperación acumulada de Cu en función del gas holdup obtenido de todas las pruebas realizadas con distintos espumantes a diferentes concentraciones.	159
Figura 89. Ley acumulada de Cu en función del gas holdup obtenido de todas las pruebas realizadas a diferentes concentraciones y con distintos espumantes.	160
Figura 90. Recuperación de Cu (%) versus razón de enriquecimiento (-) para los tipos de espumante utilizados a diferentes concentraciones.	161
Figura 91. Grado de entrainment (-) para pruebas realizadas con espumantes (MIBC, F501, F549 y F507) a diferentes concentraciones (5, 10, 15 y 20 ppm) en función del gas holdup (%).	163
Figura 92. Masa recuperada por flotación verdadera (%) para pruebas realizadas con espumantes (MIBC, F501, F549 y F507) a diferentes concentraciones (5, 10, 15 y 20 ppm) en función del gas holdup (%).	164
Figura 93. Contribución de la flotación verdadera (TF) sobre la recuperación total de Cu, en función del gas holdup para los 16 experimentos realizados a diferentes espumantes y a distintas concentraciones.	166
Figura 94. Contribución del arrastre hidráulico (ENT) sobre la recuperación total de Cu, en función del gas holdup para los 16 experimentos realizados a diferentes espumantes y a distintas concentraciones.	167
Figura 95. Constante cinética de Cu (1/min) calculada con el modelo de Klimpel en función del gas holdup, obtenido de todas las pruebas realizadas a diferentes concentraciones y con distintos espumantes.	168
Figura 96. Selectividad de Cu/Fe (a partir de las curvas de separación) en función del gas holdup, obtenido de todas las pruebas realizadas a diferentes concentraciones y con distintos espumantes.	169
Figura 97. Comparación entre las áreas muestreadas a partir del método propuesto en esta memoria (Caso A, imagen izquierda) y el método convencional (Caso B, imagen derecha).	176

Figura 98. Gas holdup (%) experimental y modelado en función de la concentración de MIBC para sistema bifásico (rombo) y sistema trifásico (círculos).	177
Figura 99. Gas holdup (%) experimental y modelado en función de la concentración de F501 para sistema bifásico (rombo) y sistema trifásico (círculos).	177
Figura 100. Gas holdup (%) experimental y modelado en función de la concentración de F549 para sistema bifásico (rombo) y sistema trifásico (círculos).	178
Figura 101. Gas holdup (%) experimental y modelado en función de la concentración de F507 para sistema bifásico (rombo) y sistema trifásico (círculos).	178
Figura 102. Concentración crítica de coalescencia obtenida a partir de los parámetros de modelación con los distintos espumantes utilizados para sistema bifásico y trifásico (elaboración propia).	180
Figura 103. Gráfico de recuperación acumulada de Cu en función de la recuperación másica (i.e., Curva de separación).	202
Figura 106. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fijo (2 [L/min]).	203
Figura 107. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fija (4 [L/min]).	203
Figura 108. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fija (6 [L/min]).	204
Figura 109. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fija (8 [L/min]).	204
Figura 110. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fija (10 [L/min]).	205

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Índices de separabilidad propuesto por algunos autores.	45
Tabla 2. Valores de separabilidad utilizando el índice que relaciona las constantes cinéticas.	46
Tabla 3. Datos y resultados para el cálculo del índice de selectividad mediante curva de separabilidad.	47
Tabla 4. Data obtenida experimentalmente para el cálculo de la velocidad de ascenso para un mismo espumante (MIBC) a 3 concentraciones diferentes (5, 10 y 15 [ppm]).	53
Tabla 5. Aporte de Cobre por especie.	66
Tabla 6. Descripción de Espumantes utilizados.	68
Tabla 7. Colectores utilizados en el experimento.	69
Tabla 8. Medición de la conductividad en una prueba de “espumación” en sistema bifásico.	82
Tabla 9. Mediciones de conductividad y valores de gas holdup calculados respectivamente en el tiempo.	83
Tabla 10. Datos para realizar la estimación de diámetro de burbuja promedio.	84
Tabla 11. Diámetros de burbujas estimados en función del gas holdup y la velocidad superficial de gas.	85

Tabla 12. Datos obtenidos en una prueba de flotación batch (masa de mineral y agua recuperada).	86
Tabla 13. Datos calculados de agua remanente en el reactor.	88
Tabla 14. Datos estimados y calculados de forma teórica del agua recuperada en cada intervalo de tiempo.	89
Tabla 15. Resultados de recuperación de agua para el ejemplo de flotación batch analizado anteriormente.	89
Tabla 16. Condición estándar de molienda.	90
Tabla 17. Condición estándar de la flotación.	90
Tabla 18. Reactivos y puntos de adición en el proceso de flotación.	91
Tabla 19. Parámetros resultantes del ajuste del modelo de recuperación versus razón de enriquecimiento para la prueba realizada con 10 ppm de F507	100
Tabla 20. Set de pruebas realizadas para evaluar la repetitividad de la medición.	107
Tabla 21. Propiedades cualitativas de los espumantes estudiados.	109
Tabla 22. Valores de cómo cambio la inyección y velocidad superficial de aire en el tiempo de flotación.	110
Tabla 23. Valores de desviación estándar relativa (%) para la recuperación másica por intervalo de tiempo.	118
Tabla 24. Valores de errores absolutos entre el valor volumen repuesto y volumen removido para MIBC y F501.	119
Tabla 25. Valores de los parámetros de Klimpel de Cu y Fe con el MIBC.	123
Tabla 26. Valores de los parámetros de Klimpel de Cu y Fe con el F501.	123
Tabla 27. Valores de selectividad extraídos del diagrama de separación (recuperación metalúrgica en función de la recuperación en peso).	124
Tabla 28. Medidas de tendencia y variabilidad para los índices de selectividad obtenidos a partir del diagrama de separación.	124
Tabla 29. Valores de selectividad extraídos a partir de las constantes cinéticas.	124
Tabla 30. Medidas de tendencia y variabilidad para los índices de selectividad obtenidos a partir de las constantes cinéticas.	125
Tabla 31. Parámetros obtenidos a partir de modelar las curvas de separación para el MIBC y F501.	128
Tabla 32. Comparación entre los errores experimentales por variable medida y para cada tiempo. Estos se obtuvieron a partir de las pruebas en triplicado realizadas con MIBC y F501.	129
Tabla 33. Condiciones del experimento realizado por Tucker y del experimento ejecutado en esta memoria.	131
Tabla 34. Datos y valores para la realización del test de varianzas entre el método de Tucker y el método ejecutado en esta memoria.	133
Tabla 35. Parámetros obtenidos al aplicar el modelo de Warren [25] para todos los tests realizados en sistema trifásico para diferentes espumantes a distintas concentraciones.	162
Tabla 36. Fracción de la recuperación por flotación verdadera (TF) sobre la recuperación metalúrgica total.	165

Tabla 37. Fracción de la recuperación por arrastre hidráulico (ENT) sobre la recuperación metalúrgica total.	165
Tabla 38. Resumen de análisis realizado con la información de laboratorio que se obtuvo.....	170
Tabla 39. Parámetros del modelo aplicado (Ecuación 68) para las pruebas realizadas en sistema bifásico.....	179
Tabla 40. Parámetros del modelo aplicado (Ecuación 68) para las pruebas realizadas en sistema trifásico.....	179
Tabla 41. Set de flotaciones batch desarrolladas en el laboratorio.	189
Tabla 42. Medición de conductividad a distintos Jg sin espumante.	190
Tabla 43. Datos ε_g – Jg para distintas concentraciones de MIBC.....	190
Tabla 44. Datos ε_g – Jg para distintas concentraciones de F501.....	191
Tabla 45. Datos ε_g – Jg para distintas concentraciones de F549.....	191
Tabla 46. Datos ε_g – Jg para distintas concentraciones de F507.....	192
Tabla 47. Cinética de flotación para MIBC a 5 ppm.	193
Tabla 48. Cinética de flotación para F501 a 5 ppm.	193
Tabla 49. Cinética de flotación para F549 a 5 ppm.	193
Tabla 50. Cinética de flotación para F507 a 5 ppm.	193
Tabla 51. Cinética de flotación para MIBC a 10 ppm.	194
Tabla 52. Cinética de flotación para F501 a 10 ppm.	194
Tabla 53. Cinética de flotación para F549 a 10 ppm.	194
Tabla 54. Cinética de flotación para F507 a 10 ppm.	194
Tabla 55. Cinética de flotación para MIBC a 15 ppm.	195
Tabla 56. Cinética de flotación para F501 a 15 ppm.	195
Tabla 57. Cinética de flotación para F549 a 15 ppm.	195
Tabla 58. Cinética de flotación para F507 a 15 ppm.	196
Tabla 59. Cinética de flotación para MIBC a 20 ppm.	196
Tabla 60. Cinética de flotación para F501 a 20 ppm.	196
Tabla 61. Cinética de flotación para F549 a 20 ppm.	196
Tabla 62. Cinética de flotación para F507 a 20 ppm.	197
Tabla 63. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de MIBC a 5 ppm.	197
Tabla 64. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F501 a 5 ppm.	197
Tabla 65. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F549 a 5 ppm.	197
Tabla 66. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F507 a 5 ppm.	198
Tabla 67. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de MIBC a 10 ppm.	198
Tabla 68. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F501 a 10 ppm.	198
Tabla 69. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F549 a 10 ppm.	198

Tabla 70. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F507 a 10 ppm.	199
Tabla 71. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de MIBC a 15 ppm.	199
Tabla 72. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F501 a 15 ppm.	199
Tabla 73. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F549 a 15 ppm.	199
Tabla 74. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F507 a 15 ppm.	200
Tabla 75. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de MIBC a 20 ppm.	200
Tabla 76. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F501 a 20 ppm.	200
Tabla 77. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F549 a 20 ppm.	200
Tabla 78. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F507 a 20 ppm.	201
Tabla 80. Valores de desviaciones estándar relativas, DER (%). para las repeticiones realizadas con MIBC.	201
Tabla 81. Valores de desviaciones estándar relativas, DER (%). Para las repeticiones realizadas con F501	201

Glosario

ε_g : Concentración de aire en la zona de pulpa (gas holdup).

d_b : Diámetro de burbuja

d_{32} : Diámetro de Sauter.

J_g : Velocidad superficial de gas.

S_b : Flujo de área superficial de burbujas.

TF: Flotación verdadera (True flotation).

ENT: Arrastre hidráulico (Entrainment).

MIBC: Espumante correspondiente a la familia de los alcoholes.

F501: Espumante correspondiente a una mezcla de alcoholes.

F549: Espumante que corresponde a un Eter de Glicol.

F507: Espumante del tipo Poliglicol.

Q_g : Tasa de flujo volumétrico.

R_{TF} : Recuperación de Cu por flotación verdadera.

R_{ENT} : Recuperación de Cu por arrastre hidráulico.

k : Constante cinética.

J_l : Flujo de rebalse de agua por unidad de área.

κ_{SL} : Conductividad eléctrica de la pulpa (solido más liquido).

κ_d : Conductividad eléctrica de la dispersión (pulpa más aire).

CCC: Concentración crítica de coalescencia.

Q_{WO} : Flujo de espuma.

P_{80} : Tamaño de partícula asociado al 80% de la masa acumulada pasante.

U_g : Velocidad de ascenso de burbujas.

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción General

En el proceso de flotación existen reactivos que son adicionados para permitir colectar el mineral valioso de forma óptima, y de esta manera recuperar lo máximo disponible. Cuando se habla de reactivos se hace referencia principalmente a colectores y espumantes [1] [2].

Los espumantes son elementos surfactantes y sus principales contribuciones al proceso son:

- Formación y preservación de pequeñas burbujas.
- Reduce la velocidad de ascenso de la burbuja.
- Ayuda a la formación de espuma.

La reducción en el tamaño de la burbuja aumenta el número de estas y a su vez el área superficial total, lo que aumenta la velocidad de colisión con las partículas y, por lo tanto, afecta la cinética de flotación. La reducción de la velocidad de ascenso aumenta el tiempo de residencia de las burbujas en la pulpa, lo que aumenta el número de colisiones con partículas. La formación de una espuma indicaría que las burbujas se mantienen sin estallar hasta el ascenso, lo que permite que las partículas sean recolectadas como el producto (i.e., concentrado) [3].

Como se puede evidenciar, los espumantes cumplen un rol fundamental y desarrollar un procedimiento que permita evaluar el potencial rendimiento, se hace cada vez más significativo.

El criterio para seleccionar espumantes ha cambiado con los años. En el pasado, el foco de atención era principalmente el costo, disponibilidad y el ser amigables con el medio ambiente. Si bien sigue siendo importante, otros factores relativos al desempeño como las condiciones de aire o la calidad de la espuma producida han ido tomando importancia [4].

1.2. Definición del problema

Actualmente los espumantes en el contexto de flotación de minerales se evalúan de tal manera, que resultan ser procesos demasiado sofisticados y que comúnmente requieren cierto nivel de experticia para llevar a cabo las mediciones. En algunos casos no considerando el desempeño metalúrgico del proceso (i.e., recuperación y ley). Siendo que estas últimas, son la información que finalmente cautiva a los clientes del rubro. Es por esto que se busca implementar una metodología que permita evaluar el efecto e impacto del tipo y concentración de espumante.

Una metodología robusta de evaluación de espumantes favorecería a quienes se encargan de incorporar reactivos a empresas mineras (e.g., Solvay). Específicamente, proveedores y clientes se verían beneficiados si contaran con un sistema estándar de desempeño metalúrgico en función del tipo y concentración de espumante.

1.3. Hipótesis

Es posible evaluar el efecto e impacto del tipo y concentración de espumante a través de las mediciones de concentración de aire (i.e., gas holdup) a escala de laboratorio en celda de flotación operada en forma batch.

1.4. Objetivos

Los siguientes objetivos planteados permitirán guiar en dirección correcta el estudio, para poder refutar o corroborar la hipótesis propuesta.

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar e implementar una metodología experimental práctica con la finalidad de evaluar espumantes.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y montar un circuito a escala laboratorio capaz de medir y adquirir datos de concentración de aire a través de medidas de conductividad eléctrica.
- Evaluar espumantes a partir de la concentración de aire en la zona de colección para un test de flotación batch.
- Establecer la robustez de la metodología propuesta mediante repeticiones de experimentos de flotación batch (i.e., Repetitividad).

1.5. Estructura de la memoria

- En el primer capítulo de esta memoria se da a conocer la problemática y las motivaciones que dan origen al tema de memoria. Por otra parte, se plantean los objetivos que permitirán corroborar o refutar la hipótesis planteada respecto a la evaluación de espumantes.
- En el segundo capítulo se hace una revisión crítica de la literatura en contexto, en la cual se realiza una búsqueda detallada sobre flotación, espumantes y también las formas que han sido utilizadas y estudiadas para evaluar espumantes en los últimos tiempos.
- El tercer capítulo de esta memoria contiene todo lo referente a la metodología experimental utilizada para llevar a cabo esta investigación. Por otra parte, los equipos y reactivos utilizados también se indicarán en esta sección.
- El cuarto capítulo aborda los principales resultados obtenidos de la presente investigación, que tienen que ver estrechamente con las métricas utilizadas para evaluar espumantes (i.e., gas holdup y recuperación de agua) y con el

rendimiento del proceso de flotación (i.e., recuperación metalúrgica, ley acumulada, constante cinética)

- En el quinto capítulo se incluirán las conclusiones del proyecto y las recomendaciones que pudieron surgir para futuras investigaciones siguiendo la línea de evaluación de espumantes.
- Al final del documento se incluye una sección con las referencias que fueron utilizadas para llevar a cabo el proceso de búsqueda y revisión de la literatura, las cuales estuvieron enfocadas en su mayoría a espumantes y los apéndices que resultaron de la investigación, los cuales contienen información relevante para el lector.

A continuación, se presenta el capítulo 2 el cual contiene el resultado de la búsqueda bibliográfica desde un punto de vista crítico.

2. CAPÍTULO 2. REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA

2.1. Introducción al proceso de flotación

La flotación es un proceso de separación que involucra las diferencias naturales e inducidas en las propiedades de superficie de los minerales (i.e., Hidrofílica e Hidrofóbica) [5]. Corresponde a un sistema complejo que involucra tres fases (i.e., solido, agua y aire) que a su vez interaccionan con las variables químicas y físicas. Las variables químicas apuntan al paso del estado hidrofílico a hidrofóbico, mientras que las variables físicas se enfocan a las propiedades del mineral y los factores derivados de la máquina de flotación, como la velocidad del aire y el tamaño de burbuja [3].

En el proceso de flotación se destacan los siguientes mecanismos que contribuyen a la concentración del mineral:

- i. Fijación selectiva a las burbujas de aire (i.e., Flotación verdadera).
- ii. Arrastre en el agua que pasa a través de la espuma.
- iii. Atrapamiento físico entre las partículas en la espuma adheridas en las burbujas de aire.

La unión del mineral valioso a las burbujas de aire corresponde al mecanismo más influyente e importante, sin embargo, existen fenómenos que disminuyen la eficiencia de separación como lo es la recuperación de ganga por atrapamiento y arrastre. La devolución de estos minerales a la pulpa (i.e., drenaje), se produce en la espuma, de ahí la importancia de tener un control sobre esta fase [3].

La **Figura 1** ilustra el principio de flotación verdadera en una celda de flotación mecánica. El agitador o Impulsor proporciona suficiente turbulencia en la fase de la pulpa para promover la colisión de partículas y burbujas, lo que da como resultado la unión de partículas hidrófobas a burbujas (formando agregados de partículas/burbujas) y su transporte a la fase de espuma para la correspondiente recuperación.

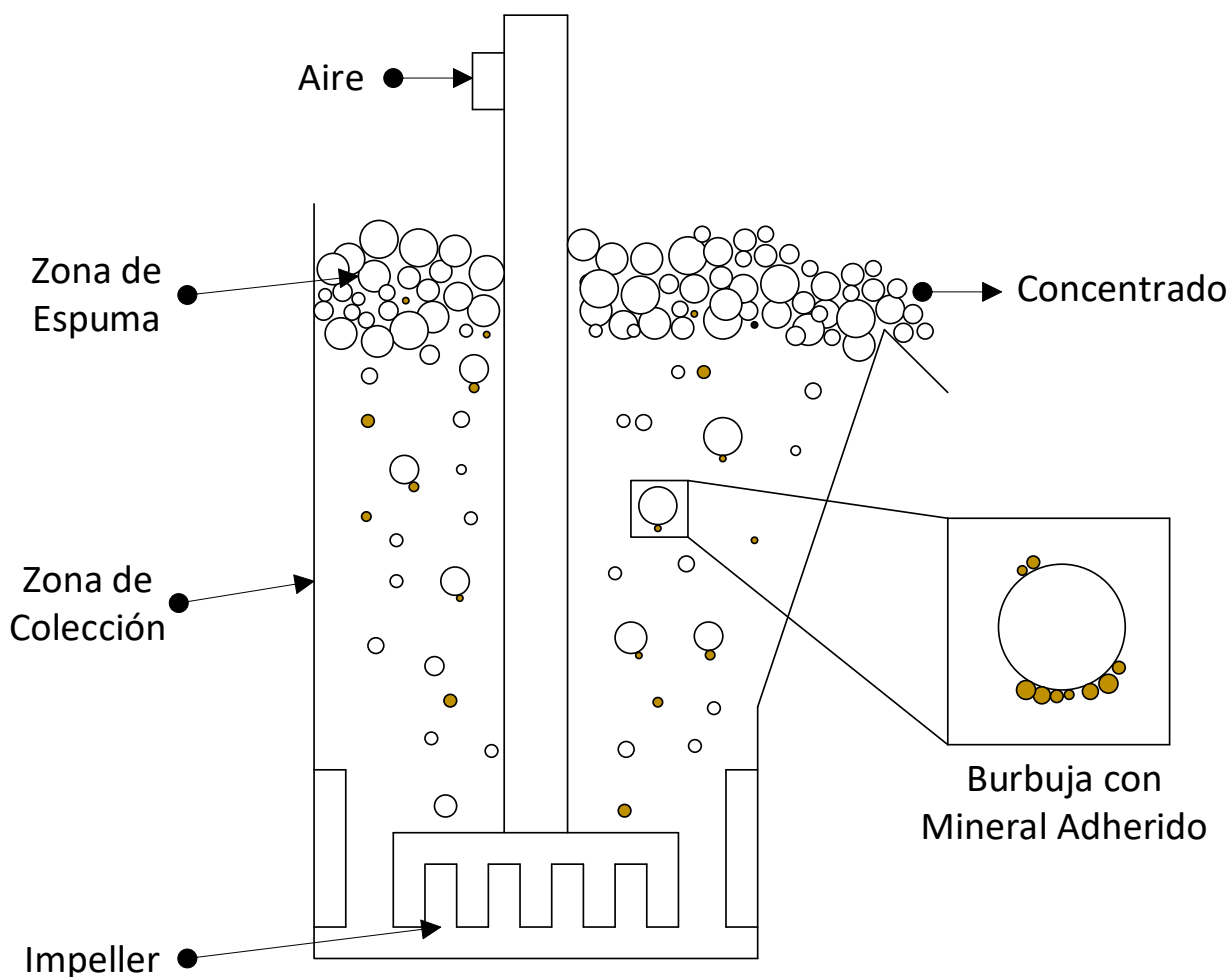


Figura 1. Representación esquemática del proceso de flotación batch (adaptado de wills) [3].

La formación del agregado (i.e., burbuja más partículas) involucra una serie de micro procesos que pueden dividirse en colisión, unión y desprendimiento. La interacción burbuja-partícula estará determinada por la física de la partícula, los movimientos de las burbujas y la hidrodinámica del flujo del líquido [6].

2.2. Reactivos de flotación

Existe una gama de reactivos en el proceso de flotación que permiten potenciar las propiedades en general, permitiendo el aumento en la eficiencia del proceso. Siendo los principales entre ellos los colectores, los espumantes y los modificadores.

2.2.1. Colectores

Los colectores son sustancias orgánicas cuyo anión o catión tiene una estructura integrada por una parte polar y otra apolar. La parte polar del ion se absorbe en la

superficie del mineral. Por otro lado, la parte apolar, constituida por una cadena de hidrocarburos, queda orientada hacia la fase acuosa, otorgando las características hidrofóbicas al mineral [1]. La **Figura 2** muestra una partícula de mineral con moléculas de colector en la cual estas últimas están disueltas en la fase acuosa para posteriormente ser adsorbidas en la superficie del mineral orientándose como se mencionó anteriormente.

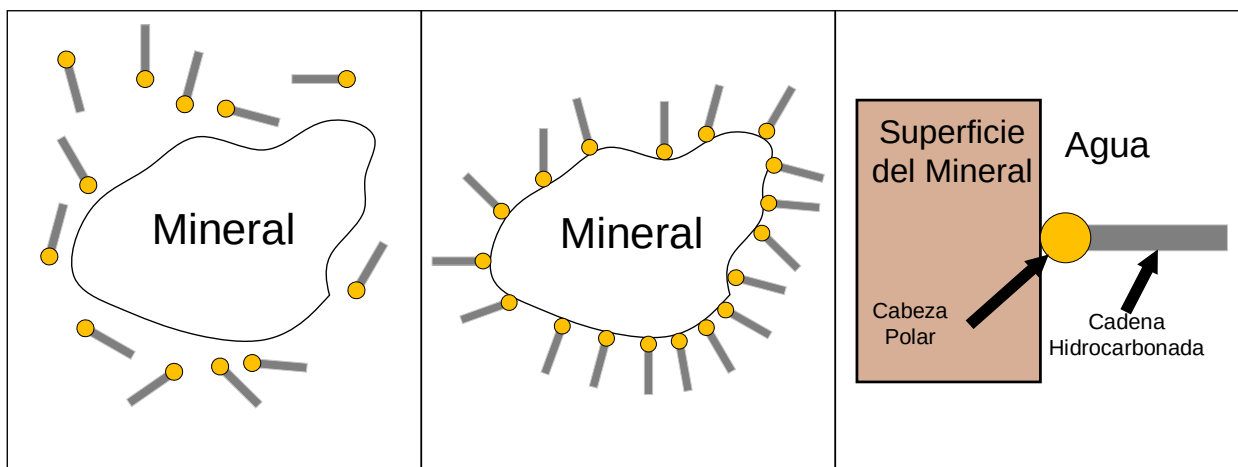


Figura 2. Proceso de adsorción de moléculas de colector en la superficie del mineral [3].

El largo de la cadena de hidrocarburos está asociado a la mayor o menor afinidad con el agua. La parte que se adhiere al mineral dará la fuerza y selectividad. Lo anterior explica la diferencia de comportamiento de los diferentes colectores. Por lo tanto, la colección estará condicionada por la naturaleza de la superficie del mineral y la estructura química del colector. Está claro que la unión química entre el colector y el mineral deberá ser más fuerte que la que pueda existir entre el mineral y el agua [4] [1].

La hidrofobización toma importancia en el proceso debido a que en conjunto con las burbujas deben formar un agregado, y dependiendo de la densidad de este quedara determinada la velocidad de ascenso, impactando en métricas del aire como lo es el gas holdup.

Existen otros reactivos adicionados al proceso que permiten potenciar algunas propiedades, como lo es el caso de los modificadores que a continuación se presentan en la sección siguiente.

2.2.2. Reactivos Modificadores

Los modificadores, comúnmente llamados reguladores son considerados productos químicos de gran importancia en el proceso de flotación, pues controlan la interacción del colector entre los minerales [2]. Tienen como función mejorar las condiciones de colección y/o selectividad del proceso.

En primer lugar, se encuentran los activadores los cuales alteran la naturaleza química de las superficies minerales para que puedan reaccionar con el colector y volverse hidrófobos. Los activadores son generalmente sales inorgánicas solubles que se ionizan en solución, en la cual los iones reaccionan con la superficie mineral [7].

Los depresantes por otra parte se utilizan para aumentar la selectividad de la flotación al hacer que ciertos minerales sean hidrofílicos, evitando de esta forma su flotación. Existen varios mecanismos que están involucrados solos o en combinación, entre ellos: adsorción de especies hidrofílicas; bloqueo de los sitios de adsorción del colector; eliminación (i.e., desorción) de especies activadoras (i.e., desactivación) [2] [3].

Finalmente se encuentran los reguladores de pH, los cuales alteran esta variable en el sistema para poder operar en condiciones óptimas. La flotación generalmente se lleva a cabo en condiciones alcalina, con la ventaja adicional de que la mayoría de los colectores, incluidos los xantatos, son estables en estas condiciones y por otro lado se minimiza la corrosión de los equipos de flotación. La alcalinidad se controla usando soda ash (i.e., Na_2CO_3), cal (i.e., CaO) o soda caustica (i.e., $NaOH$) [8]. Para reducir el pH se prefiere el ácido sulfúrico (i.e., H_2SO_4). Ocasionalmente podría inyectarse CO_2 el cual puede proporcionar un ambiente ácido. La depresión de sulfuros se produce a pH diferentes. Generalmente a medida que se aumenta el pH se reduce primero la pirita (pH 10), mientras que la calcopirita al final (pH 12) dejando un tramo de pH para realizar flotación selectiva de estos sulfuros [3].

El uso de modificadores podría incrementar la eficiencia de los colectores, pudiendo aumentar la adherencia de partículas hidrofobizadas hacia las burbujas, provocando un aumento en la densidad del agregado y de esta forma impactando en la velocidad de ascenso.

Para lograr formar un agregado (i.e., burbuja más partículas) es necesario que las burbujas tengan una estabilidad tal de que estas no coalezcan entre ellas. Para lograr la estabilidad de los agregados de flotación se adiciona al proceso reactivos químicos especialmente diseñados que reducen el proceso de coalescencia que ocurre naturalmente cuando se han generado burbujas en un sistema líquido. Estos reactivos se denominan coloquialmente en la jerga metalúrgica como “espumantes”. La siguiente sección describe los tipos y usos de espumantes en flotación en el contexto de la hipótesis de esta memoria de titulación.

2.2.3. Espumantes

Los espumantes corresponden a estructuras heteropolares que se adsorben en la interfase gas-líquido retardando la coalescencia de las burbujas. Son reactivos tensoactivos comúnmente formados por una estructura no-polar (i.e., cadena hidrocarbonada) y una parte polar (i.e., hidroxilo, carbonilo, éter, carboxilo, amina, nitrilo, fosfato y sulfato). Cuando se genera la burbuja el espumante se adsorbe en la superficie de ésta, de tal forma que la cadena hidrocarbonada se orienta hacia el lado gaseoso, mientras que el grupo polar hacia la parte líquida en donde se pueden crear puentes de hidrogeno con el agua. La **Figura 3** ilustra el proceso de adsorción de moléculas de espumante en las burbujas. En primera instancia el reactivo se disuelve en la fase acuosa para luego interactuar con las burbujas de tal forma que la cabeza polar se orienta hacia el agua por ser de carácter hidrofílico mientras que la cadena hidrocarbonada hacia el lado gaseoso por ser hidrofóbica [1] [3] [9].

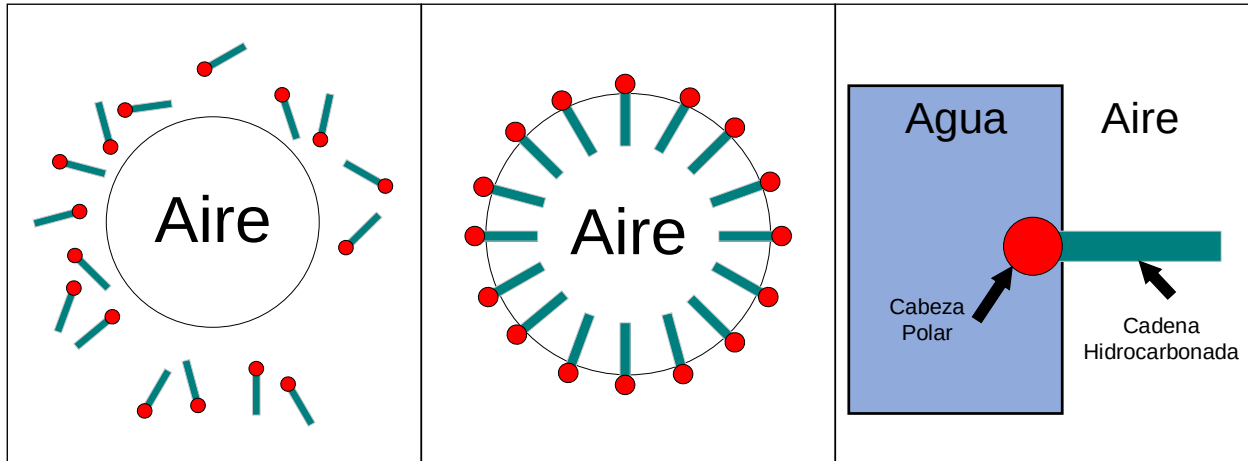


Figura 3. Orientación de las moléculas de espumantes en la superficie de la burbuja (Adaptado de wills) [3].

Como se mencionó anteriormente los espumantes o los agentes tenso - activos ayudan a retardar el proceso de coalescencia, La cual se define como el proceso por el cual dos o más burbujas se unen durante el contacto para formar una sola burbuja secundaria. Los pasos consecutivos en la coalescencia de burbujas se ilustran en la **Figura 4** y se pueden explicar a través de las siguientes etapas: colisión de burbujas, aplanamiento de la película interpuesta, adelgazamiento de la capa liquida y la ruptura de esta. La coalescencia ocurrirá si las dos burbujas permanecen en contacto más tiempo del necesario para que la película se adelgace. Una vez que la capa es lo suficientemente delgada, un mecanismo de inestabilidad dará como resultado la ruptura de esta y la formación de una burbuja de mayor tamaño [10] [11].

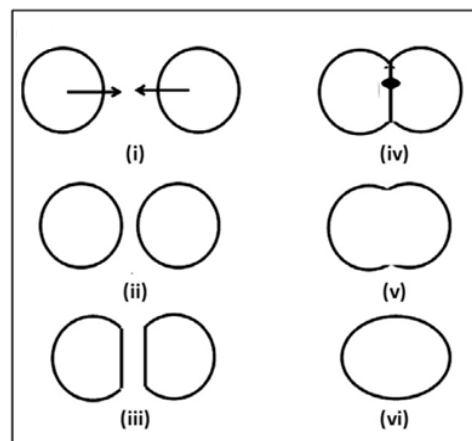


Figura 4. Representación esquemática del proceso de coalescencia de dos burbujas en colisión: aproximación (i-ii), aplanamiento de la película interpuesta (iii), drenaje a un espesor crítico (iv), ruptura de la película (v), y la formación de una sola burbuja (vi) (proveniente de Jiao 2015) [11].

Retomando la importancia de los espumantes, una de las principales funciones es reducir el fenómeno anteriormente explicado (i.e., coalescencia). Los agentes tenso-activos (i.e., espumantes) reducen la coalescencia la cual podría ser explicada por tres mecanismos, en primera instancia esta la elasticidad de Gibbs. Por otro lado, el efecto Marangoni y finalmente la viscosidad superficial.

La elasticidad de Gibbs es la habilidad del film líquido para ajustar su tensión superficial en un aumento de stress (i.e., esfuerzo). Al estirar una película (i.e., film) de líquido, la concentración superficial de espumante decrece, por lo tanto, la tensión superficial aumenta, lo que hace más difícil seguir estirando dicha película.

Como respuesta a la adsorción de espumante en la burbuja, existe una disminución en la tensión superficial con un incremento de la concentración y así lo muestra la **Figura 5**, en donde se ve el comportamiento de esta métrica en función de la concentración de espumante para un agente en particular. El cambio en la tensión superficial está relacionado con la densidad de adsorción definida por la **Ecuación 1**, que corresponde a la ecuación de Gibbs [12].

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} * \frac{d\sigma}{d \ln C} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

Γ : Concentración del tensoactivo en la superficie (i.e., densidad de adsorción).

C : Concentración del tensoactivo en la disolución

σ : Tensión superficial

R : Constante de los gases

T : Temperatura absoluta

La **Ecuación 1** relaciona las cantidades de exceso que describen la adsorción con cantidades que se pueden medir o inferir a partir de datos experimentales, como son la tensión superficial y la concentración. La dependencia de la tensión superficial con la concentración se establece experimentalmente, ya que no existe una ecuación de estado que las relacione. Así que, de la pendiente positiva o negativa de la curva de

tensión superficial en función de la concentración (ver **Figura 5**), se establece si hay enriquecimiento o agotamiento del soluto durante el proceso de adsorción [12].

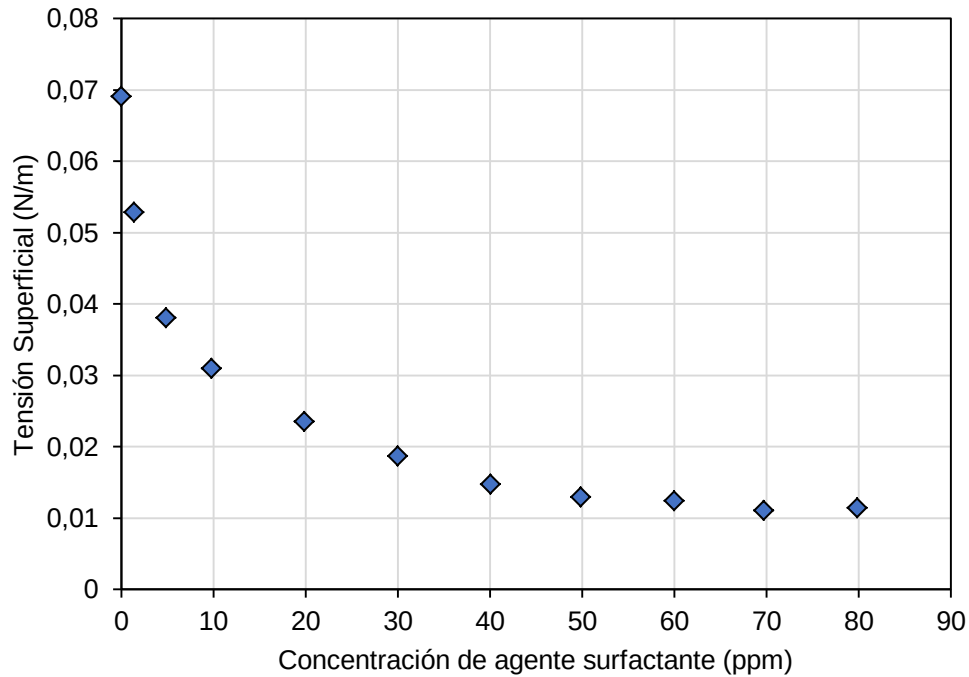
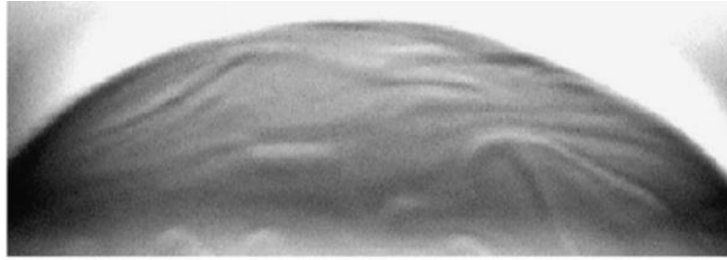


Figura 5. Variación de la tensión superficial de la solución acuosa de en función de la concentración de surfactante en solución (Adaptado de Ghosh 2009) [12].

Otro fenómeno que surge de la tensión superficial es el flujo en el líquido contiguo de las burbujas; el agua que fluye sobre la superficie induce un gradiente de tensión superficial y, a su vez, la fuerza con el gradiente produce un flujo en el agua adyacente el cual provoca una disminución en la velocidad de adelgazamiento de las interfases cuando se juntan una o más burbujas. Este fenómeno es conocido como efecto Marangoni [13] [14].

Los flujos generados en la superficie de la burbuja dependerán del tipo de espumante, como lo muestra la **Figura 6** en la cual la textura se debe al flujo del fluido debido a la gravedad y al efecto Marangoni.

(a) Pentanol



(b) F150

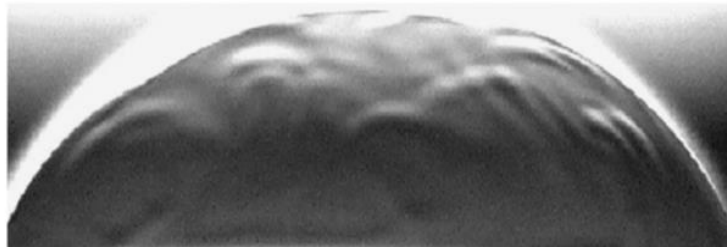


Figura 6. Cuadro de burbujas con (a) Pentanol y (b) F150 las cuales permanecen en contacto con la solución original (proveniente de Finch 2008) [15].

La estructura molecular de los espumantes (i.e., grupo OH) les permite generar puentes de hidrogeno con las moléculas de agua, produciendo un ordenamiento local de agua en torno a la burbuja. Esto aumenta la viscosidad de la película asociada a la burbuja. En el caso del film atrapado entre dos burbujas prontas a coalescer, el aumento en la viscosidad retardaría su drenaje y adelgazamiento. Los gradientes de tensión superficial generados al estirar una película de líquido se pueden reducir por mecanismos de difusión-adsorción de tenso-activo. Cuando esto ocurre se dice que la superficie tiene propiedades visco-elásticas [16].

Al ser deformada una superficie, aparecen fuerzas internas (i.e., esfuerzo) como reacción al estímulo externo. Este esfuerzo puede verse como la resistencia de la película a la deformación y considera en su definición componentes elásticas y viscosas.

El esfuerzo total (τ) para una deformación local (ε) se define como lo muestra la **Ecuación 2**, la cual está constituida por una parte elástica y otra viscosa.

$$\tau = E * \varepsilon + \eta_d * \dot{\varepsilon} \quad \begin{cases} E * \varepsilon \text{ (Componente elástica)} \\ \eta_d * \dot{\varepsilon} \text{ (Componente viscosa)} \end{cases} \quad \text{Ecuación 2}$$

Si la velocidad de deformación es alta, el sistema no tiene tiempo para realizar procesos de difusión-adsorción, la viscosidad dilatacional tiende a cero y el esfuerzo

total es puramente elástico. Para deformaciones más lentas se tienen ambos componentes, no obstante, a medida que aumenta el tamaño de las moléculas tenso - activas, se espera que el componente viscoso se haga cada vez menos importante [16].

Los espumantes al ayudar a retardar la coalescencia tienen un impacto positivo en el gas holdup aumentándolo, debido a que las burbujas mantienen su tamaño y residen un tiempo mayor en la zona de colección. En otras palabras, las burbujas más pequeñas tienen una velocidad de ascenso menor que una de mayor tamaño. De igual forma tienen un impacto en la recuperación de agua debido a que hay un número mayor de ellas. Esto se traduce que el agua transportada al concentrado sea mayor que cuando se tienen burbujas más grandes.

Hay una gama de productos surfactantes que se utilizan actualmente, los cuales difieren en cuanto familia química y por ende tendrán diferentes efectos sobre las burbujas generadas. En la siguiente sección se muestran los tipos que existen, que corresponden a los más usados a nivel industrial.

2.2.3.1. Tipos de espumantes

Existen principalmente 2 familias de espumantes utilizados en la actualidad [1]:

Alcoholes

Dentro de esta familia se encuentran 3 grupos, los alcoholes lineales alifáticos, los cíclicos y los aromáticos. Los alcoholes lineales alifáticos están formados por cadenas de hidrocarburos ramificados o cíclicos, contienen entre 5 a 8 átomos de carbono. Incluyen a las formas lineales y ramificados que tienen una cadena de carbono de 5 a 8 átomos (Si $C < 5$ el espumante tendrá propiedades muy débiles, y si $C > 8$ la molécula resulta difícil de disolver). Además, contienen una variedad de otros componentes formados o adicionados durante su manufactura, el tipo y la cantidad de este componente secundario puede tener un efecto significativo en el rendimiento y tipo de espuma que produce [1] [5] [8].

Dentro de las características que resaltan de estos espumantes (i.e., alcoholes) es que poseen una baja retención de agua, espuma frágil y altura de espuma baja [5]. La

Figura 7 muestra una molécula de Metil Isobutil Carbinol (i.e., MIBC), la cual corresponde a unos de los alcoholes más utilizados a nivel industrial [17].

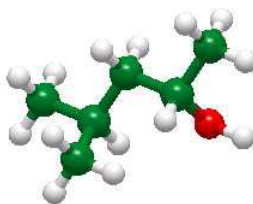


Figura 7. Molécula de MIBC (alcohol alifático) (proveniente de finch2008) [15].

La molécula de MIBC que se muestra está formada por átomos de hidrógeno (esferas blancas), átomos de carbono (esferas verdes) y un átomo de oxígeno (esfera roja). Corresponde a un espumante de bajo peso molecular (102 [g/mol]), razón por la que es muy volátil. Por sus propiedades que posee este espumante, se ha convertido en uno de los agentes surfactantes más usados en la industria minera actualmente [3].

Poliglicoles

Polipropilenos o polietilenglicol y sus éteres. Son rápidamente solubles en agua, de fácil dilución y tienden a producir espumas húmedas. Debido a su solubilidad y su baja presión de vapor, tienden a residir por largos tiempos en las celdas de flotación. Otros atributos que caracterizan esta clase de espumantes son el hecho de poseer un alto peso molecular, lograr buenas alturas de espuma, espuma más estable y persistente, una baja sensibilidad a los cambios de pH y una alta retención de agua [18].

Los poliglicoles se comportan de forma muy similar a los poliglicol éter, pero de forma más intensa. La desventaja de los poliglicoles es la alta retención de agua, lo que los haría menos que los poliglicol éter. Sin embargo, esta característica de los poliglicoles podría ser ventajosa cuando se busque recuperar partículas gruesas [2] [5]. La **Figura 8** muestra una molécula de DF250, la cual corresponde a uno de los poliglicoles más usados a nivel industrial [17].

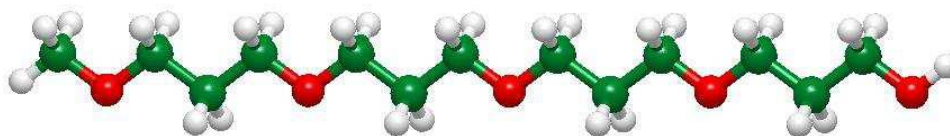


Figura 8. Molécula de DF250 (poliglicol) (proveniente de Finch2008) [15].

La molécula de DF250 está compuesta por átomos de hidrogeno (esferas blancas), átomos de carbono (esferas verdes) y átomos de oxígeno (esferas rojas). El peso molecular de este poliglicol es mucho mayor al del MIBC (200-400 g/mol), razón que lo hace menos volátil, por lo tanto, tiende a residir mayores tiempos en los reactores, en este caso en las celdas de flotación [3].

La naturaleza del espumante influirá en el gas holdup, puesto que para moléculas más grandes se espera que puedan retardar aún más la coalescencia. La recuperación de agua también se ve alterada pues moléculas grandes podrían generar mayores capas de agua, haciendo que este fenómeno aumente [19].

Sabiendo que existen estos dos grupos con propiedades intrínsecas, es común que se realicen mezclas de espumantes por partes de empresas proveedoras de reactivos. Desconociéndose las nuevas propiedades en cuanto diámetro de burbuja, Gas holdup y recuperación de agua.

Por lo tanto, se podría esperar que la concentración y el tipo de espumante pueden alterar otras variables dentro del proceso, y estas se presentan a continuación.

2.3. Efecto e impacto del tipo y concentración de espumante

Los espumantes son aditivos químicos que ayudan en el proceso de formación de burbujas, en la preservación de estas, y la estabilidad de la espuma [4]. En específico el tipo y concentración de este reactivo tiene efecto sobre algunas variables del proceso de flotación como lo son la recuperación de agua, gas Holdup y distribución de tamaño de burbujas. Estas variables no son triviales y tener un entendimiento sobre ellas es necesario.

2.3.1. Recuperación de agua y arrastre de partículas

En el proceso de flotación de minerales, se puede recuperar partículas por dos tipos de mecanismos, estos son la flotación verdadera (en inglés True flotation), y la recuperación por arrastre hidráulico (en inglés entrainment).

La flotación verdadera ocurre cuando las partículas (hidrofóbicas) se unen a las burbujas de aire en la pulpa agitada de tal forma que las burbujas mineralizadas (i.e., agregados) ascienden y alcanzan la base de la espuma. Los agregados continúan subiendo, los cuales están sujetos al proceso de coalescencia que ocurre en la zona de espuma debido al drenaje natural que se produce a consecuencia de la fuerza de gravedad actuando sobre el agua (i.e., secado de la espuma a medida que la altura de esta va aumentando) [20].

La recuperación por arrastre puede llevar al concentrado tanto partículas hidrofílicas como hidrofóbicas. El arrastre de partículas hidrofílicas al concentrado en el ascenso se podría explicar por acción del arrastre de agua producido por las burbujas, que se manifiesta de la siguiente manera [20] [21].

- a) El agua es arrastrada a la espuma por la capa limite hidrodinámica de la burbuja.
- b) El agua es transportada por la estela que genera una burbuja de aire cuando asciende.

La **Figura 9** muestra un diagrama de como ocurren estos fenómenos mientras una burbuja asciende hacia la superficie. Se aprecia la estela generada por la burbuja y la capa de agua formada, las que eventualmente arrastran agua y a su vez partículas hidrofílicas al concentrado.

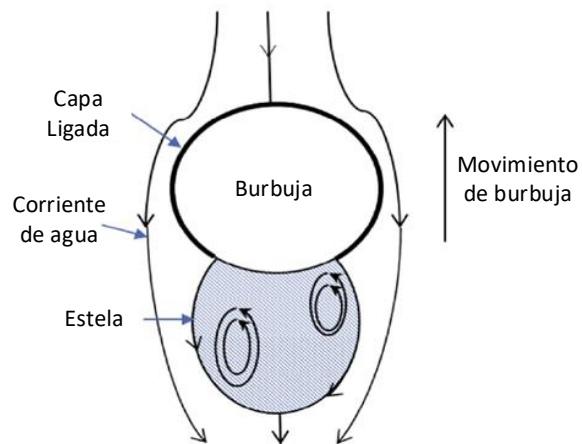


Figura 9. Burbuja ascendiendo con capa de agua y estela adjunta (Smith and Warren 1989) [20].

Estos dos mecanismos rigen la recuperación de agua hacia el concentrado. Por otra parte, hay dos posibles mecanismos que dan cuenta de la formación de la capa de agua:

- 1) Una capa limite ordenada, unida a la burbuja e inmóvil.
- 2) Una película de libre flujo que esta flojamente ligada.

La **Figura 10** ilustra estas capas formadas alrededor de una burbuja.

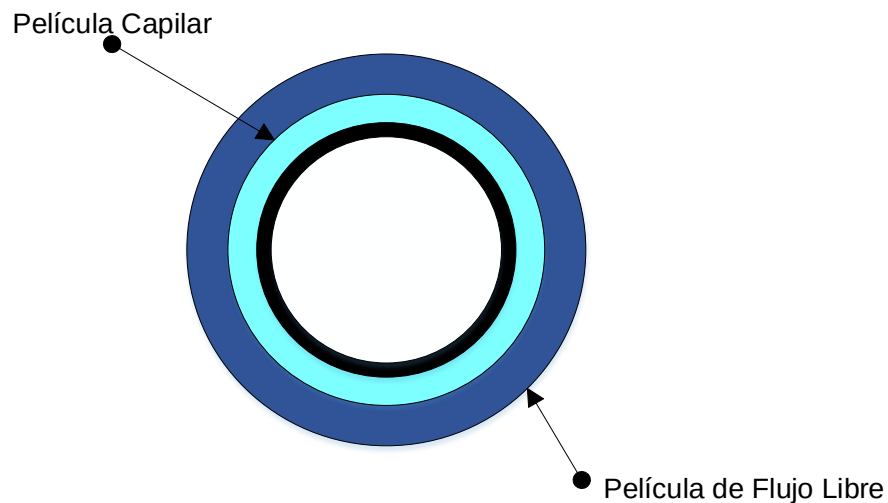


Figura 10. Capas de agua que se encuentran alrededor de una burbuja (Adaptado de Rodel 1981) [22].

En particular, la película capilar es la que resiste el drenaje retardando la coalescencia de las burbujas [22].

Finch y Gelinas (2006) midieron el espesor de la película de agua de una burbuja de aire en solución de dos espumantes industriales, MIBC y Dowfroth 250. Se descubrió que el Dowfroth 250 genera una película de agua más gruesa que el MIBC, como lo muestra el esquema de la **Figura 11**. La diferencia fue atribuida a la estructura molecular de los espumantes que influencia la manera en que los enlaces de hidrogeno se ordenan con las moléculas de agua, llevando más agua al concentrado aumentando el grosor de la película capilar [19].

Relacionándolo con lo antes mencionado se espera que, si aumenta el espesor de la película de agua alrededor de la burbuja, el arrastre de partículas hidrofílicas al concentrado debiese aumentar.

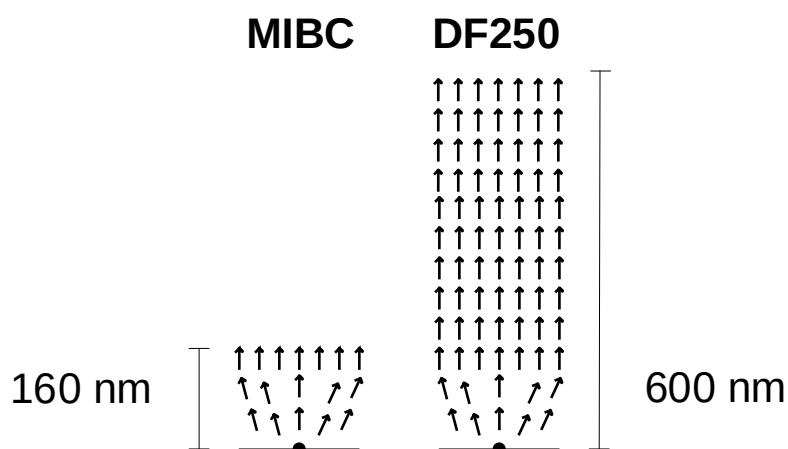


Figura 11. Interpretación de la formación de capa de agua ligada resultante en presencia de espumante (adaptado de Finch y Gelinas 2006) [19].

El arrastre de agua a la zona de espuma también se ve afectado por el tipo de espumante, ya que dependiendo de la familia (i.e., química) tendrán la capacidad de producir un aumento de esta condición. Esta particularidad tiene un impacto positivo en la recuperación metalúrgica y el gas holdup, sin embargo, compromete la calidad del concentrado por el arrastre hidráulico producido [1].

El arrastre hidráulico o entrainment puede ser medido en pruebas de flotación, y de esta forma determinar la contribución de este mecanismo a la recuperación total del proceso, que se define mediante la **Ecuación 3**, la cual muestra que la recuperación

total se compone de dos partes que son la recuperación mediante flotación verdadera (R_{TF}) y la recuperación mediante arrastre hidráulico (R_{ENT}).

$$R_{TOTAL} = R_{TF} + R_{ENT} \quad \text{Ecuación 3}$$

En la siguiente sección se presentan algunos métodos propuestos para estimar el grado de entrainment.

2.3.1.1. Medición del arrastre hidráulico

El arrastre hidráulico (i.e., entrainment) corresponde a un proceso de recuperación en flotación no selectivo de partículas finas (notar que las partículas hidrofóbicas e hidrofílicas menor a 50 μm pueden ser recuperadas por entrainment) [20].

Se han desarrollado diferentes metodologías para determinar el grado de entrainment en un proceso de separación por flotación [23].

Trahar en 1981 propuso medir la recuperación de sólidos y agua en dos pruebas de flotación. Una prueba se llevó a cabo con un colector y un espumante, mientras que la otra se llevó a cabo con solo un espumante. La evaluación realizada por Trahar se basa en dos supuestos [24].

- La recuperación de agua constante y la cantidad de sólidos que se reportan en el concentrado por arrastre en ambas pruebas sería la misma.
- La flotación verdadera solo ocurre en presencia del colector.

La **Figura 12** muestra sólidos recuperados por flotación en función de la recuperación de agua. Se observa que dos condiciones fueron evaluadas: separación sin colector (línea continua), y separación con adición de colector (línea segmentada).

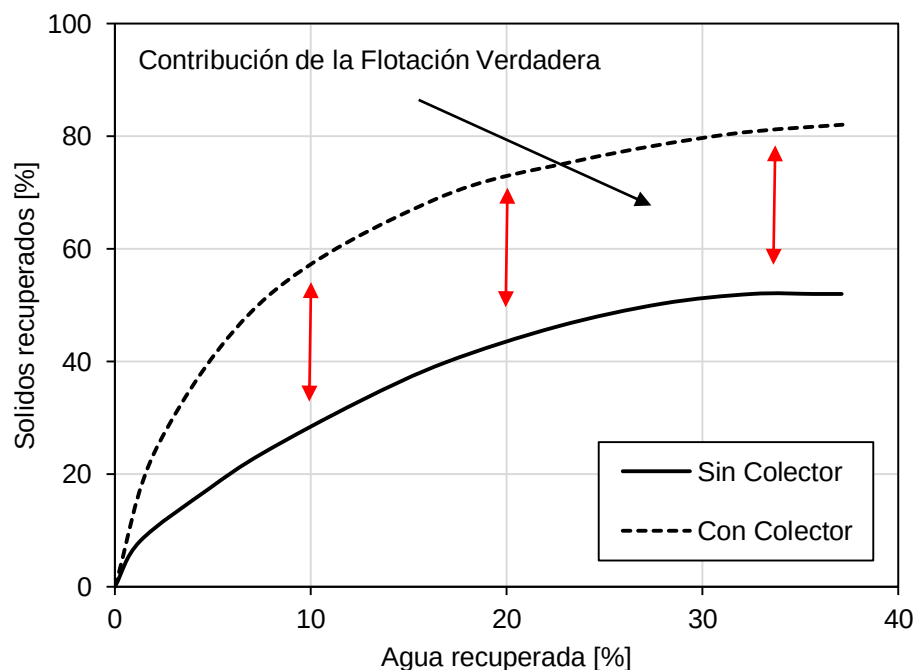


Figura 12. Determinación de la contribución de arrastre hidráulico en prueba de flotación batch (línea continua recuperación debido a entrainment y línea segmentada recuperación total) (Adaptado Trahar 1981) [24].

También se aprecia que la separación con colector alcanza recuperaciones más altas, lo que fue interpretado por el autor como la combinación de flotación verdadera más la recuperación por arrastre. Del mismo modo, la recuperación por arrastre hidráulico se determinó con los experimentos llevados a cabo sin uso de colector. Por lo tanto, la flotación verdadera es la resultante de la diferencia de las curvas de separación con y sin colector. La contribución de Trahar es globalmente reconocida y su metodología para estimar el grado de entrainment sigue siendo un referente en la disciplina.

Warren (1985) se basó en varias pruebas de flotación en las que utilizó un mineral de casiterita rico en sulfuro ($> 6 \mu\text{m}$) y una fracción ultrafina ($< 6 \mu\text{m}$) de mineral de casiterita y carbón bituminoso. Para investigar la contribución del arrastre y la flotación verdadera [25].

La **Figura 13** describe la recuperación después de 15 minutos de flotación en función de la recuperación de agua. Se observan dos escenarios, (i) recuperación de casiterita versus recuperación de agua; (ii) recuperación de ganga ultrafina en función de la recuperación de agua.

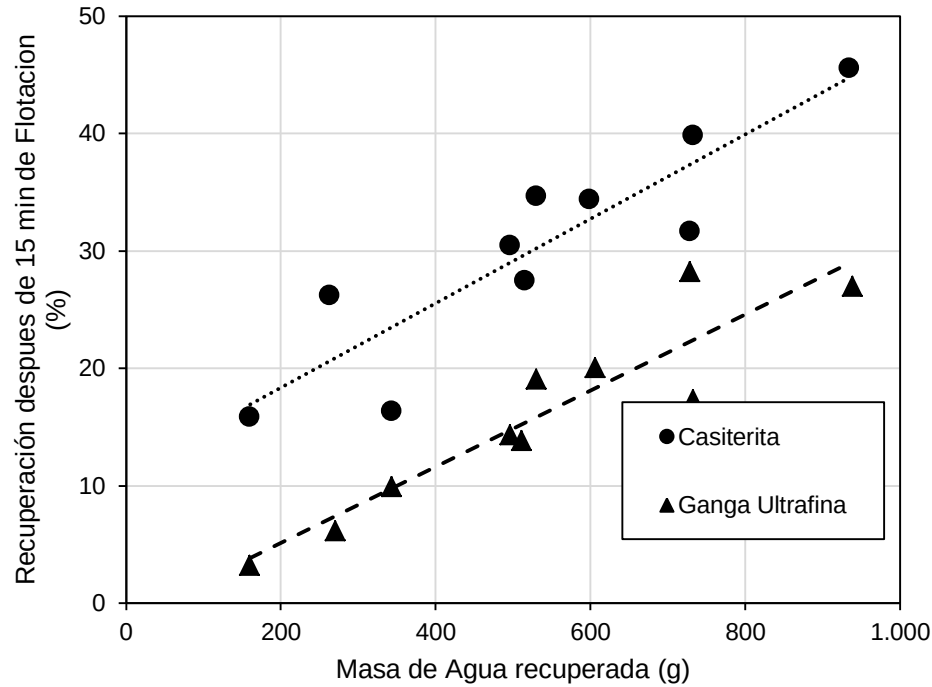


Figura 13. Determinación de flotación verdadera y arrastre hidráulico por el método de Warren (1985) [25].

La recuperación por flotación verdadera y arrastre puede calcularse usando las siguientes ecuaciones como resultado de ajustar modelos lineales al set de puntos obtenidos, de esta forma la **Ecuación 4** se ajusta a los datos de casiterita mientras que la **Ecuación 5** a la ganga ultrafina. Notar que esta última ecuación parte desde el origen, lo que estaría indicando que la recuperación es solamente por arrastre hidráulico.

$$R_M = F_M + e_M * W_{water} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$R_G = e_g * W_{water} \quad \text{Ecuación 5}$$

De las ecuaciones planteadas anteriormente, R_M y R_G corresponden a las recuperaciones acumuladas de minerales valiosos y de ganga respectivamente. W_{water} es la masa de agua después de un tiempo dado mientras que F_M corresponde a la intersección de la línea extrapolada en el eje Y, siendo una indicación de la flotación verdadera. e_M y e_g son grados de arrastre de minerales valiosos y de ganga respectivamente [25]. La **Figura 14** muestra un ejemplo de la aplicación del método de Warren con los datos obtenidos en un test de flotación, se observa que al graficar la recuperación másica en función de la recuperación de agua se obtiene una relación directamente proporcional. Al ajustar un modelo lineal a los datos se obtiene del

modelo que el grado de arrastre asociado al mineral es 0,348; mientras que el porcentaje másico asociado a la flotación verdadera corresponde a 5,59%.

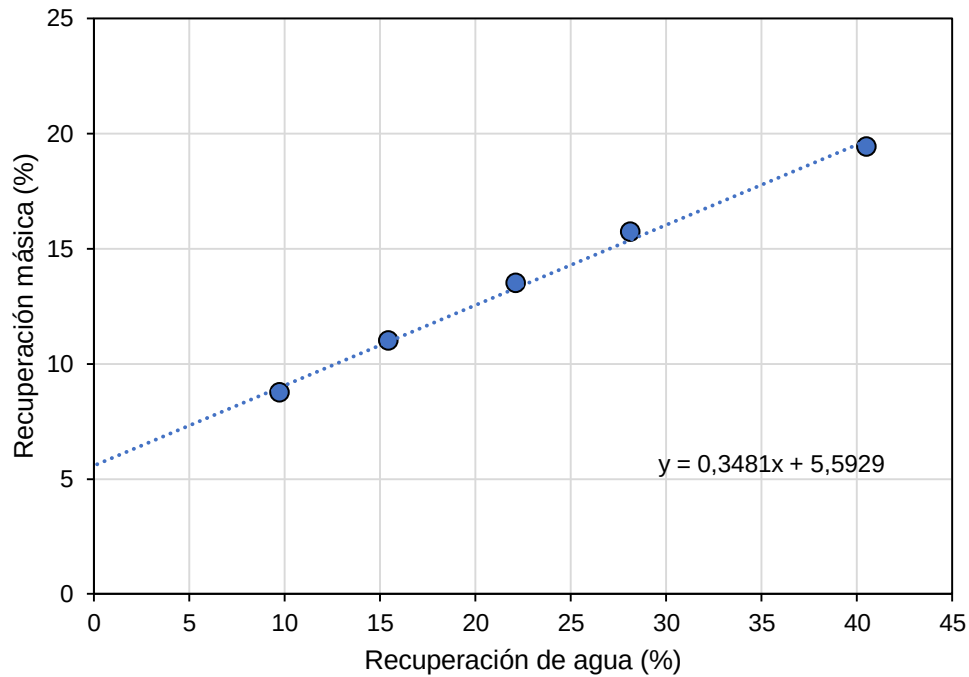


Figura 14. Ejemplo de aplicación del método de Warren para un test de flotación batch (Adaptado de Warren) [25].

Hay que mencionar que el método resulta ser una forma práctica de obtener un entendimiento de los valores de flotación verdadera y arrastre hidráulico.

Ross (1989) mediante un set de pruebas de flotación batch logró encontrar la contribución por arrastre hidráulico y flotación verdadera que existía en esta misma. Definió un factor $X(t)$, para describir la clasificación diferencial de sólidos arrastrados y recuperación de agua. El factor de transferencia $X(t)$ se expresa según lo indica la **Ecuación 6**.

$$X(t) = \frac{E(t) * C_w(t)}{W(t) * C_M(t)} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde $E(t)$ y $W(t)$ corresponden a las masas acumuladas de sólidos arrastrados y agua recuperada respectivamente después de un tiempo en específico. Mientras que $C_w(t)$ y $C_M(t)$ corresponden a la concentración (en gramos por litro de pulpa) de agua y sólidos en la pulpa respectivamente.

Del mismo modo se propuso $Y(t)$ para aclarar la recuperación total de sólidos (i.e., recuperación por flotación verdadera y recuperación por arrastre hidráulico) y la recuperación de agua en el test de flotación. La relación se expresa según la **Ecuación 7**.

$$Y(t) = \frac{R(t) * C_w(t)}{W(t) * C_M(t)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde $R(t)$ representa la masa total de sólidos recuperados por flotación verdadera y por arrastre hidráulico después de un tiempo t . La contribución de la flotación verdadera, $F(t)$, se obtiene mediante la diferencia de la recuperación total ($R(t)$) y la recuperación por arrastre ($E(t)$) como lo muestra la **Ecuación 8**.

$$F(t) = R(t) - E(t) \quad \text{Ecuación 8}$$

La **Figura 15** muestra la **Ecuación 5** y la **Ecuación 6** graficadas en función del tiempo, en la cual la línea continua corresponde a $Y(t)$ pues representa la recuperación total de sólidos (i.e., flotación verdadera y recuperación por arrastre hidráulico). Por otra parte, la línea segmentada corresponde a $X(t)$, pues bien, solo muestra la recuperación de sólidos por arrastre hidráulico.

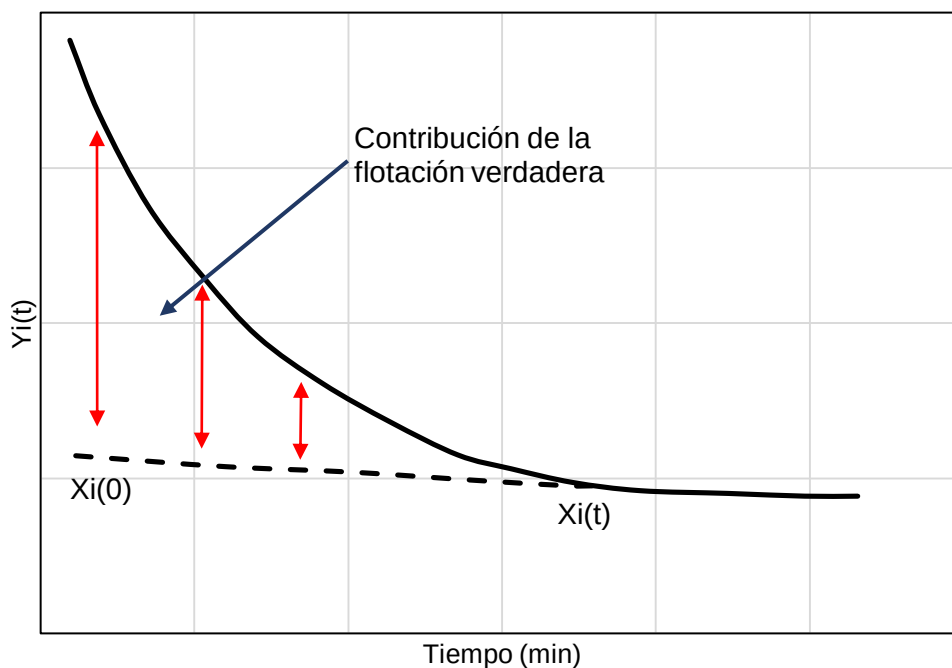


Figura 15. Determinación de la flotación verdadera y recuperación por arrastre hidráulico mediante el método de Ross (adaptado de Ross) [21].

Finalmente, la contribución por flotación verdadera correspondería a la diferencia de las curvas anteriormente nombradas y en la **Figura 15** se puede evidenciar por las flechas de color rojo. El método de Ross está basado en dos supuestos los cuales indican que los sólidos arrastrados se cuantifican al final de la flotación y por último se asume que la función de transferencia (i.e., $X(t)$) disminuye de forma lineal en el tiempo [21]. A continuación, en la **Figura 16** se muestran los datos graficados para una prueba en particular realizada y de esta forma se puede observar que al graficar la función de transferencia $Y(t)$ esta decae de manera no lineal hasta el minuto 12, desde este punto se traza una recta con la misma pendiente límite en dirección al eje Y, para finalmente encontrar que la contribución por flotación verdadera corresponde a la diferencia entre las curvas.

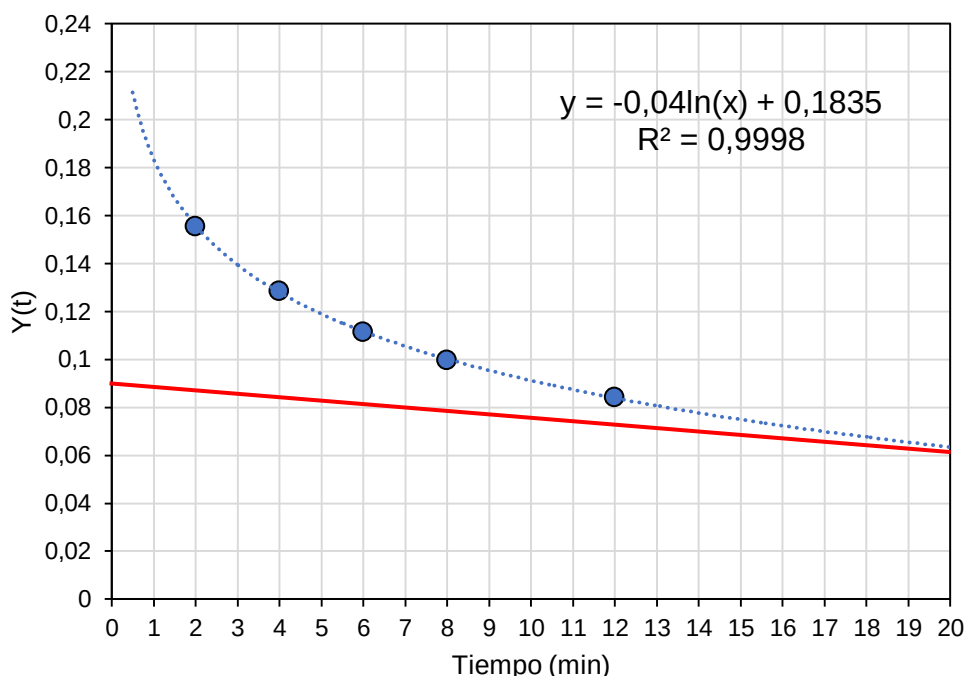


Figura 16. Aplicación del método Ross a una prueba en particular de flotación batch (Adaptado de Ross) [21].

Es importante mencionar que resulta ser un proceso fácil de replicar, puesto que necesita un solo test de flotación. La desventaja que posee este método es que es posible que las mediciones se vean alteradas por la altura del colchón de espuma.

Existe otro método basado en la utilización de un trazador no flotante para medir la contribución del arrastre hidráulico y la flotación verdadera en un sistema de flotación continuo. El grado de arrastre hidráulico en función de la concentración del trazador en el tiempo permite estimar la función de transferencia antes mencionada dependiente del tipo de especies mineralógicas presentes en el sistema. Esto fue propuesto por Savassi (1998) [26]. Esta metodología es interesante de considerar, sin embargo, esta fuera del alcance de este proyecto de memoria.

Después de realizar una revisión acerca de los métodos para calcular la contribución por flotación verdadera y recuperación por arrastre hidráulico, se optó por descartar los métodos propuestos por Trahar y Ross, el primero por el hecho de que obligaba a que se hiciera el doble de experimentos para encontrar la contribución de la flotación verdadera y el segundo porque las estimaciones se veían fuertemente afectadas por la altura del colchón de espuma, factor que no se controló a gran detalle. Finalmente, por

la simplicidad y por lo práctico que resulta obtener la información referente a la flotación verdadera y el grado de arrastre de hidráulico se utilizara el método de Warren en las pruebas de flotación. Todo esto en un contexto en que el tipo de espumante tendrá un efecto distinto en la recuperación de agua, es decir que la calidad y/o familia del espumante podrá generar una mayor o menor recuperación de agua, por lo tanto, la recuperación másica y el arrastre hidráulico también lo serán. Por otra parte, tener un entendimiento de este valor podría ayudar a estimar en forma cuantitativa el impacto que tienen los espumante sobre esta variable (i.e., arrastre hidráulico).

2.3.1.2. Selectividad del proceso de flotación

La selectividad en el contexto de la flotación de minerales se entiende como el grado de separación entre minerales valiosos y ganga como también entre valiosos y valiosos, y está estrechamente relacionado con la ley del concentrado (i.e., calidad del concentrado) [3]. La recuperación por arrastre hidráulico (Entrainment), se considera un proceso no selectivo puesto que no existe una discriminación por parte del agua arrastrada hacia el concentrado entre el valioso y la ganga. Por lo tanto, se hace evidente que los espumantes al tener un impacto directo en lo que es la recuperación de agua, de cierta forma estarán también condicionando la separabilidad de la flotación. A continuación, en la **Tabla 1** se muestran ecuaciones propuestas por algunos autores para medir separabilidad de elementos en un proceso de flotación [27].

Tabla 1. Índices de separabilidad propuesto por algunos autores.

$SI_G = \sqrt{\frac{R_{Cu}J_{Fe}}{J_{Cu}R_{Fe}}} = \sqrt{\frac{R_{Cu}(100 - R_{Fe})}{(100 - R_{Cu})R_{Fe}}}$	Gaudin
$S = \frac{k_{Cu}}{k_{Fe}}$	Gaudin
$S.I = \frac{k_{Cu}R_{Cu}^{\infty}}{k_{Fe}R_{Fe}^{\infty}}$	Xu
$I_{Cu} = \frac{(100 - R_{pyrite})}{(100 - R_{Cu})^2}$	Fu

$SI_{BE} = \frac{\ln\left(\frac{100}{100 - R_{Cu}}\right)}{\ln\left(\frac{100}{100 - R_{Fe}}\right)}$	Beloglazov
$SI_{BR} = \frac{(100 - R_{Fe})R_{Cu}}{(100 - R_{Cu})R_{Fe}} \cdot \frac{c_{Fe}}{c_{Cu}}$	Broadbent

A modo de ejemplo se evaluará el índice de selectividad de dos pruebas de flotación batch, en las cuales difieren únicamente en el tipo de espumante utilizado. En un caso se utilizó MIBC (Alcohol) y en el otro F507 (poliglicol). Los índices usados para evaluar la separabilidad corresponden al análisis de las constantes cinéticas obtenidas de los perfiles de recuperación versus tiempo y las curvas de separabilidad (i.e., recuperación metalúrgica versus recuperación másica) que relaciona la termodinámica del proceso. En la **Tabla 2** se muestran los datos de constantes cinéticas obtenidas a partir de los tests de flotación y la razón de estas que dan origen al índice de selectividad.

Tabla 2. Valores de separabilidad utilizando el índice que relaciona las constantes cinéticas.

	MIBC	F507
k_{Cu}	1,64	2,07
k_{Fe}	0,86	1,34
$S_{k_{Cu}/k_{Fe}}$	1,89	1,54

Al comparar el índice de selectividad de ambas pruebas se puede ver que el F507 presenta un valor menor que el MIBC por lo que estaría indicando que es un reactivo menos selectivo. La **Figura 17** muestra las curvas de separabilidad para el Cu y el Fe, que se obtienen al graficar la recuperación metalúrgica (%) en función de la recuperación másica (%). La separabilidad en este caso viene dada por la distancia existente entre la diagonal (que indica la no separabilidad) hasta el punto máximo de curvatura o hasta el rendimiento del proceso (i.e., recuperación másica acumulada).

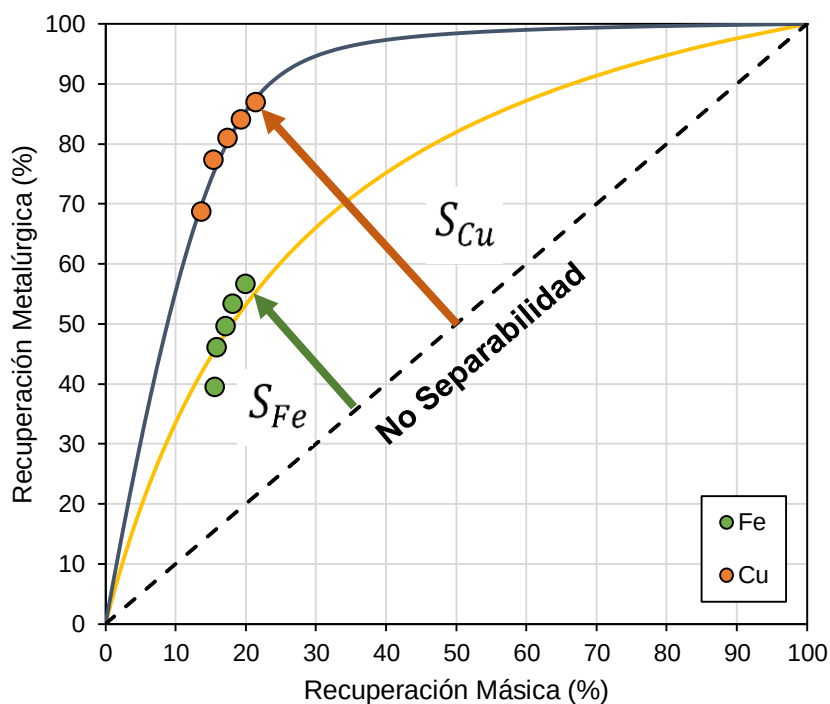


Figura 17. Curva de separabilidad para Cu y Fe de un test de flotación batch.

En la **Figura 17** se observan 2 rectas trazadas (verde asociada al Fe y naranja asociada al Cu), la distancia de estas indicaría la separabilidad del proceso y matemáticamente se expresarían mediante la **Ecuación 9**.

$$SS = \frac{R_{Metalúrgica} - Rendimiento}{\sqrt{2}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

$R_{Metalúrgica}$: Recuperación metalúrgica del elemento de interés (%).

$Rendimiento$: Rendimiento del proceso asociado a la recuperación másica (%)

Después de aplicar la ecuación antes mencionada en los datos que se muestran en la **Tabla 3**, se obtuvieron los índices que se pueden observar en la misma tabla.

Tabla 3. Datos y resultados para el cálculo del índice de selectividad mediante curva de separabilidad.

	MIBC		F507	
	Cu	Fe	Cu	Fe
Rendimiento (%)	18,2	18,2	21,3	21,3
Rec. Metalúrgica (%)	82,5	52,0	86,8	56,6
S_{Cu} y S_{Fe}	45,5	23,9	46,4	25,0
Razón respecto al Fe (S_{Cu}/S_{Fe})	1,90	1	1,86	1

Al comparar la razón entre las distancias calculadas y referenciadas respecto al Fe, se puede ver que para el caso del MIBC se obtiene un valor levemente mayor lo que estaría indicando que mediante este parámetro también sería un agente menos selectivo el F507 pues bien, un valor igual a la unidad indicaría que en el proceso no existió separación [28]. Esto de cierta forma estaría corroborando lo planteado inicialmente ya que algunos espumantes tienen la capacidad de recuperar más ganga mediante arrastre hidráulico, lo que provoca la contaminación de los concentrados haciendo que la ley disminuya.

Como se indicó anteriormente, los espumante tienen un efecto anti coalescente sobre las burbujas, permitiendo que se mantenga en su ascenso de un tamaño razonable y opimo para el proceso. Estas corresponden a la fuerza motriz del proceso de flotación y tener un entendimiento de las medidas de dispersión de aire es necesario.

2.3.2. Medidas de dispersión de aire

Las medidas de dispersión de aire hacen referencia a la hidrodinámica del proceso en la cuales se incluyen la velocidad superficial de gas (J_g), gas holdup (ε_g) y el flujo de área superficial de las burbujas (S_b) [3]. Es importante destacar que estas medidas definen la métrica del aire en el proceso de flotación.

2.3.2.1. Velocidad superficial de gas (J_g)

La velocidad superficial de gas (J_g , cm/s) se define como la tasa de flujo volumétrico (Q_g , cm^3/s) sobre el área de sección transversal de la máquina de flotación (A , cm^2), como lo muestra la **Ecuación 10**. Los rangos típicos en sistema de flotación son de 0,5 – 2,5 cm/s , dependiendo de los factores como el tamaño de burbuja y la reología del sistema [1]. La velocidad superficial de gas juega un rol fundamental en la cinética del proceso de flotación [29].

$$J_g = \frac{Q_g}{A}$$

Ecuación 10

Un aumento en el flujo superficial de gas aumenta el número de burbujas que atraviesan la interfaz de la zona de pulpa y la zona de espuma, lo que hace que agua y partículas entren en la zona de espuma.

La **Figura 18** muestra la relación existente entre el diámetro de burbuja (d_b) y la velocidad superficial de gas (J_g). Se observa que a medida que aumenta el flujo de gas, el tamaño de las burbujas aumenta.

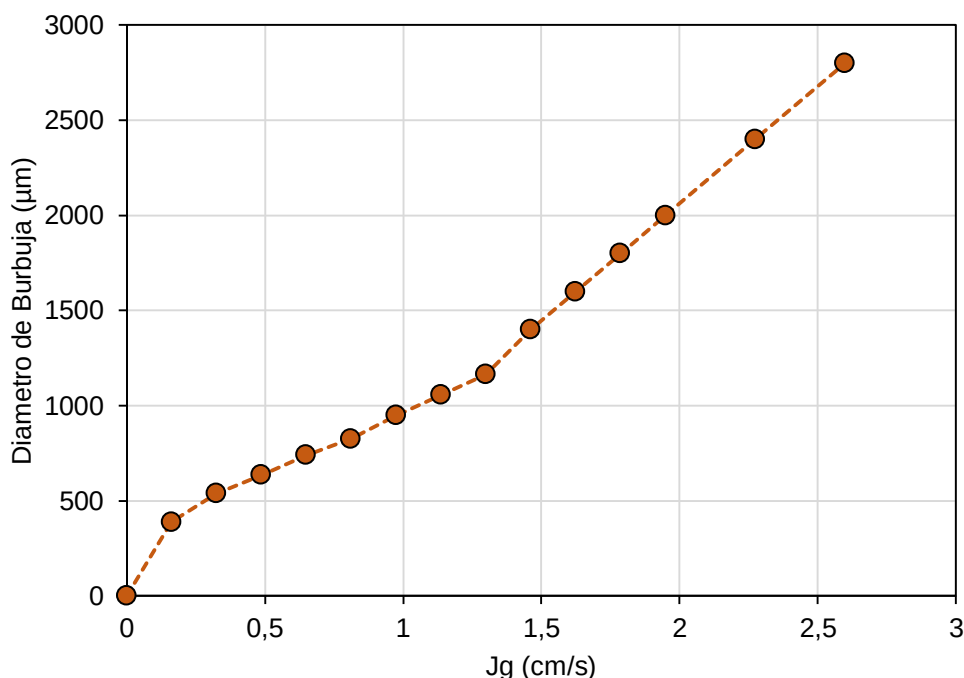


Figura 18. Gráfico especulativo del comportamiento del diámetro de burbuja (d_b) en función de la velocidad superficial de gas (J_g).

El tamaño de burbuja es una variable resultante del flujo superficial de gas (i.e., a mayor J_g , más grande es el tamaño de la burbuja). Siguiendo la misma temática es común pensar que el gas holdup se comportaría de igual forma, es decir aumentar indefinidamente a medida que aumenta la velocidad superficial de gas, sin embargo, en la **Figura 19** se muestra la relación existente entre el gas holdup y la velocidad superficial de aire. se observa que a medida que aumenta J_g , la concentración de aire en la zona de colección (i.e., gas holdup) aumenta hasta un valor máximo que se relaciona con las características de diseño asociadas al reactor donde la inyección de aire ocurre (i.e., celda de flotación) y después disminuye puesto que la celda de flotación no es capaz de procesar todo el caudal de aire, generando tamaños de

burbuja muy grandes las cuales residen un muy corto tiempo en la zona de colección resultado en una disminución del gas holdup.

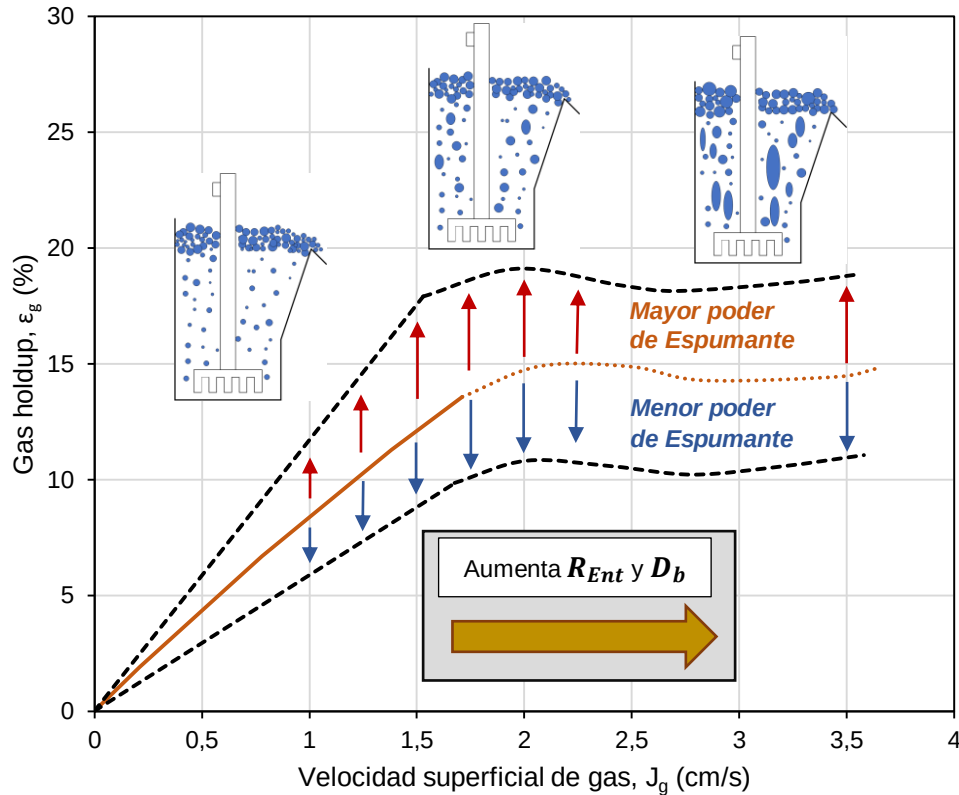


Figura 19. Gráfico especulativo del comportamiento del gas holdup (ϵ_g) en función de la velocidad superficial (J_g) (adaptado de Finch y Dobby 1990) [30].

En el grafico antes visto (**Figura 19**) se muestra una banda de error (línea negra segmentada) pues bien la química de los espumantes controlará el diámetro de burbuja, haciendo que en algunos casos para un mismo J_g se obtengan valores mayores o menores de gas holdup (ϵ_g) dependiendo de que tan buenos atributos tengan los espumantes para retardar la coalescencia, de aquí proviene el concepto de la fuerza del espumante. Hay que hacer mención que la velocidad superficial de gas (J_g) hará que aumente el número de burbujas que atraviesan la interfaz zona de colección-espuma, haciendo que el agua recuperada sea mayor y finalmente logrando que los sólidos recuperados por arrastre hidráulico (R_{Ent}). Finalmente, y como se mencionó anteriormente el diámetro de burbuja estará condicionado por el J_g , entonces a medida que esta variable aumenta, el tamaño de burbuja lo hará también.

2.3.2.2. Flujo de área superficial de burbujas (S_b)

El flujo de área superficial de burbujas, en los últimos tiempos ha tomado fuerza como variable para cuantificar la dispersión del gas [31]. Se define como la cantidad de área superficial de burbujas entregada por unidad de tiempo y área de la sección transversal de la celda, la cual está dada por la **Ecuación 11**.

$$S_b = \frac{6 * J_g}{d_b} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde J_g es la velocidad superficial de gas y d_b el diámetro de burbuja. Algunos autores como Gorain y Alexander estudiaron la relación existente entre la constante de velocidad de flotación (k) y el flujo de área superficial de burbujas (S_b). La

Figura 20 muestra los datos obtenidos en una celda de 100 [m^3] (puntos azules) y una celda piloto de 60 [L] (puntos naranjos) [32] [33].

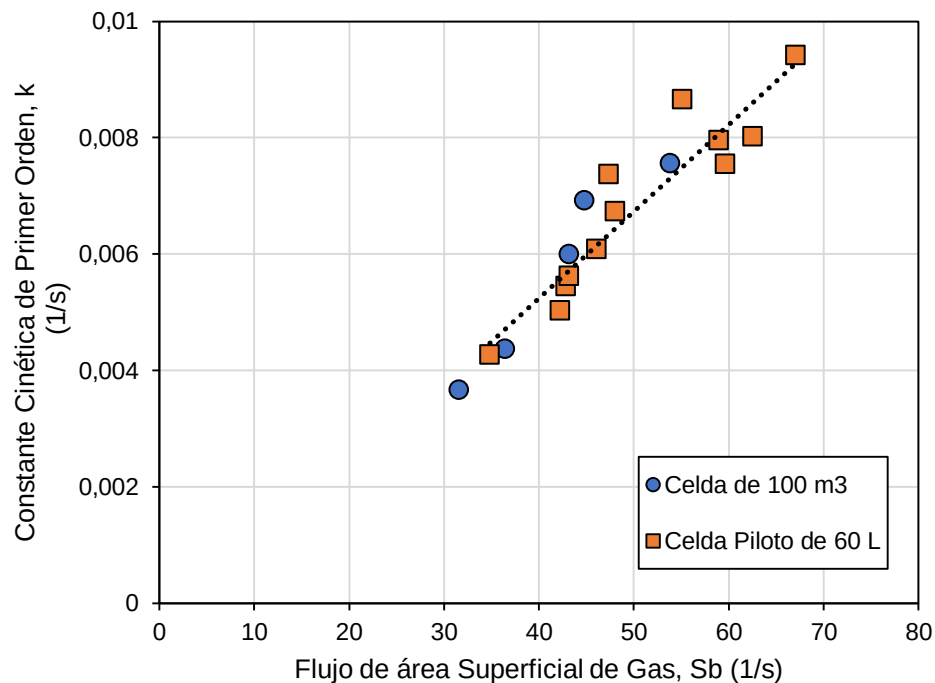


Figura 20. Relación entre contante cinética de primer orden y flujo de área superficial de burbujas (adaptado de Alexander 2000) [33].

Al agregar una línea de tendencia, es posible observar una relación directamente proporcional. Por lo tanto, esta variable podría dar algún indicador de la velocidad con la que ocurre el proceso de forma indirecta.

Según la **Ecuación 11** aumentar el J_g o bien disminuir el diámetro de burbuja, puede aumentar S_b . En la practica un aumento del J_g conlleva a un aumento del diámetro de burbuja, existiendo un tipo de compensación en la ecuación. Esta corresponde a una de las razones por la cuales hay un J_g optimo en cada proceso de flotación [30].

Finch (2000) encontró que al graficar el flujo de área superficial de burbujas (S_b) en función del gas holdup [%] se obtenía una relación lineal, la cual se puede observar en la **Figura 21** [34].

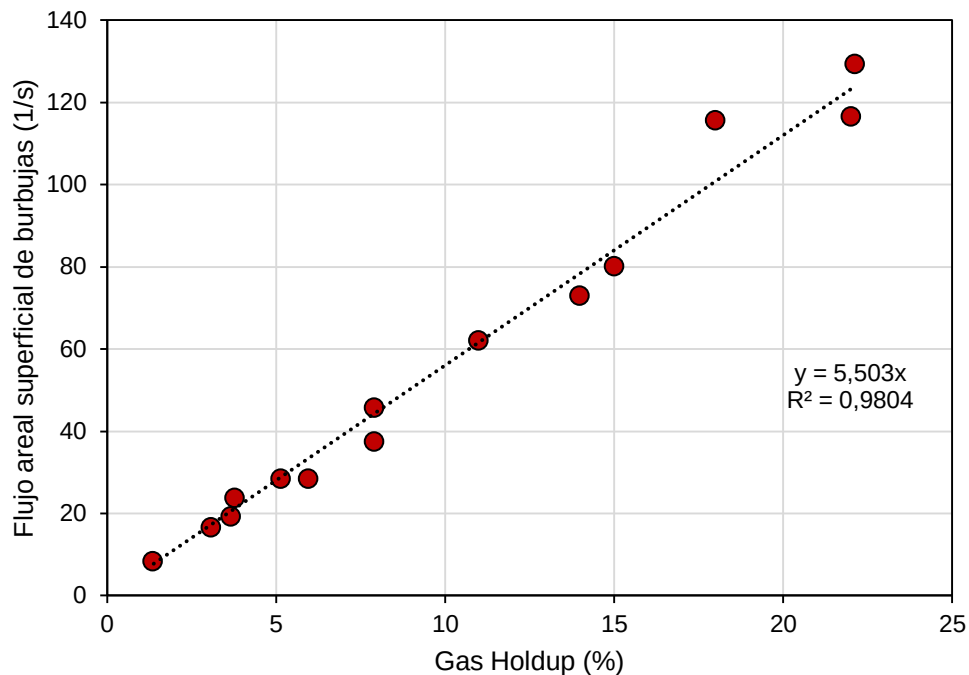


Figura 21. Flujo de área superficial de burbujas y gas holdup en celdas mecánicas de laboratorio (adaptado de Finch 2000) [34].

Al ajustar un modelo lineal al conjunto de puntos obtenidos de forma experimental, se obtiene la formula semi-empírica que relaciona el gas holdup (ε_g) y el flujo de área superficial de burbujas (S_b). La **Ecuación 12** muestra la relación antes mencionada.

$$S_b \approx 5,5 * \varepsilon_g \quad \text{Ecuación 12}$$

La **Ecuación 11** y **Ecuación 12** se podrían utilizar a conveniencia para poder estimar diámetros de burbuja de una forma indirecta, puesto que los valores de velocidad superficial y gas holdup serán datos conocidos. Todo esto en el contexto de la hipótesis

pues bien el espumante (i.e., la química del agente) determinará el tamaño de burbuja por la acción anticoalescente de estos. Finalmente mencionar que corresponde a una forma práctica de obtener diámetros de burbuja en procesos de flotación a diferencia de otros métodos propuestos por algunos autores (e.g., MBSA y UCT).

2.3.2.3. Gas holdup (ε_g)

Como se mencionó al inicio de esta memoria de titulación, el tipo y concentración de espumante afectan el diámetro de burbuja por fenómenos de coalescencia y por lo tanto, la concentración de aire en la zona de colección. El aire en la zona de colección es un factor importante que puede incidir significativamente en el tiempo de residencia de las burbujas dentro del reactor, el cual estará determinado por la velocidad de ascenso de estas. A modo de ejemplo se decidió evaluar 3 casos que diferían en la concentración de espumante utilizada (5, 10 y 15 [ppm]). Para llevar a cabo el cálculo de la velocidad de ascenso se utilizó la formula detallada en la **Ecuación 13** [30].

$$U_{sg} = \frac{J_g}{\varepsilon_g} \pm \frac{J_l}{(1 - \varepsilon_g)} \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

J_g : Velocidad superficial de aire (cm/s).

ε_g : Gas Holdup (%).

J_l : Flujo de rebalse de agua por unidad de área (cm/s).

El signo más o menos dependerá si se está trabajando en contra - corriente o en régimen co-corriente respectivamente.

Los datos útiles obtenidos de las 3 pruebas de flotación se encuentran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Data obtenida experimentalmente para el cálculo de la velocidad de ascenso para un mismo espumante (MIBC) a 3 concentraciones diferentes (5, 10 y 15 [ppm]).

	5 [ppm]	10 [ppm]	15 [ppm]	
J_g	0,526	0,526	0,526	[cm/s]
ε_g	0,14	0,17	0,22	[-]
J_l	0,00080	0,00098	0,00126	[cm/s]

Los resultados después de aplicar la ecuación antes mencionada se encuentran en la **Figura 22**, la que muestra los 3 escenarios a diferentes de condiciones hidrodinámicas.

El cuadro A ilustra una condición con una concentración de aire (i.e., gas holdup) del 14% con un tamaño de burbuja de 380 μm y una velocidad de ascenso de 3,8 cm/s , mientras que el cuadro B muestra un estado con un 17% de gas holdup, un diámetro de burbuja de 330 μm y una velocidad de ascenso de 3,1 cm/s , finalmente el cuadro C se muestra un gas holdup del 22% con un tamaño de burbuja de 260 μm y una velocidad de ascenso de burbuja de 2,4 cm/s .

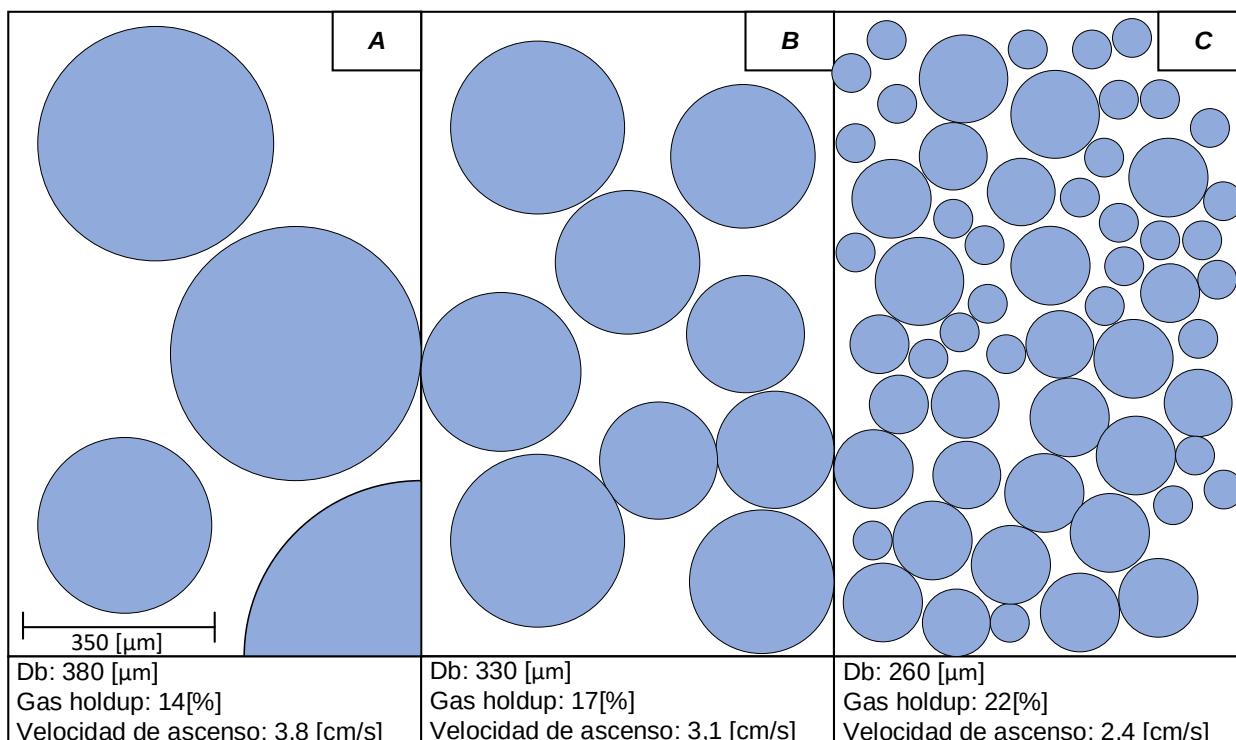


Figura 22. Diagrama ilustrativo del gas holdup, diámetro de burbuja y velocidad de ascenso para 3 condiciones diferentes.

Con esto se puede dilucidar que a mayores valores de gas holdup, el diámetro de burbuja disminuye siempre y cuando el flujo sea constante para todos los casos. Al disminuir el diámetro de burbuja, su velocidad de ascenso a la interfaz espuma-zona de colección disminuirá también, haciendo que finalmente las burbujas residan un tiempo mayor en la zona de colección.

El gas holdup (ε_g) corresponde a un parámetro adimensional y se define como la fracción volumétrica de fase gaseosa en cualquier punto de una celda con agitación mecánica (i.e., CSTR, Continuously Stirred Tank Reactor) como lo describe la **Ecuación 14** [1].

$$\varepsilon_g = \frac{V_g}{V_t} * 100\% \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde

V_g : Volumen de gas en la zona de colección.

V_t : Volumen total de la zona de colección.

Se entiende que la química de los reactivos determinará e influirá en lo antes mencionado, existiendo una oportunidad para realizar la evaluación mediante Gas holdup y recuperación de agua.

Comúnmente son dos los métodos utilizados para obtener el gas holdup. Por una parte, se puede realizar midiendo la presión del sistema y también por medición de la conductividad eléctrica en la zona de colección.

La medición por presión diferencial se puede utilizar si se conoce la densidad de la pulpa sin aire. Si se tienen dos medidas de presión a distinta profundidad dentro de la celda, se puede estimar el contenido de gas mediante la **Ecuación 15**.

$$\varepsilon_g = \left(1 - \frac{\Delta P}{\rho_{sl} * g * l}\right) * 100\% \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde

l : Diferencia de altura entre los puntos donde se mide la presión.

ΔP : Corresponde a la diferencia de presiones entre los dos puntos.

ρ_{sl} : Densidad de la pulpa.

La conductividad eléctrica es función de diferentes fases en una dispersión. De acuerdo con el modelo de Maxwell [35] el cual se muestra en la **Ecuación 16**, cuando se tiene una dispersión (i.e., pulpa más aire), se puede determinar la concentración volumétrica de la fase no conductora, en este caso el aire, si se sabe la conductividad de la dispersión y la conductividad de la pulpa.

La **Figura 23** esquematiza lo mencionado anteriormente en cuanto a lo que es la pulpa (i.e., mineral más agua) y la dispersión (i.e., mineral, agua y aire). La conductividad eléctrica de la pulpa en todo momento debiese ser mayor que la de la dispersión (i.e., $\kappa_{sl} > \kappa_d$), pues bien, el aire no conduce la electricidad [36].

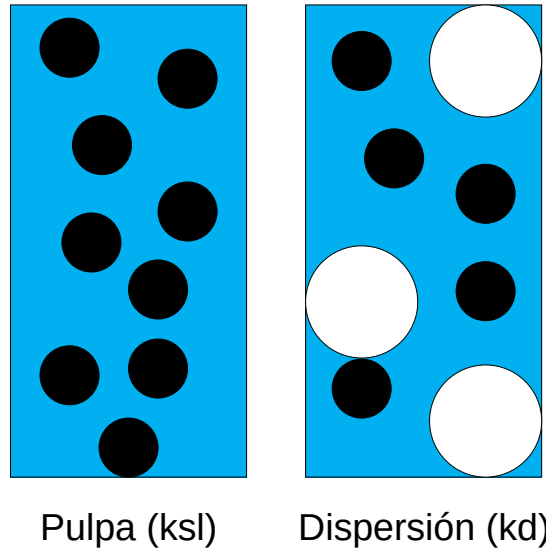


Figura 23. Medición de gas holdup por conductividad (Adaptado de cortes-Lopez 1998) [36].

De esta manera la fórmula de maxwell viene dada por la **Ecuación 16**.

$$\varepsilon_g = \left(\frac{1 - \left(\frac{\kappa_d}{\kappa_{SL}} \right)}{1 + 0,5 * \left(\frac{\kappa_d}{\kappa_{SL}} \right)} \right) * 100\%$$

Ecuación 16

Dónde:

κ_d : Conductividad eléctrica de la dispersión (pulpa más aire) (mS/cm).

κ_{SL} : Conductividad eléctrica de la pulpa sin aire (mS/cm).

En los últimos años la tomografía de resistividad eléctrica (i.e., ERT) ha tomado fuerza para la obtención de perfiles de gas holdup el cual presenta ventajas por ser una técnica no invasiva, sin embargo, un poco complejo de implementar por la sofisticación del método [37].

Recientemente Gong et al. [38] logró medir gas holdup mediante ondas ultrasónicas, basándose en que en sistema bifásico se produce la atenuación de la energía del

sonido por fenómenos de adsorción y dispersión de esta, la cual es posible cuantificarla y así estimar un valor de concentración de aire.

Dentro de los métodos vistos para la medición de holdup, la conductividad eléctrica resulta ser la más práctica de implementar en un sistema de flotación batch, por ser poco invasivo y también por el hecho de que la altura del reactor es relativamente baja, por lo que se hace difícil medir diferencias de presión. Otro punto a favor que presenta medir holdup mediante conductividad es su bajo costo.

Como los espumantes afectan el diámetro de burbuja evitando la coalescencia, se entenderá que el tipo y concentración de este agente tendrá un impacto global en el gas holdup. Motivo por el cual se abre una ventana para evaluar espumantes y poder comparar entre las principales familias químicas existentes.

2.3.2.4. Distribución de tamaños de burbuja

El diámetro de burbuja promedio es un factor determinante en el proceso de flotación, puesto que, en virtud del mecanismo de colisión de partículas y atrapamiento, las burbujas no deben ser excesivamente grandes o pequeñas. Cuando las burbujas son muy pequeñas, las partículas no tienen el tiempo de contacto suficiente, o si la colisión ocurre, la flotabilidad de las burbujas puede ser muy baja. Por otra parte, mientras el tamaño de burbuja aumenta, aumenta la fuerza de las líneas de flujo, haciendo más dificultosa la colisión partícula-burbuja [3].

El tamaño de burbuja está fuertemente influenciado por el flujo de gas, el dispositivo de generación de burbujas y la presencia de espumante [3].

La acción del espumante en el diámetro de burbuja se atribuye comúnmente al control de la coalescencia, disminuyendo dicho factor con el aumento de la concentración de espumante, causando así la preservación del tamaño de burbuja originalmente creado por un tiempo más largo. Después de cierta concentración denominada concentración crítica de coalescencia (i.e., CCC), el tamaño de burbuja no se ve afectado por la concentración de espumante debido a que la coalescencia se ve completamente retardada, esto es posible evidenciarlo en la **Figura 24** que representa los diámetros de burbujas obtenidos en distintas pruebas a diferentes concentraciones de espumantes,

en la cual se observa que a mayores valores, esta métrica tiende a ser constante pues se asume que se alcanzó o se está alcanzando el valor CCC (punto rojo en la gráfica).

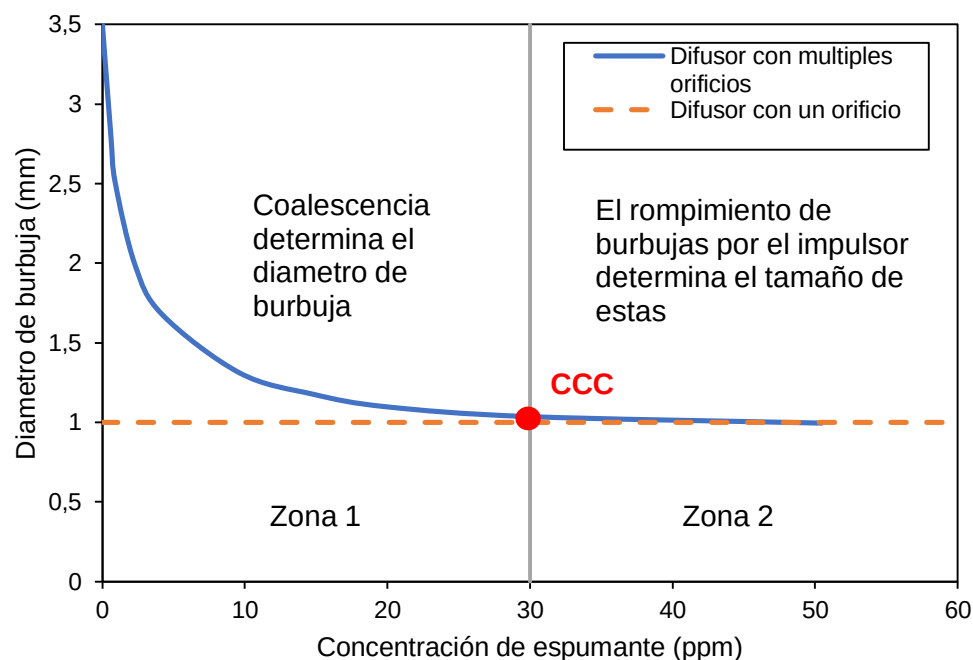


Figura 24. Diagrama esquemático del efecto de la concentración de espumante sobre el diámetro de burbuja (adaptado de Grau 2005) [39].

También se identifican dos zonas en la gráfica, la zona 1 en la cual la coalescencia es quien determina el tamaño de burbuja y una zona 2 en la cual el rompimiento de las burbujas ocasionadas por el impulsor determina el tamaño. Esta grafica deja en evidencia que el principal mecanismo por el cual las burbujas aumentan su tamaño es la coalescencia, pues al utilizar un difusor con solo un orificio (línea segmentada) el tamaño de burbuja permanece constante, totalmente contrastado con los resultados obtenidos al tener múltiples orificios (línea continua) [39].

Cabe mencionar que diferentes tipos de espumantes tendrán diferentes valores de CCC [29], sin embargo, este valor no solo estará determinado por la calidad del espumante, sino que también principalmente por cualidades de la máquina de flotación y el flujo de aire utilizado.

El tamaño de burbuja afectara de forma inversa al gas holdup pues al disminuir el tamaño, la velocidad de ascenso de burbuja disminuye haciendo que el tiempo de residencia del aire en la zona de colección sea mayor, lo que se traduce finalmente en

un aumento del gas holdup. En otras palabras, una concentración mayor de aire en la zona de pulpa.

2.3.2.5. Efecto del solido en el gas holdup (ϵ_g) y diámetro de burbuja (D_b)

Como observaciones generales, un cambio en el gas holdup refleja un cambio en la velocidad de ascenso de la burbuja. Es decir, un aumento en la velocidad de la burbuja causara una disminución en el gas holdup y viceversa. El cambio en la velocidad está relacionado con un cambio en el tamaño de burbuja, un aumento en la velocidad se asocia con un tamaño de burbuja más grande [40].

Siguiendo esta lógica se han propuesto mecanismos que permiten explicar los cambios en el gas holdup en presencia de sólidos.

Finch y Dobby (column flotation) [29] asociaron la velocidad de ascenso del agregado (i.e., partícula más burbuja) formado en la zona de colección con el gas holdup. Lo que plantearon es que a medida que las partículas se adhieren a las burbujas estas tienden a disminuir su velocidad de ascenso hacia la interfase puesto que en su conjunto existirá una mayor inercia. Por lo tanto, estas al residir más tiempo dentro del reactor, provocarían un aumento del gas holdup.

Como es posible evidenciar, los sólidos tienen la capacidad de influir sobre el gas holdup, por lo tanto, es una variable que debe ser considerada al momento de evaluar espumantes, y no dejarla de lado como lo han hecho algunos autores dedicados a estudiar el tema.

En base a las distintas cualidades y factores en los que impactan los espumantes, se han desarrollado métodos para evaluarlos y caracterizarlos y así poder encontrar el máximo rendimiento que pueden entregar.

2.3.3. Métodos de clasificación y evaluación de espumantes

Existen 2 grandes grupos que permiten separar los métodos que se han utilizado para evaluar y caracterizar el rendimiento de los espumantes a lo largo de los años [41].

Por un lado están los métodos estáticos que corresponden a aquellas pruebas en que la tasa de formación de espuma alcanza un equilibrio con la tasa de decaimiento,

realizándose las mediciones pertinentes en mencionado punto y por otra parte están los métodos dinámicos los que consisten en pruebas en que la tasa de formación es cero, esto quiere decir que se llega al estado de equilibrio anteriormente nombrado y se corta el suministro de gas, midiéndose alguna característica mientras la espuma está colapsando [41]. La **Figura 25** ilustra los tipos de pruebas antes mencionadas, en donde al lado izquierdo se muestra el método estático en el cual la tasa de formación es igual a la tasa de decaimiento, en este punto se realiza la medición. Por otra parte, en el lado derecho no existe tasa de formación (no hay suministro de aire) por lo tanto, se observan los cambios del colchón (colapso de la espuma) a medida que avanza el tiempo.

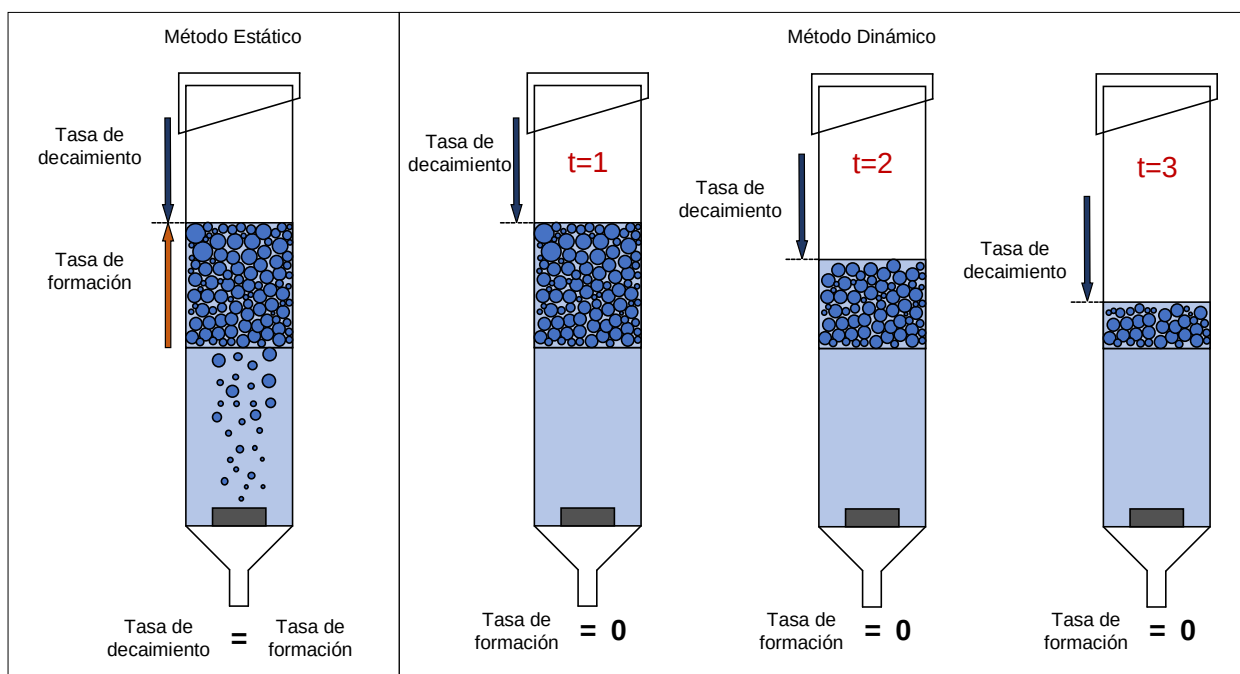


Figura 25. Diagrama ilustrativo del método estático y dinámico utilizado para evaluar espumantes.

A lo largo del tiempo los espumantes han podido ser caracterizados de distintas formas y uno de los primeros en buscar un método de evaluación fue Bikerman (1938), ideando un sistema constituido por una columna, la cual contenía una solución de agua y espumante en donde se le inyectaba gas provocando la formación de un colchón de espuma, de acá se tomaban mediciones de lo que era el volumen máximo formado de espuma y del flujo volumétrico de aire, buscando medir la vida media que podía tener la burbuja en la espuma [1].

Malysa (1978) precisó el tiempo de retención (i.e., rt) que mide el tiempo medio desde que la burbuja nace hasta que llega a la superficie. Este valor se obtiene como la pendiente del gráfico Volumen de gas total en el sistema versus caudal de gas [42]. La **Ecuación 17** muestra lo mencionado anteriormente.

$$rt = \frac{\Delta V_g}{\Delta Q_g} \quad \text{Ecuación 17}$$

Dónde:

V_g : Volumen total de gas (cm^3)

Q_g : Caudal de gas que ingresa a la celda (cm^3/s)

La **Figura 26** muestra el resultado de graficar el volumen de gas en función del caudal de gas para el n-heptanol a 3 concentraciones diferentes.

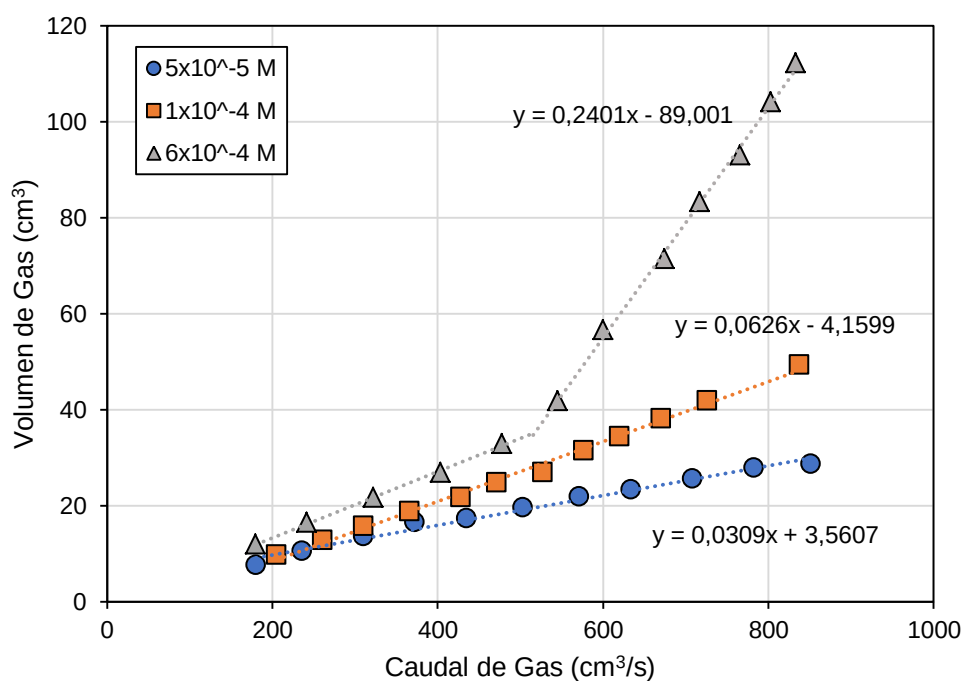


Figura 26. Gráfico de volumen de gas en función del caudal de gas inyectado para n-heptanol a 3 concentraciones diferentes.

Para estimar el valor de rt a partir del gráfico es necesario calcular la pendiente formada en la sección final de la curva. Era de esperar que el valor de rt aumente cuando se adiciona una mayor cantidad de espumante para un mismo agente y de esta

forma lo demuestran las pendientes mostradas en la **Figura 26**. Por otra parte, cabe notar que es un proceso bastante largo puesto que se deben hacer pruebas a diferentes flujos de aire.

Malysa (1985) definió el Índice dinámico de espumabilidad (i.e., DFI) que corresponde a la pendiente límite del grafico entre tiempo de retención y concentración de espumante, cuando la concentración tiende a cero y se define según la **Ecuación 18** [43].

$$DFI = \left(\frac{\partial rt}{\partial C} \right)_{C \rightarrow 0} \quad \text{Ecuación 18}$$

Una ventaja que ofrece este método es el de poder comparar espumantes cuando estos tienen condiciones de espumabilidad similares, sin embargo, es posible notar que es un proceso largo el de obtener los valores de rt a distintas concentraciones de espumantes.

Xu (1990) propuso un nuevo método para evaluar la estabilidad de la espuma y se basó en que los espumantes al ser ensayados inyectándole aire a una solución, se obtenían diferentes alturas de espumas para cada tipo de estos agentes surfactantes. Este método correspondía a pruebas bastante practicas al momento de realizarlas y al evaluar estos reactivos. La desventaja estaba en que algunos espumantes reportaban igual altura de espuma, por lo tanto, era necesario utilizar otro criterio que permitiese decidir la mejor opción [44].

Iglesias (1995) utilizando el método de Bikerman pero modificado inyectó gas en la columna hasta alcanzar un equilibrio dinámico entre la altura de espuma y la tasa de decaimiento. Posteriormente se dejaba colapsar el colchón de espuma cortando la inyección de aire suministrado y para poder finalmente medir el tiempo en llegar a la mitad de la altura máxima formada de espuma, de esta forma acuñó el término de tiempo de vida media para la espuma [45]. Es un método bastante práctico y de esta forma podía medir la persistencia de la espuma.

Comley (2002) desarrolló una investigación para caracterizar los espumantes mediante la tensión superficial que generan las burbujas, utilizando el método de presión máxima

de burbuja, en el cual se hace pasar un gas inerte por un capilar fino en una solución de espumante y agua. A medida que crece la burbuja, la presión dentro de esta aumenta y posteriormente aplicando la ecuación de Laplace es posible llevar esa presión a tensión superficial [46]. La fórmula antes mencionada se representa en la **Ecuación 19**.

$$\gamma = \alpha \frac{\Delta P r}{2} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

γ : tensión superficial (*dyn/cm*)

α : Constante asociada a las características del aparato de medición (-)

r : Radio del capilar (*cm*)

ΔP : Diferencia entre la presión máxima, la presión hidrostática y presión atmosférica (i.e., $\Delta P = P_{max} - P_{Hidrostatica} - P_{Atmosférica}$).

El método parece ser una buena alternativa para evaluar los espumantes debido a que estos actúan directamente en la tensión superficial de las burbujas, sin embargo, los equipos para realizar estas pruebas parecen ser muy sofisticados escapándose de los objetivos de esta propuesta.

Tucker (1994) describió el UCT Bubble Size Analyzer, basado en la medición de un cilindro de volumen equivalente formado, cuando las burbujas se dibujan en un capilar de diámetro conocido. Entonces a partir del volumen total y número de burbujas contadas es posible estimar un diámetro de burbuja promedio [47]. Una de las grandes desventajas que presentaba este método era el hecho de que para sistemas trifásicos era necesario utilizar una solución filtrada y también el hecho de que las mediciones eran puntuales dentro de una misma celda, es decir no se asegura la representatividad al momento de medir.

Hernández (2004) desarrolló un analizador de burbujas llamado The McGill Bubble Size Analyzer (MBSA), el sistema consiste en propiciar las condiciones para que las burbujas asciendan y queden en un plano inclinado en el cual son fotografiadas, posteriormente las imágenes son procesadas por un software que permiten obtener los respectivos

diámetros de burbujas. El método se basa en la capacidad que poseen los espumantes de condicionar los tamaños de burbuja [48].

Moyo (2005) utilizó la capacidad de los espumantes de influir en la recuperación de agua, sabiendo que algunos espumantes tienen mayor capacidad de transportar agua hasta la zona de espuma, afectando directamente en las variables metalúrgicas que son la ley y la recuperación. La recuperación de agua la cuantificó midiendo el flujo de rebalse de agua por unidad de área (J_{wo}) y se representa mediante la **Ecuación 20** [1].

$$J_{wo} = \frac{Q_{wo}}{A} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde

Q_{wo} : flujo de espuma (mL/s)

A : Sección transversal de la celda (cm^2)

El método parece ser una buena opción por el simple hecho de que solo se necesita cuantificar la recuperación de agua de la prueba de flotación. En este caso fue utilizado en columnas de flotación, pero sin embargo existe la posibilidad de que pueda ser aplicado en celda de flotación batch agitadas mecánicamente.

Azgomi (2007) se basó en el Gas holdup para poder clasificar los espumantes. Realizó experimentos en una columna y se midió la concentración de gas mediante la diferencia de presión generada en el sistema. Como resultado obtuvo que algunos espumantes tienen una mayor capacidad de retener aire en la zona de colección [41]. Este método para cuantificar la calidad de los espumante desde un punto de vista hidrodinámico parece ser una buena opción, pero difícilmente aplicable a celdas de flotación batch por la razón de que las alturas de estas son mucho más inferiores que una columna, por lo tanto, las medidas de presión podrían no ser perceptibles.

Yan-Ling Gu (2012) modificando el método de Bikerman fue capaz de evaluar los espumantes de forma práctica basándose en 4 mediciones [49].

- Volumen máximo de espuma formada, sabiendo que los espumantes poseen distinta capacidad para formar espuma.
- Vida media de espuma, indicando la estabilidad de la espuma.

- Relación G-L, definiéndose como la razón entre el volumen de gas y volumen de agua consumido, lo cual estaría indicando la capacidad de transporte de agua hacia la zona de espuma.
- Velocidad media de ascenso de espuma.

Hay que hacer mención que los métodos expuestos anteriormente no corresponden al total existentes en el día de hoy, pero son los principales y que dan origen a variantes de métodos de caracterización y evaluación. Por otra parte, las pruebas y métodos expuestos se limitaron solo al sistema bifásico (gas y líquido), dejando de lado el sólido y/o la interacción que podría existir con otros reactivos (e.g., colector). Finalmente agregar que las pruebas se desligaron del proceso de flotación batch y solo la utilizaban para corroborar o refutar lo propuesto por los autores.

3. CAPÍTULO 3. METODOLOGIA Y DESCRIPCION EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de esta memoria se propuso llevar a cabo un set de experimentos que permitiesen evaluar algunos espumantes en un contexto de flotación batch.

3.1. MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPOS

Los experimentos se llevaron a cabo con mineral y reactivos específicos los cuales se describen a continuación.

3.1.1. MINERAL DE ALIMENTACIÓN

Para la realización de pruebas se trabajó con un mineral compósito traído desde Minera Lumina Copper Chile S.A. - Proyecto Caserones, con un contenido de 0,53% Cu, 1,80% Fe y 73 [ppm] Mo, de acuerdo al análisis proporcionado por espectroscopia de absorción atómica (i.e., EAA) realizado en un laboratorio externo a Solvay (i.e., Sercoc).

Se llevó a cabo un análisis mineralógico utilizando QemScan-PMA para identificar las principales especies contenidas en la muestra de alimentación, en donde se encontró que la mineralización principal corresponde a sulfuros de calcopirita, calcosina, en forma subordinada bornita, piritita y pirrotina. Existiendo la presencia de molibdenita. La muestra presenta escasos minerales de óxidos de cobre. Los minerales de ganga son principalmente (minerales formadores de roca) cuarzo, plagioclasas, feldespato

potásico, anfíboles y biotita. Mientras que los minerales de alteración principal son sericita, arcillas y limonitas.

Los minerales que aportan Cu son calcopirita, en forma subordinada calcosina, bornita, covelina y óxidos de Cu. En forma escasa a trazas se encuentran en la estructura cristalina de feldespatos. La **Tabla 5** muestra el aporte de cobre por especie mineralógica.

Tabla 5. Aporte de Cobre por especie.

Minerales	Masa Cu (%)
Calcopirita	0,13
Calcosina	0,36
Covelina	0,03
Bornita	0,04
Enargita	0,00
Óxidos de Cu	0,01
Cuarzo	0,00
Feldespato	0,01
Biotita	0,00
Arcillas	0,00
Otros	0,00

La **Figura 27** muestra los datos anteriormente tabulados en un gráfico de barras, en el cual se observa que los principales minerales de cobre que aportan este elemento son la calcosina y la calcopirita.

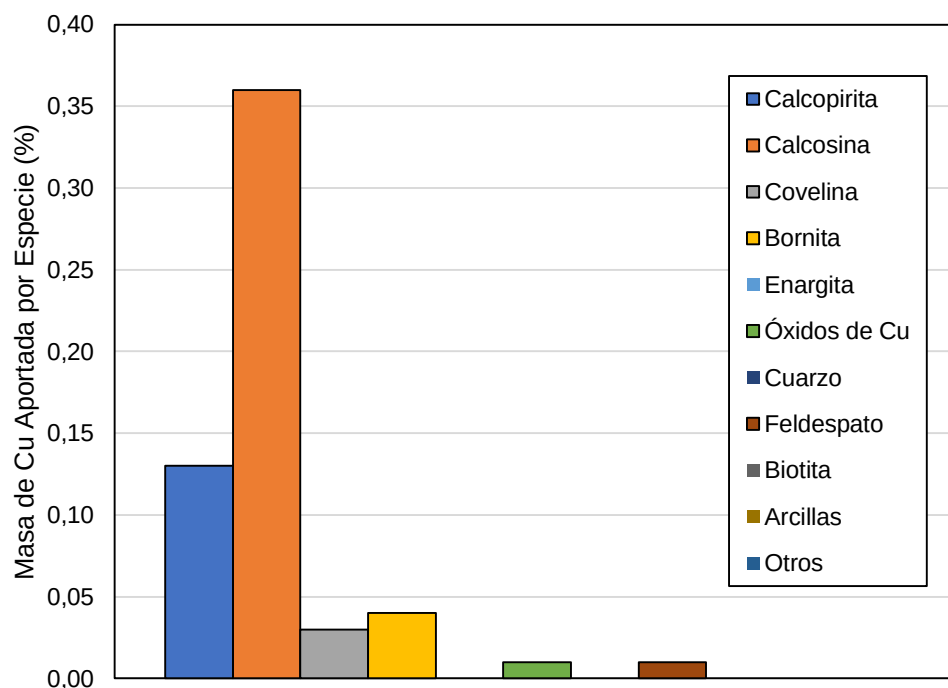


Figura 27. Aporte de Cobre por especie mineralógica.

Los minerales asociados a calcopirita corresponden a calcosina, bornita y pirita. Con respecto a la liberación de calcopirita, sus partículas se encuentran principalmente ocluidas y un 20% liberadas. Mientras que las partículas de calcosina se encuentran en un 50% liberadas.

De acuerdo con los requerimientos del laboratorio, el compósito se separó en bolsas de 1150 [g] y bajo malla #10 (2000 [μm]).

Tener un entendimiento de la mineralogía serviría para poder decir cuáles son las principales especies presentes en la alimentación y a su vez saber cuál es su aporte en la especie de interés (i.e., Cu, Fe y Mo).

Es de importancia saber la mineralogía a utilizar pues permitiría poner en contexto y sentar una base para el estudio de este proyecto, puesto que según estos requerimientos se eligen los colectores que permiten recuperar los minerales de interés.

3.1.2. Reactivos

Los espumantes utilizados en este proyecto de titulación fueron seleccionados de forma que se expusieran las propiedades de cada familia química de espumante. Basándose en lo antes mencionado se seleccionaron los siguientes espumantes detallados en la **Tabla 6** y que son producidos por Solvay.

Tabla 6. Descripción de Espumantes utilizados.

Espumante	Características	
AEROFROTH 70	Composición	Metil Isobutil Carbinol, mezcla de alcohol alifático, butanol.
	Color	Incoloro a blanco
	Aspecto	Líquido
	Temperatura de Ebullición	132°C
	Gravedad Específica	0,81 a 20°C
	Proveedor	Solvay
OREPREP F-501 FROTHER	Composición	Mezcla de alcoholes
	Color	Amarillo-marrón
	Aspecto	Líquido
	Temperatura de Ebullición	> 125°C
	Gravedad Específica	0,89 - 0,95 g/cm ³ a 25°C
	Proveedor	Solvay
OREPREP F-549 FROTHER	Composición	Éteres de glicol mixtos
	Color	Amarillo-marrón
	Aspecto	Líquido
	Temperatura de Ebullición	> 204,4°C
	Gravedad Específica	0,99 - 1,05 g/cm ³ a 25°C
	Proveedor	Solvay
OREPREP F-507 FROTHER	Composición	Poliglicol
	Color	Ámbar a oscuro
	Aspecto	Líquido
	Temperatura de Ebullición	Sin Dato Disponible
	Gravedad Específica	0,99 - 1,08 g/cm ³ a 25°C
	Proveedor	Solvay

Se muestran las principales propiedades químicas de estos agentes surfactantes. Los dos primeros agentes descritos (MIBC y F-501) corresponden a alcoholes, mientras que estos últimos (F-549 y F-507) corresponden a poliglicoles. Realizando una comparación entre estas dos grandes familias químicas es de esperar que los poliglicoles sean capaces de generar un mayor gas holdup que los alcoholes por el

hecho de que una capa más gruesa de agua estabiliza aún más las burbujas, es decir, retardan de mejor forma la coalescencia.

Además, para las pruebas se utilizaron los colectores reportados en la **Tabla 7** con sus respectivas propiedades químicas y físicas.

Tabla 7. Colectores utilizados en el experimento.

Colector	Características	
AERO 6404 PROMOTER	Composición	monotiofosfato, tiofosfato, Compuesto de Benzothiazole, N-Allyl-O-isobutyl thionocarbamate, Ditiofosfatos
	Color	Amarillo-marrón
	Aspecto	Liquido
	Temperatura de Ebullición	Sin Dato Disponible
	Gravedad Especifica	1,05 - 1,17 g/ml
	Proveedor	Solvay
AERO 9950 PROMOTER	Composición	Querosina, 4-metilpentan-2-ol, n-Butyoxycarbonyl-O-n-butyl thionocarbamate
	Color	Amarillo
	Aspecto	Liquido
	Temperatura de Ebullición	Sin Dato Disponible
	Gravedad Especifica	0,82 - 1,0 g/ml
	Proveedor	Solvay
Diesel	Composición	Mezcla compuesta de hidrocarburos
	Color	Amarillo claro
	Aspecto	Liquido
	Temperatura de Ebullición	175°C
	Gravedad Especifica	0,85 g/ml
	Proveedor	Shell

Estos colectores fueron escogidos específicamente para adherirse a ciertos minerales. Para el caso de AP9950, corresponde al colector primario el cual se utilizó para colectar sulfuros secundarios de cobre como lo son la covelina y la calcosina, mientras

que el AP6404 corresponde al colector secundario, el cual fue seleccionado para permitir la recuperación de calcopirita principalmente. El Diésel fue utilizado para coleccionar el mineral asociado al molibdeno (i.e., molibdenita).

Para el ajuste de pH se contó con cal apagada (i.e., hidróxido de calcio) y de esta forma permitir el trabajo en ambiente alcalino (i.e., pH de 9,5).

3.1.3. Equipos

Se utilizó la siguiente instrumentación en el desarrollo experimental de este trabajo. El esquema de instalación de estos se presenta en la **Figura 30**.

- a) Medidor de conductividad modificado (1): se diseñó un dispositivo que consiste en un medidor de conductividad marca Orion modelo 130T con un rango de medición de 0,1 [mS¹/cm] a 199,9 [mS/cm], con la adición de 2 cables unidos a los carbones del electrodo. Estos cables tipo caimán fueron unidos a 2 placas de acero inoxidable instaladas en la celda de flotación (la **Figura 28** muestra la configuración antes mencionada con las dimensiones utilizadas en el estudio), esto se hizo con la finalidad de que la medida fuese más representativa puesto que al utilizar directamente el electrodo en la celda, la medición se ve interferida por las burbujas. En la **Figura 30** el medidor de conductividad está indicado con el número 1.

¹ mS o a mili Siemens la cual es la unidad derivada del SI para medir la conductancia eléctrica.

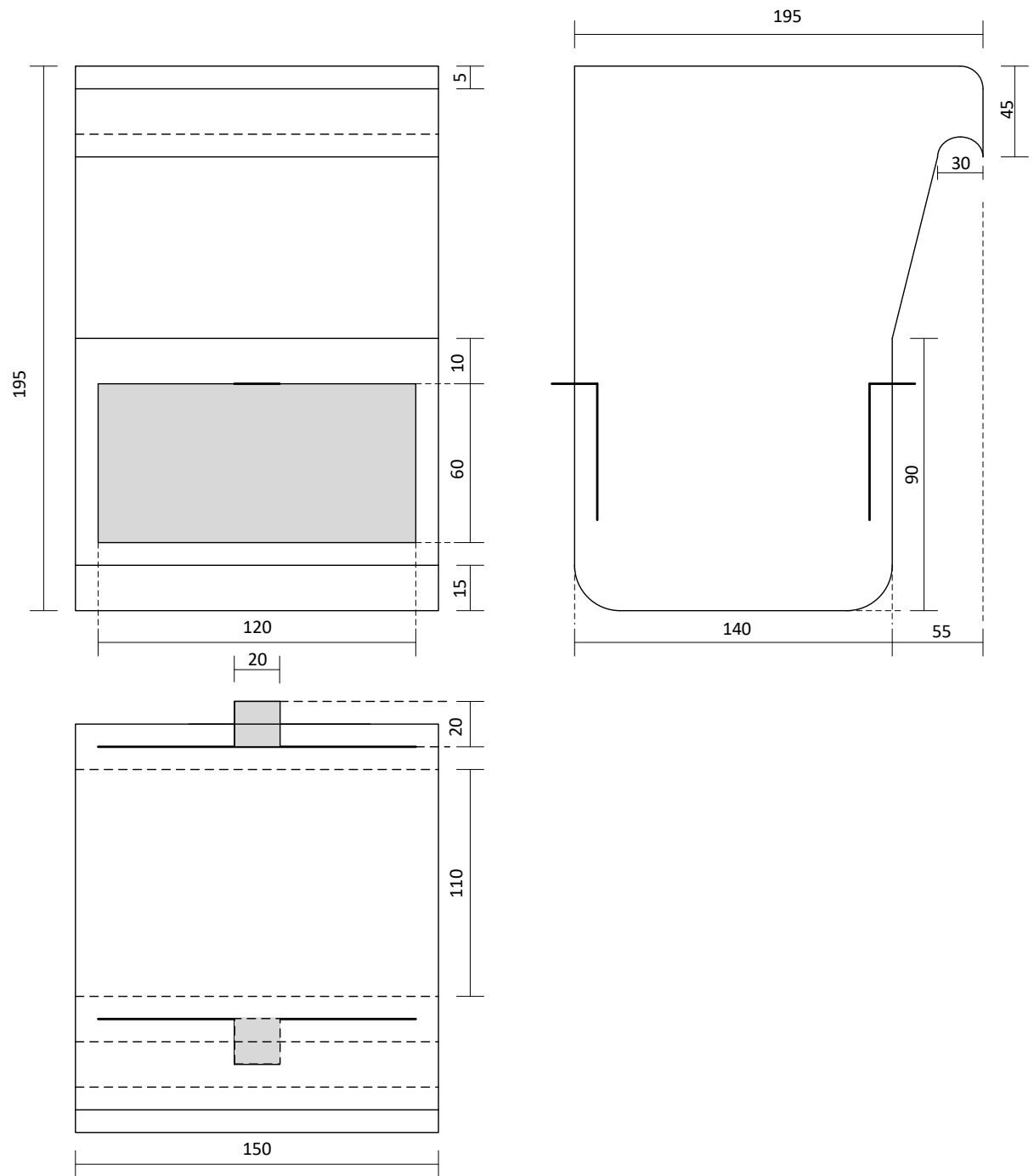


Figura 28. Diseño de la celda de flotación batch modificada para medir conductividad eléctrica (las unidades del diagrama se encuentran en milímetros).

- b) Rotámetro: El sistema cuenta con un rotámetro para el ingreso del aire graduado de 0 a 10 [L/min]. En la **Figura 30** el medidor de flujo volumétrico de aire está señalado con el número 2

- c) Celda mecánica de flotación marca Denver modelo D12 con mecanismo de tipo suspendido, incluyendo un tubo vertical de acero inoxidable con válvula de control de aire. Para realizar las pruebas se utilizaron 2 celdas acrílicas de 2,3 y 3 litros. En la **Figura 30** la máquina de flotación está señalada con el número 3, mientras que la celda acrílica por el número 4. Por otro lado, la **Figura 29** muestra un diagrama ilustrativo de la celda antes mencionada con sus principales partes que la componen.

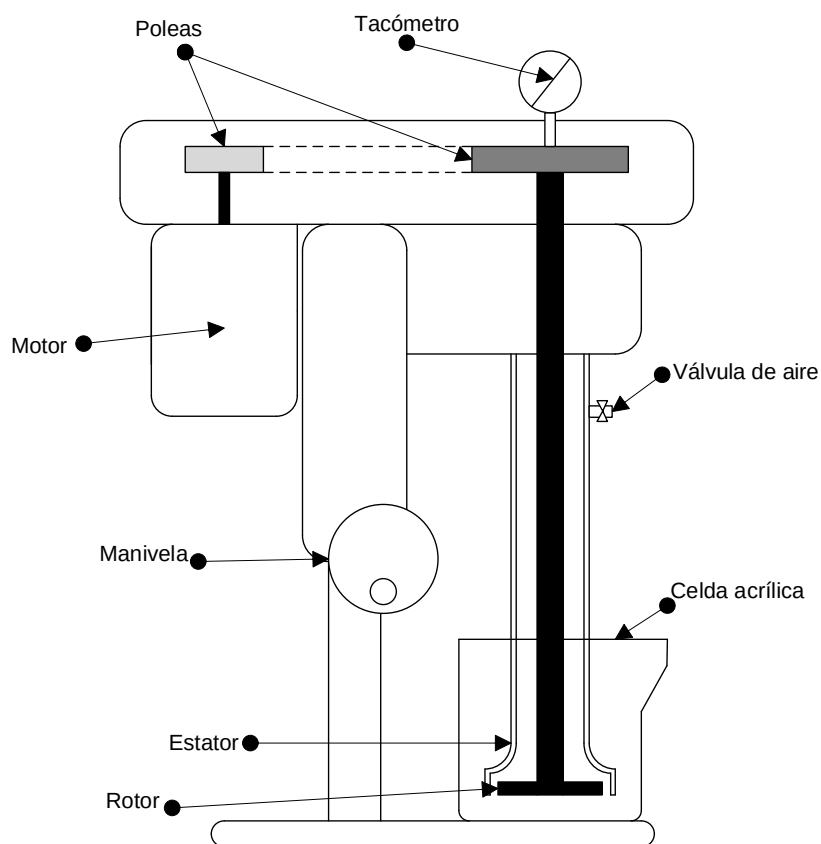


Figura 29. Diagrama de la máquina de flotación utilizada en la ejecución de este proyecto de memoria.²

- d) Variador de frecuencia: La celda cuenta con un variador de las rpm del impulsor. Corresponde a un sensor digital para medir la velocidad de agitación con una precisión, informada por el fabricante de $\pm 2\%$. La velocidad máxima de agitación es de 1500 (rpm).

² URL Modelo Denver D12 (<https://www.911metallurgist.com/equipment/denver-d12-laboratory-flotation-machine/>).

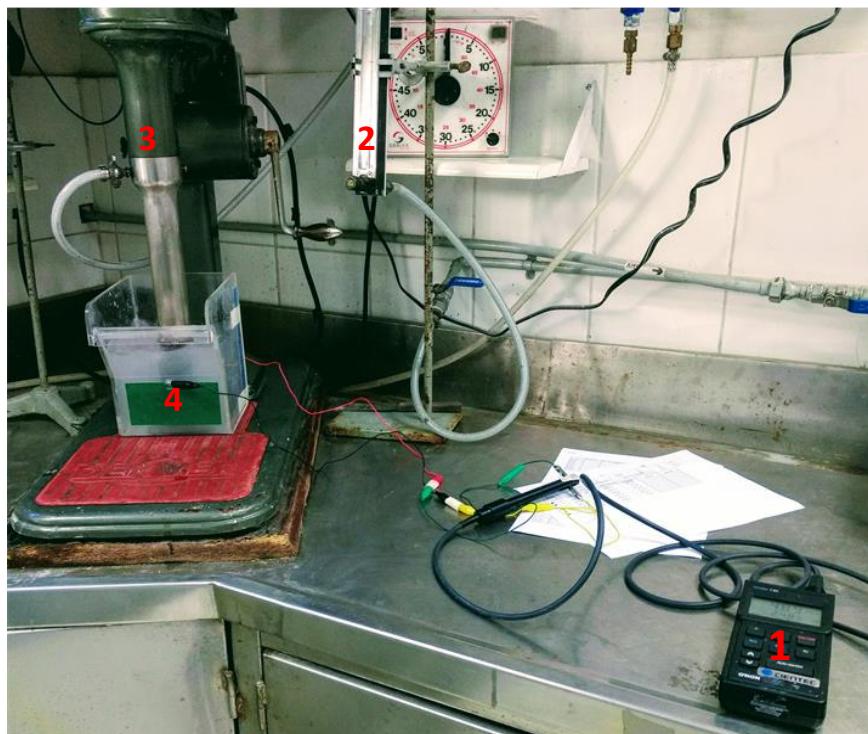


Figura 30. Arreglo experimental utilizado para la ejecución de los experimentos de flotación batch. (1) medidor de conductividad eléctrica modificado; (2) medidor de flujo de aire; (3) Máquina de flotación batch Denver D12; y (4) celda de flotación batch modificada.

Además de los equipos principales mencionados anteriormente, se utilizaron los siguientes equipos auxiliares para la realización de los experimentos.

- Medidor de pH HANNA HI 3222, con electrodos para pH y ORP.
- Balanzas de precisión Mettler Toledo con capacidad de 1510 [g].
- Compresor modelo Schultz, tipo CRPM-757, con capacidad para 230 [psi].
- Máquina tamizadora tipo Ro-Tap.

3.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las técnicas de medición se detallan a continuación, las cuales requirieron un tiempo de inducción y aprendizaje en su uso.

3.2.1. Cinética de molienda

Previo a las pruebas de flotación batch, es necesario realizar una curva de P_{80} en función del tiempo para entender los requerimientos energéticos en la reducción de tamaño deseada. Esta etapa también permite modelar la información experimental obtenida, y así poder determinar los tiempos de molienda requeridos para diferentes

granulometrías. A continuación, se listan las etapas llevadas a cabo para conminuir el mineral de estudio:

- a) Adicionar la carga de bolas estándar al molino batch.
- b) Agregar el mineral en conjunto con la cal para ajustar el pH según el estándar.
- c) Adicionar el agua y los reactivos (i.e., colector y modificador).
- d) Asegurar que el molino quede bien cerrado se debe ajustar el tiempo de la molienda.
- e) Ubicar el molino en los rodillos y bajar la tapa.
- f) Realizar la descarga del molino en coladores especiales que permiten retener las bolas y haciendo uso de agua.
- g) Realizar un proceso de deslame, utilizando un tamiz que permite separar la fracción de mineral bajo malla #200. La fracción sobre tamaño se filtra y se seca en la estufa.
- h) Realizar tamizaje del material conminuido (fracción sobre malla #200).
- i) Repetir los pasos desde la a) hasta la h) a distintos tiempos.

3.2.2. Flotación batch y obtención de concentrados

A continuación, se detallan los procedimientos para llevar a cabo una flotación batch desde que se somete a conminución el mineral hasta que se obtienen los resultados metalúrgicos. En la

Figura 31 se muestra un diagrama del proceso completo desde la etapa de molienda, flotación, hasta la obtención de los concentrados y relave.

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

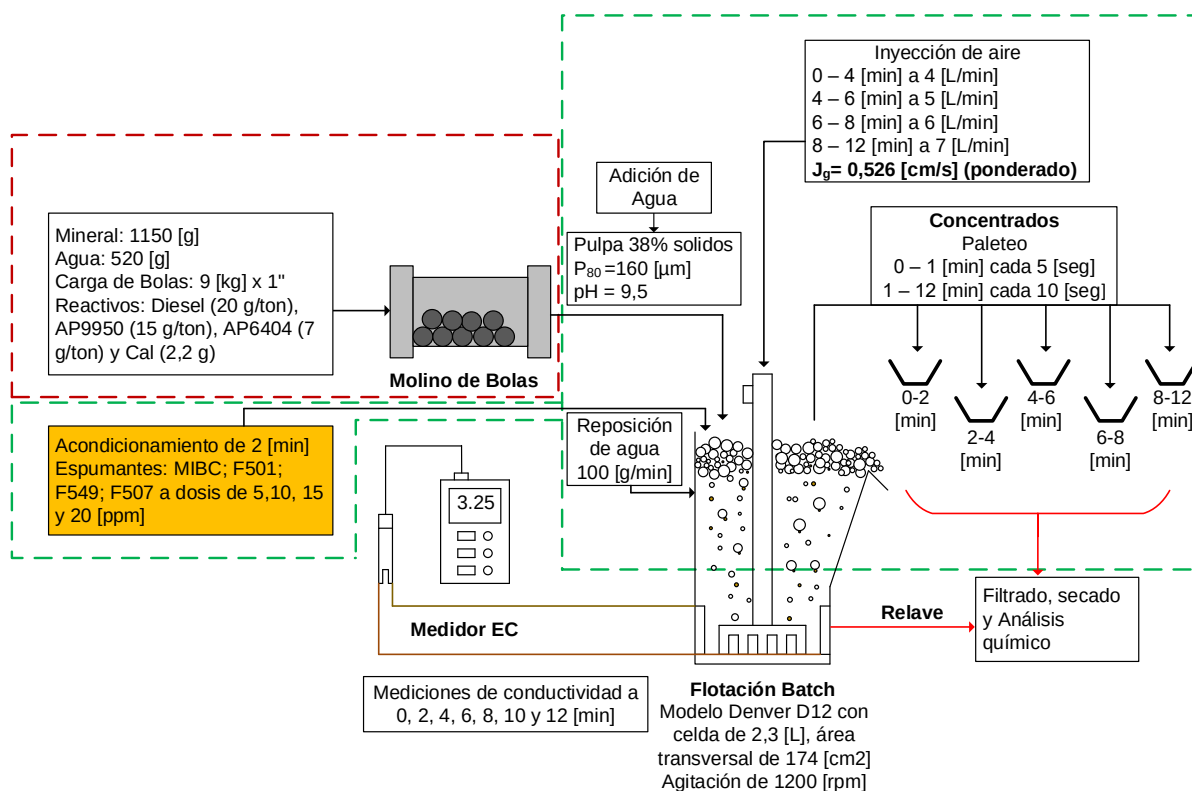


Figura 31. Diagrama del proceso experimental de flotación batch utilizado para la evaluación metalúrgica de espumantes.

Molienda

El mineral debe entrar a la flotación con un P_{80} determinado, por lo tanto, para ello se debe someter previamente a un proceso de molienda para reducir el tamaño de este conjunto de partículas, asumiendo que el tiempo de molienda se conoce después de haber hecho la cinética de molienda (**ver sección 3.2.1 cinética de molienda**). A continuación, se listan los principales pasos.

- En primer lugar, se debe adicionar la carga de bolas estándar, la cual corresponde a 10 [kg] de bolas de acero de 1 [in] al molino.
- Se agrega el mineral de 1150 [g] en conjunto con la cal (2,0 [g]) para ajustar el pH según la condición estándar.
- Se adiciona el agua y los reactivos (i.e., AP6460 [7 g/ton], AP9950 [15 g/ton] y Diesel [20 g/ton]).
- Se debe asegurar que el molino quede bien cerrado.
- Se debe ajustar el tiempo de la molienda obtenido previamente.

- f) Se instala el molino en los rodillos.
- g) Se procede a realizar la descarga del molino en coladores especiales que permiten retener las bolas y haciendo uso de agua.
- h) Finalmente, se debe trasvasiar la pulpa a la celda de flotación batch para luego pasar a la siguiente etapa.

En la

Figura 31 es posible evidenciar con línea segmentada roja la etapa de molienda en el procedimiento global llevado a cabo.

Flotación

El proceso que permite separar los componentes de valor desde el mineral de estudio es la flotación. Esta concentra el valor a través de la generación de espuma que se transfiere y separa del resto de la pulpa. A continuación, se detallan los pasos utilizados para llevar a cabo la flotación batch de laboratorio:

- a) Descargar la pulpa en la celda que se muestra en la **Figura 28** y llevar a la máquina de flotación.
- b) Ajustar la agitación a 1200 [rpm] y otorgar 2 minutos de acondicionamiento para adicionar el agente surfactante y poder ajustar el pH.
- c) Pasado los 2 minutos de acondicionamiento, abrir la válvula de aire y comenzar a coleccionar la espuma en intervalos de 0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-12 minutos (considerar que en el primer minuto de la prueba se realiza un paletazo cada 5 segundos mientras que, para el resto de la prueba, de 1 a 12 minutos se mantiene un paletazo cada 10 segundos).

Mencionar que estos experimentos se hicieron con flujo de aire variable, es decir para el intervalo de 0 a 4 minutos se utilizó un flujo de aire de 4 [L/min], luego para el intervalo de 4 a 6 minutos se usó un flujo de aire de 5 [L/min], de 6 a 8 minutos el flujo utilizado fue de 6 [L/min] y finalmente de 8 a 12 minutos el flujo fue de 7 [L/min]. Para poder realizar una comparación de las pruebas y realizar una simplificación en los cálculos se estimó un valor ponderado para el flujo de aire el cual consistían en

ponderar el valor de flujo de aire por el tiempo que fue aplicado, lo cual se traduce en la siguiente ecuación.

$$J_g = \frac{91,7 \left[\frac{cm^3}{s} \right]}{174 [cm^2]} = 0,526 \left[\frac{cm}{s} \right] \quad \text{Ecuación 21}$$

Flujo pond.

$$= \frac{4[min] * 4[L/min] + 2[min] * 5[L/min] + 2 [min] * 6[L/min] + 4[min] * 7[L/min]}{12[min]}$$

$$\text{Flujo de Aire Pond.} = 5,5 [L/min]$$

De esta forma un valor estándar y ponderado para todas pruebas de flotación de 5,5 [L/min]. También como es conocida la sección transversal de la celda (174 [cm²]) es posible calcular el valor de J_g ponderado mediante la siguiente ecuación.

$$J_g = \frac{91,7 \left[\frac{cm^3}{s} \right]}{174 [cm^2]} = 0,526 \left[\frac{cm}{s} \right] \quad \text{Ecuación 22}$$

El valor ponderado de J_g para las pruebas de flotación batch en sistema trifásico correspondería a 0,526 [cm/s].

El agua durante el proceso se fue reponiendo a lo largo de la prueba al igual que en sistema bifásico para mantener el nivel colchón de espuma.

Filtrado

Después de obtener los concentrados fue necesario someterlos a un sistema especializado que trabajaba con aire presurizado para bajar el porcentaje de humedad dejando la masa del mineral (“queque”) con un porcentaje cercano al 10%. Todo esto con la finalidad de facilitar el proceso de secado. A continuación, se describen los pasos para realizar este proceso.

- a) Primero que todo se puso un papel Kraft en la base del filtro y posterior a eso se insertó el cilindro de acero, el cual contenía la pulpa.

- b) En el siguiente paso se adicionó la pulpa y se cerró la tapa, tomando la precaución de que quedara bien fijo.
- c) Posteriormente se cerró la válvula de salida de aire y se abrió la válvula que permitía el paso de aire al cilindro, de esta forma se aumentó la presión interna dentro del cilindro la cual expulso el exceso de agua a través del papel filtro.
- d) Después de un tiempo se abrió la válvula de salida de aire y se cerró la válvula que daba el paso al aire, con el propósito de despresurizar el sistema.
- e) Finalmente se desmontó el cilindro y se obtuvo el “queque” con un porcentaje de humedad menor que el inicial (~10%).

En la **Figura 32** se puede evidenciar la imagen del equipo utilizado en el proceso de filtrado.



Figura 32. Filtros utilizados para la memoria para remover el exceso de agua de los concentrados y relave.

Secado

Los “queques” obtenidos en el proceso de filtrado eran sometidos a un proceso de secado para retirar el mayor porcentaje de agua posible de estas masas. Para ello se programó la estufa a unos 90°C y por un tiempo de 6 horas. Con esto se obtenían las

masas de concentrados y relaves secas listas a ser preparadas para el análisis químico.

Preparación de muestras

Una vez obtenidas las masas de concentrados y relave, las muestras se prepararon y se enviaron a análisis químico. Los concentrados como eran masas pequeñas (aproximadamente 100 a 200 [g]) se procesaron en su totalidad, mientras que los relaves al ser masas más grandes se homogeneizaron mediante roleo y se separó una muestra representativa mediante cuarteo, y de esta forma se obtuvo una masa cercana a los 150 [g]. Finalmente, después de embolsar todas las muestras, estas se enviaron a un laboratorio químico (SERCOC) para la realización de sus respectivas caracterizaciones y así obtener las concentraciones de Cu, Fe y Mo. Este procedimiento correspondería a la etapa final de lo que vendría siendo el proceso experimental global expuesto en la

Figura 31.

3.2.3. Pruebas en sistema bifásico

Se realizaron pruebas en sistema bifásico, tanto como en sistema trifásico con la finalidad de analizar el efecto que ejercen los sólidos sobre el gas holdup, y también poder contrastar el rendimiento (e.g., recuperación metalúrgica, ley final, constante cinética) con las métricas del aire.

Se llevaron a cabo 2 tipos de pruebas en sistema bifásico. El primer set se realizó con el fin de poder construir curvas del tipo ε_g versus J_g . En un sistema compuesto por aire y agua se midió el contenido de gas en ausencia de reactivos en primera instancia y luego en presencia de distintos espumantes (MIBC, F501, F549 y F507) a distintas concentraciones (5,10,15 y 20 [ppm]). Se inyectó aire a la celda mecánica ajustándolo para entregar distintos flujos de aire de 2, 4, 6, 8 y 10 [L/min], a este procedimiento se le llamo prueba de “**espumación**”. La prueba consistía en:

- a) Ajustar la celda de 3,0 [L] con agua,
- b) Fijar la agitación a 1200 [rpm]

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

- c) Posterior a eso se debía adicionar el agente surfactante mediante el uso de micropipeta y se daba un tiempo de acondicionamiento de 3 minutos.
- d) Como paso seguido se inyectó el aire a la celda partiendo con 2 [L/min], cuando se alcanzaba un punto de estabilización de la conductividad eléctrica, el valor era registrado. Hay que mencionar que el flujo de aire se fue aumentando en 2 [L/min], una vez que la medición fue tomada hasta llegar a los 10 [L/min].

La **Figura 33** muestra un diagrama de cómo se realizó el primer set de pruebas en sistema bifásico.

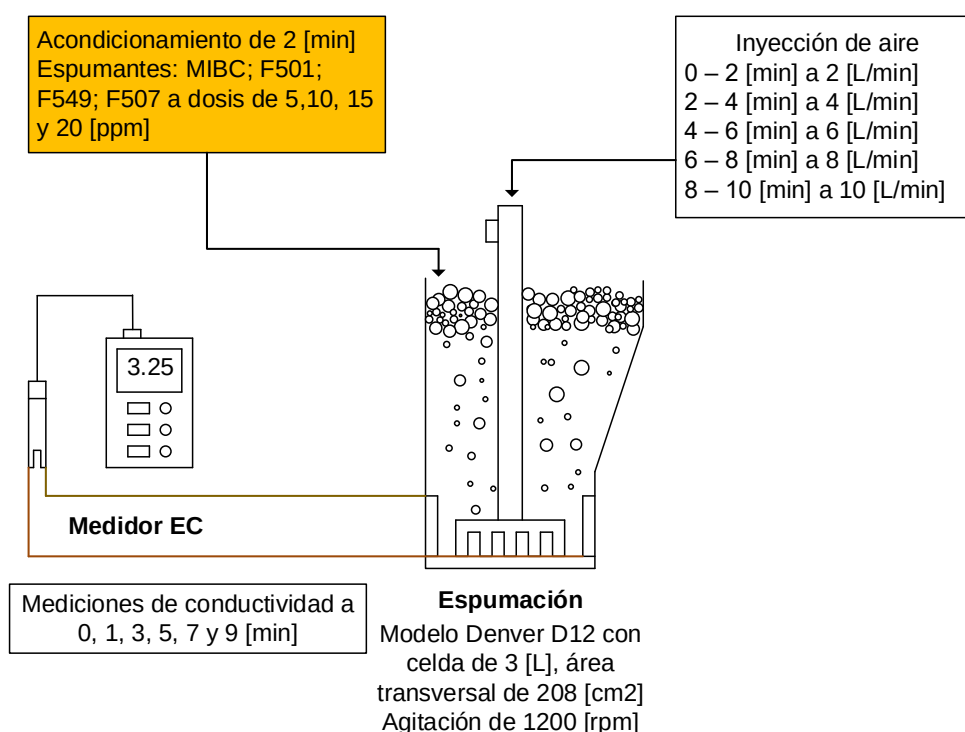


Figura 33. Diagrama global de las pruebas realizadas en sistema bifásico (primer set).

El segundo set de pruebas en sistema bifásico se realizó de tal forma que se quiso imitar una flotación batch. Para ello se utilizó una celda de 2,3 [L].

- a) En primera instancia se debía ajustar el volumen de agua a 2,3 [L] y de igual forma se hizo con la agitación la cual era 1200 [rpm].
- b) Se adicionaron los reactivos (espumante y colectores) otorgándose un tiempo de acondicionamiento de 2 minutos. Es importante medir la conductividad eléctrica en esta etapa para poder aplicar la ecuación de maxwell cuando comience la inyección de aire.

- c) Como paso seguido se fue colectando la espuma en intervalos de 0-2, 2-4, 4-6, 6-8 y 8-12 minutos (considerando un paleteo inicial cada 5 segundos en el primer minuto, y los 11 minutos restantes cada 10 segundos) y también registrando la conductividad eléctrica en los mismos intervalos.

Cabe mencionar que estos experimentos se hicieron con flujo de aire variable, es decir para el intervalo de 0 a 4 minutos se utilizó un flujo de aire de 4 [L/min], luego para el intervalo de 4 a 6 minutos se usó un flujo de aire de 5 [L/min], de 6 a 8 minutos el flujo utilizado fue de 6 [L/min] y finalmente de 8 a 12 minutos el flujo fue de 7 [L/min]. El agua se fue reponiendo a lo largo de la prueba para mantener el colchón de espuma.

3.2.4. Pruebas en sistema Trifásico

Se realizaron pruebas con sólidos para poder observar el aspecto metalúrgico (i.e., recuperación, ley, constante cinética, recuperación másica, entre otros.) y poder relacionarlos con las métricas del aire. Posiblemente también para observar algún efecto entre el sólido y el gas holdup.

Para tales pruebas se utilizó un compósito de minera Caserones el cual se separó en muestras de 1150 [g], y así de esta forma alcanzar un 38% de sólidos en flotación. Para ello se siguieron los procedimientos detallados en la sección anterior (**ver 3.2.2 Flotación batch y obtención de concentrados**). Cabe mencionar que también se realizaron mediciones de conductividad eléctrica y recuperación de agua las cuales se encuentran detallada en la siguiente sección.

3.3. Medición y estimación de parámetros

Los parámetros que se midieron en este desarrollo experimental fueron el gas holdup y la recuperación de agua. Por otra parte, con valores conocidos se estimó el diámetro de burbuja. A continuación, se muestra cómo medir y/o estimar cada una de estas.

3.3.1. Medición de gas holdup

El método utilizado para medir el gas holdup corresponde a una forma indirecta mediante conductividad eléctrica y utilizando la ecuación de Maxwell (**ver Ecuación 16**), presentada en la sección **2.3.2.3 Gas Holdup**. La **Figura 34** muestra el diagrama de disposición de los elementos para la medición de conductividad en la celda

mecánica. En ésta, el medidor de conductividad (1) se usó de tal forma que a través de los carbones del electrodo (2), se conectan dos cables con pinzas de acero inoxidable hacia 2 placas de acero inoxidable 316L ubicadas en las caras frontal y posterior de la celda acrílica (3). Esto se debió realizar ya que al introducir el electrodo directamente a la celda generaba una medición inestable y bastante ruido por el ingreso de burbujas a éste.

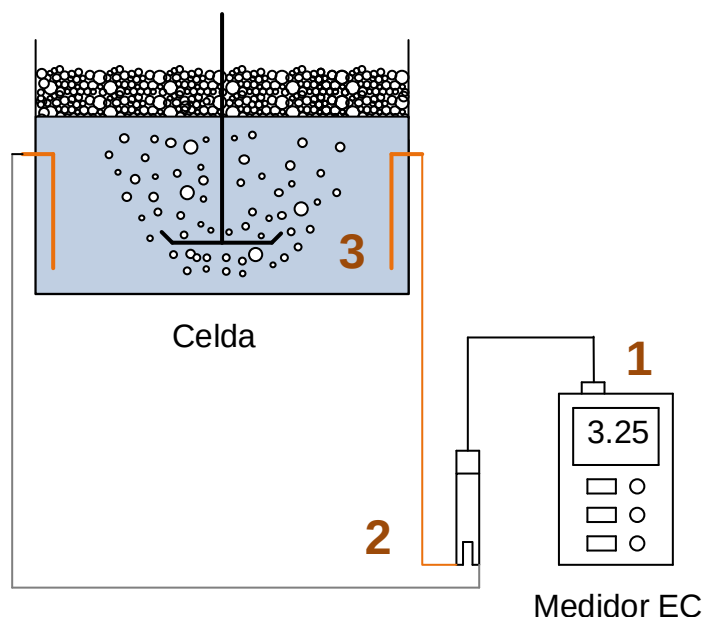


Figura 34. Diagrama del sistema implementado para medir el gas holdup mediante conductividad eléctrica.

Para obtener de gas holdup fue necesario tomar las mediciones de conductividad eléctrica en el tiempo, como ejemplo se tomarán los datos medidos en una prueba de “espumación” en sistema bifásico los cuales se encuentran en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Medición de la conductividad en una prueba de “espumación” en sistema bifásico.

Tiempo [min]	κ [mS/cm]
t=0	3,41
t=1	3,22
t=3	3,13
t=5	3,06
t=7	2,99
t=9	2,94

Al aplicar la ecuación de maxwell expuesta en la sección **2.3.2.3** se obtienen los valores de gas holdup.

$$\varepsilon_g = \left(\frac{1 - \left(\frac{\kappa_d}{\kappa_{SL}} \right)}{1 + 0,5 * \left(\frac{\kappa_d}{\kappa_{SL}} \right)} \right) * 100\% \quad \text{Ecuación 23}$$

Para este caso en especial κ_{SL} correspondería a la conductividad medida en tiempo cero, pues bien, en ese momento no existe inyección de aire. Por otro lado, κ_d corresponderían a las mediciones en los tiempos restantes cuando existe una dispersión entre gas y líquido. Al aplicar la ecuación de maxwell se obtiene lo siguiente

$$\varepsilon_g = \left(\frac{1 - \left(\frac{3,22}{3,41} \right)}{1 + 0,5 * \left(\frac{3,22}{3,41} \right)} \right) * 100\% = 3,8 \% \quad \text{Ecuación 24}$$

Al aplicar esta misma ecuación con las mediciones que se hicieron en los tiempos posteriores se obtienen los resultados tabulados en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Mediciones de conductividad y valores de gas holdup calculados respectivamente en el tiempo.

Tiempo [min]	κ [mS/cm]	ε_g [%]
t=0	3,41	0
t=1	3,22	3,8
t=3	3,13	5,6
t=5	3,06	7,1
t=7	2,99	8,6
t=9	2,94	9,6

3.3.2. Estimación del diámetro de burbuja

Para obtener los diámetros de burbujas se utilizó información disponible en la literatura que permitió relacionar las propiedades de las métricas del aire (con algunas suposiciones de carácter práctico) y de esta forma inferir el tamaño de burbuja. La primera ecuación corresponde a la publicada por Finch y Dobby (1990) y viene dada por la **Ecuación 11**, la cual relaciona el flujo de área superficial de burbuja (S_b) en función de la velocidad superficial de gas (J_g) y diámetro de burbuja (d_b) [30].

Por otra parte, se tiene la correlación experimental encontrada por Finch en el año 2000, que surge al graficar los valores de flujo de área superficial de burbujas (S_b) en función del gas holdup (ε_g) la cual fue definida anteriormente y está representada por la **Ecuación 12**.

Uniando la **Ecuación 10** y **Ecuación 11** se obtiene la siguiente equivalencia, mostrada en la **Ecuación 25**.

$$\frac{6 * J_g}{d_b} = 5,5 * \varepsilon_g \quad \text{Ecuación 25}$$

Finalmente despejando d_b , se obtiene la ecuación

$$d_b = \frac{6 * J_g}{5,5 * \varepsilon_g} \quad \text{Ecuación 26}$$

Como se conocen los datos de velocidad superficial de gas (J_g) y también los valores de gas holdup (ε_g) mediante conductividad eléctrica, es posible estimar el diámetro de burbuja promedio de las pruebas de flotación realizadas en la celda de flotación batch. Para ejemplificar esta estimación se utilizarán los datos indicados en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Datos para realizar la estimación de diámetro de burbuja promedio.

Tiempo [min]	ε_g [%]	J_g [cm/s]
t=0	0	0
t=1	3,8	0,16
t=3	5,6	0,32
t=5	7,1	0,48
t=7	8,6	0,64
t=9	9,6	0,80

Al aplicar los datos sobre la **Ecuación 25** se obtiene lo siguiente expresado en la **Ecuación 27**.

$$d_b = \frac{6 * 0,16 \left[\frac{cm}{s} \right] * 10000 \left[\frac{\mu m}{cm} \right]}{5,5 \left[\frac{1}{s} \right] * 3,8} = 462 [\mu m] \quad \text{Ecuación 27}$$

Así es posible obtener los diámetros de burbujas. Ahora al aplicar la ecuación sobre los tiempos faltantes se obtienen los resultados mostrados en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Diámetros de burbujas estimados en función del gas holdup y la velocidad superficial de gas.

Tiempo [min]	ε_g [%]	J_g [cm/s]	d_b [μ m]
t=0	0	0	0
t=1	3,8	0,16	462
t=3	5,6	0,32	621
t=5	7,1	0,48	740
t=7	8,6	0,64	817
t=9	9,6	0,80	908

3.3.3. Medición de recuperación de agua

Para medir la recuperación de agua, se realizó un balance de agua propiamente tal. La **Figura 35** ilustra tal proceso en donde se observa que existe una masa de agua que se extrae mediante los concentrados a distintos tiempos (i.e., C1, C2, C3, C4 y C5), otra masa de agua que se va reponiendo (i.e., con piseta y vaso precipitado) y notar que existe un agua adicionada al inicio del proceso que viene contenida en la pulpa. Cabe mencionar que todas las pruebas se trabajaron con agua de grifo, y que la reposición en cada minuto fue de esta misma sin adición extra de ningún agente químico.

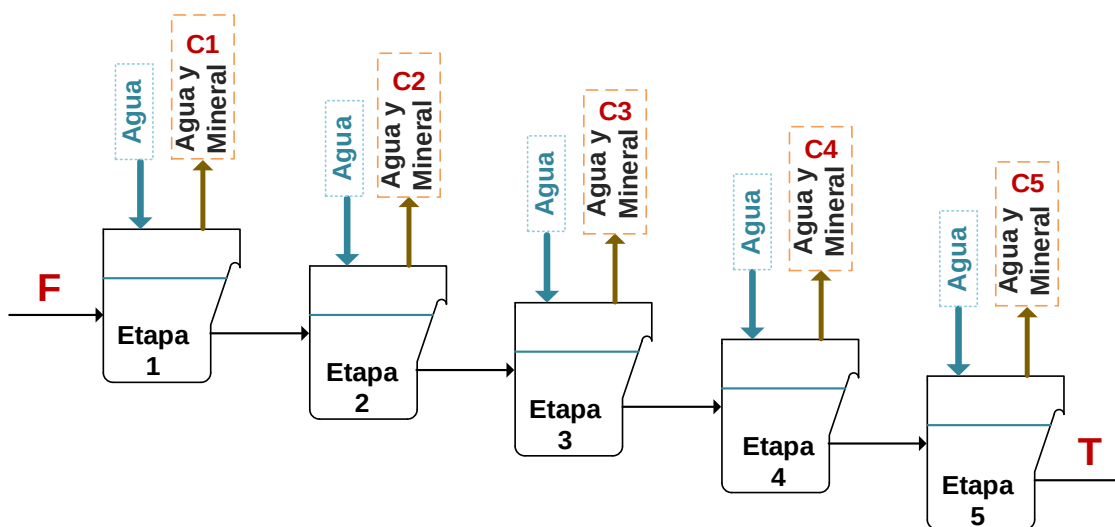


Figura 35. Balance de agua en celda de flotación batch.

El procedimiento para la medición de la recuperación de agua para un sistema trifásico en una celda agitada mecánicamente es el siguiente:

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

- a) Pesar 5 contenedores y numerarlos de 1 a 5 (registrar valores).
- b) Pesar por otro lado una piseta con agua y un recipiente de agua con contenido máximo de 5 [L] (registrar valores).
- c) Llenar la celda de flotación hasta completar los 2,3 [L].
- d) Ajustar la velocidad del agitador a un valor de 1200 [rpm].
- e) Agregar los reactivos correspondientes a cada prueba.
- f) Acondicionar el sistema por 2 minutos.
- g) Abrir la válvula de aire y ajustar el flujo a 4 [L/min].
- h) Colectar la espuma en intervalos de tiempo 0-2, 2-4, 4-6, 6-8 y 8 a 12 minutos (Considerando un paleteo inicial cada 5 segundos en el primer minuto, y los 11 minutos restantes cada 10 segundos).
- i) En cada intervalo se introduce agua mediante pisetas y recargue mediante vaso precipitado, con la finalidad de mantener el nivel del colchón de espuma.
- j) Pesar cada bandeja con concentrado (i.e., bandeja más agua recuperada más sólidos recuperados)
- k) Filtrar el contenido de las bandejas en donde se reduce el % de agua y posteriormente secar (por diferencia de masas se puede conocer el agua recuperada en cada intervalo de tiempo).
- l) Pesar la piseta y el recipiente de agua después de haber realizado el experimento, y así de esta forma obtener el agua consumida por prueba.

Para calcular la recuperación de agua es necesario recurrir a la información obtenida en el proceso de flotación batch. A continuación, se muestra un ejemplo para una prueba en particular realizada a nivel laboratorio.

Inicialmente se tienen los siguientes datos de una prueba tabulados en la **Tabla 12**, los cuales consisten en la masa de los concentrados y la masa de agua recuperada en cada intervalo de tiempo.

Tabla 12. Datos obtenidos en una prueba de flotación batch (masa de mineral y agua recuperada).

Intervalo de tiempo [min]	Masa de mineral recuperado [g] (MRC_i)	Masa de agua recuperada [g] (MA_i)
0	0	0

2	90,0	297,7
4	26,9	163,3
6	33,4	230,4
8	29,7	226,0
12	44,7	410,4

Sabiendo la masa de mineral recuperada por intervalo de tiempo y la masa inicial en el sistema, es posible estimar la masa de mineral remanente en cada intervalo en el reactor como lo indica la siguiente **Ecuación 28**.

$$MR_i = 1150 - \sum_{i=1}^5 MC_i \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde MR_i corresponde a la masa remanente en el reactor en el intervalo de tiempo i y MC_i la masa de mineral recuperada en cada intervalo de tiempo i . Por otra parte, es posible estimar el agua que hay inicialmente en el reactor y la que debería ir quedando a lo largo del tiempo de forma teórica. La **Ecuación 31** muestra el cálculo para obtener el agua inicialmente en la celda de flotación. Para ello es necesario calcular la densidad de pulpa mediante la **Ecuación 29** utilizando una densidad de mineral de $2,71 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, entonces:

$$\frac{100}{\rho_{pulpa}} = \frac{\% \text{ Solido}}{\rho_{\text{Solido}}} + \frac{\% \text{ Agua}}{\rho_{\text{Agua}}} \quad \text{Ecuación 29}$$

Reemplazando en la ecuación antes mencionada se obtiene lo expresado en la **Ecuación 30**.

$$\rho_{pulpa} = \frac{38\%}{2,71 \left[\frac{g}{cm^3} \right]} + \frac{62\%}{1 \left[\frac{g}{cm^3} \right]} = 1,315 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad \text{Ecuación 30}$$

Es posible calcular la masa inicial de agua en el reactor como lo indica la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} \text{Masa inicial de agua} &= 2300 \text{ [cm}^3\text{]} * 1,315 \left[\frac{g}{cm^3} \right] * 0,62 \\ &= 1876,3 \text{ [g]} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 31}$$

Ahora para ir calculando la masa de agua remanente es necesario restar en cada intervalo de tiempo el volumen inicial de agua con el volumen de mineral remanente.

$$WR_i = 1876,3 - \frac{(\sum_{i=1}^5 MR_i)}{\rho_{Mineral}} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde WR_i corresponde al volumen remanente de agua en el reactor, MR_i la masa de mineral remanente en la celda de flotación en el intervalo de tiempo i y $\rho_{Mineral}$ es la densidad del mineral. Para los mismos datos del ejemplo anterior, estos resultados se muestran en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Datos calculados de agua remanente en el reactor.

Intervalo de tiempo [min]	Masa de mineral remanente [g] (MR_i)	Masa de agua remanente [g] (WR_i)
0	1150,0	1876,3
2	1039,1	1917,2
4	1011,4	1927,4
6	987,6	1936,1
8	963,9	1944,9
12	919,1	1961,4

En teoría, al tratarse de un reactor batch el volumen de concentrado que se extrae en cada intervalo, debiese ser constante. Por lo tanto, el volumen de concentrado que sale debería ser igual al volumen de agua reposicionado. A partir de esta información se puede calcular el volumen teórico que debió ser repuesto en cada intervalo mediante la **Ecuación 33**.

$$MT_i = MA_i + \left(\frac{MC_i}{\rho_{Mineral}} \right) \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde MT_i corresponde a la masa teórica repuesta en el intervalo de tiempo i , MA_i es la masa de agua recuperada en el intervalo de tiempo i , MC_i es la masa de mineral recuperada en el intervalo de tiempo i y $\rho_{Mineral}$, corresponde a la densidad del mineral.

Como no se cuantificó el agua repuesta en cada intervalo de tiempo, sino que se midió el agua total repuesta a lo largo de la prueba de flotación, se optó por hacer una

estimación del agua que se repuso en cada intervalo de la siguiente forma. Para el ejemplo que se está trabajando, se recuperó a lo largo de los 12 minutos de flotación una masa total de agua de 1396,9 [g]. Por lo tanto, se dividió la masa total de agua recuperada en 12 partes y posteriormente se ponderó por la cantidad de minutos de cada intervalo, y así lo muestra la siguiente **Tabla 14**.

Tabla 14. Datos estimados y calculados de forma teórica del agua recuperada en cada intervalo de tiempo.

Intervalo de tiempo [min]	Masa de agua recuperada [g] (MA_i)	Masa de agua recuperada teórica [g] (MT_i)	Estimación de agua repuesta [g] (AR_i)	Error (E_i)
0	-	-	-	-
2	367	408,2	232,8	175,3
4	171	180,8	232,8	-52,0
6	176	184,4	232,8	-48,4
8	193	201,9	232,8	-30,9
12	428	444,3	465,6	-21,3

Con esto es posible estimar un error respecto a la reposición de agua y de esta forma se podría utilizar esta información para obtener una aproximación de la estimación de la recuperación de agua en las pruebas de flotación. Finalmente, la recuperación experimental se estima como lo indica la **Ecuación 34**.

$$RW_i = \frac{MA_i}{WR_{i-1} - E_i} * 100\% \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde MA_i es la masa de agua recuperada en el intervalo de tiempo i , WR_{i-1} corresponde al volumen remanente de agua en el reactor en el tiempo $i - 1$ y E_i corresponde a la diferencia entre el agua recuperada (MA_i) y el agua repuesta (AR_i).

De esta forma se obtiene finalmente para el ejemplo utilizado se obtienen los resultados que se encuentran en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Resultados de recuperación de agua para el ejemplo de flotación batch analizado anteriormente.

Intervalo de tiempo, [min]	Masa de agua remanente [g] (WR_i)	Masa de agua recuperada [g] (MA_i)	Masa de agua recuperada teórica [g] (MT_i)	Estimación de agua repuesta [g] (AR_i)	Error (E_i)	Recuperación de agua (%) ($R_{exp,Acum}$)	Recuperación de agua Acumulada (%) (R_{exp})
0	1876,3	-	-	-	-	-	-
2	1917,2	367	408,2	232,8	175,3	21,6	21,6

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

4	1927,4	171	180,8	232,8	-52,0	8,7	30,3
6	1936,1	176	184,4	232,8	-48,4	8,9	39,1
8	1944,9	193	201,9	232,8	-30,9	9,8	49,0
12	1961,4	428	444,3	465,6	-21,3	21,8	70,7

Se puede observar que para este ejemplo se obtuvo finalmente una recuperación de agua del 70,7%.

3.4. Condiciones de molienda y flotación batch

La molienda y la flotación batch se llevaron a cabo de tal forma que se intentó replicar las condiciones a las que trabaja el cliente en planta. La **Tabla 16** y **Tabla 17** muestran las condiciones estándar de molienda y flotación respectivamente. En la **Tabla 18** se muestran los reactivos utilizados en las pruebas de flotación con sus respectivas dosis y los puntos en que se adicionan del proceso de flotación.

Tabla 16. Condición estándar de molienda.

	Molienda
Masa de mineral	1150 [g]
Porcentaje de sólidos	65%
P ₈₀	160 [μm]
Carga de bolas	10 [kg]
Diámetro de bolas	1 [in]
Tiempo*	12 [min] 30 [s]

Tabla 17. Condición estándar de la flotación.

	Flotación
Volumen de Pulpa	2,3 [L]
Porcentaje de sólidos	38%
Agitación	1200 [rpm]
pH	9,5
Adición de cal	Molino
Tiempo de acondicionamiento	2 [min]
Tiempo Flotación	12 [min]
Análisis Cinético	2, 4, 6, 8 y 12 [min]
Flujo de aire	4 [L/min]
Frecuencia de Paleteo (min 1)	5 [s]
Frecuencia de Paleteo (min 1-12)	10 [s]

Tabla 18. Reactivos y puntos de adición en el proceso de flotación.

Tipo	Reactivo	Punto de Adición	Dosis
Colector	AP-9950	Molino	15 [g/t]
Colector	AP-6404	Molino	10 [g/t]
Colector	Diésel	Molino	20 [g/t]
Espumante	MIBC	Acondicionamiento	13,7 [μL/L]
	F501	Acondicionamiento	5,10,15 y 20 [ppm]
	F549	Acondicionamiento	5,10,15 y 20 [ppm]
	F507	Acondicionamiento	5,10,15 y 20 [ppm]

En la **Tabla 41** se puede apreciar el set completo de pruebas realizadas en sistema trifásico con sus respectivas dosis, reactivos y puntos de adición. Se consideraron todas estas pruebas para poder realizar finalmente la evaluación de espumantes mediante gas holdup y recuperación de agua.

3.5. Metodología de calculo

Para poder realizar un análisis y poder obtener conclusiones de este estudio fue necesario recurrir a las metodologías de cálculos que se detallan a continuación.

3.5.1. Balance metalúrgico

La finalidad de poder realizar flotaciones batch es el hecho de obtener masas de concentrado, masas de relave, leyes de concentrado y leyes de relave a diferentes tiempos. Con estos datos es posible realizar balances metalúrgicos y de esta forma poder obtener las recuperaciones por elemento y las cinéticas del proceso a distintas condiciones evaluadas. A continuación, se presenta la **Ecuación 35**, la cual permite calcular la ley de alimentación del mineral [50].

$$f_j = \frac{(\sum_{i=1}^5 c_{i,j} * C_i) + t_j * T}{F} = \frac{(\sum_{i=1}^5 c_{i,j} * C_i) + t_j * T}{(\sum_{i=1}^5 C_i) + T} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde f_j es la ley calculada del elemento j en la alimentación, F corresponde a la masa de alimentación calculada, C_i corresponde a la masa de concentrado en el tiempo i, $c_{i,j}$ es la ley del concentrado en el tiempo i para el elemento j, T es la masa de relave y t_i es la ley del relave del elemento j.

Para analizar la variación de la ley del concentrado en el tiempo, se calcula la ley acumulada mediante la **Ecuación 36**.

$$c_{i,j}^a = \frac{(\sum_{i=1}^5 c_{i,j} * C_i)}{(\sum_{i=1}^5 C_i)} \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde $c_{i,j}^a$ corresponde a la ley acumulada para el tiempo i del elemento j . Teniendo calculada la ley de alimentación y la ley acumulada del concentrado, se estiman las recuperaciones de Cu, Fe y Mo a partir de la siguiente expresión:

$$R_{i,j} = \frac{c_{i,j}^a * (\sum_{i=1}^5 C_i)}{(\sum_{i=1}^5 C_i) + T} \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde $R_{i,j}$ es la recuperación fraccional en el tiempo i del elemento j .

En base a este balance metalúrgico es posible establecer los perfiles de recuperación versus tiempo para los diferentes componentes presentes en la muestra y de esta forma realizar el análisis cinético, que a continuación se describe.

3.5.2. Modelos cinéticos

Conocer la cinética de flotación batch es de suma importancia para caracterizar la conducta del mineral en estudio y establecer las condiciones de borde de la separación. Este proyecto consideró 2 modelos cinéticos, lo cuales se aplicaron a la recuperación metalúrgica en función del tiempo: Garcia-Zuñiga y Klimpel [51].

Para determinar el orden cinético del proceso de separación de este mineral, se llevó a cabo un análisis del componente de valor remanente en el reactor (i.e., relave en la celda de flotación). El contenido de valor en el relave en función del tiempo de separación se analizó para establecer el orden cinético. Se graficó la concentración remanente de valor en función del tiempo (t_i), $\ln(t_i)$ y $1/t_i$. Estas correlaciones se evaluaron en base a su linealidad (coeficiente de Pearson al cuadrado, R^{23}). El análisis permitió establecer que la relación que presenta una correlación más cercana a la recta correspondió a la información procesada de acuerdo a un proceso de orden 2 (ver **Figura 36**, **Figura 37** y **Figura 38**). Sin embargo, con el propósito de estandarizar y

³ R^2 (coeficiente de Pearson): valor estadístico que se obtiene de una muestra para saber si las variables dependiente e independiente presentan correlación. <https://es.quora.com/Qu%C3%A9-es-el-coeficiente-de-Pearson>.

simplificar el análisis la información se analizará considerando una conducta de separación de pseudo primer orden.

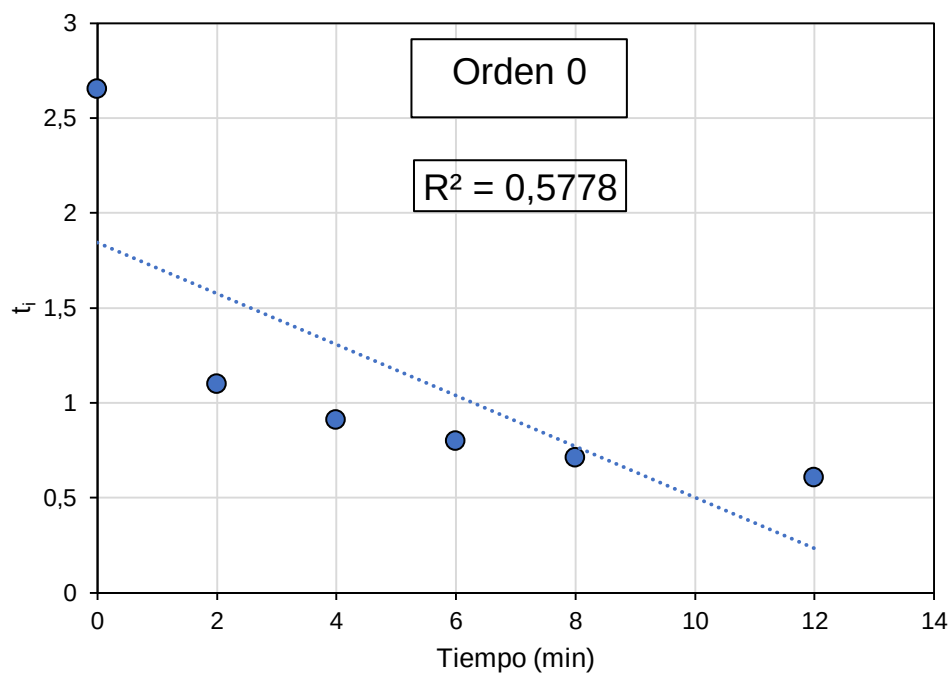


Figura 36. Concentración remanente de valor en función del tiempo (orden cero).

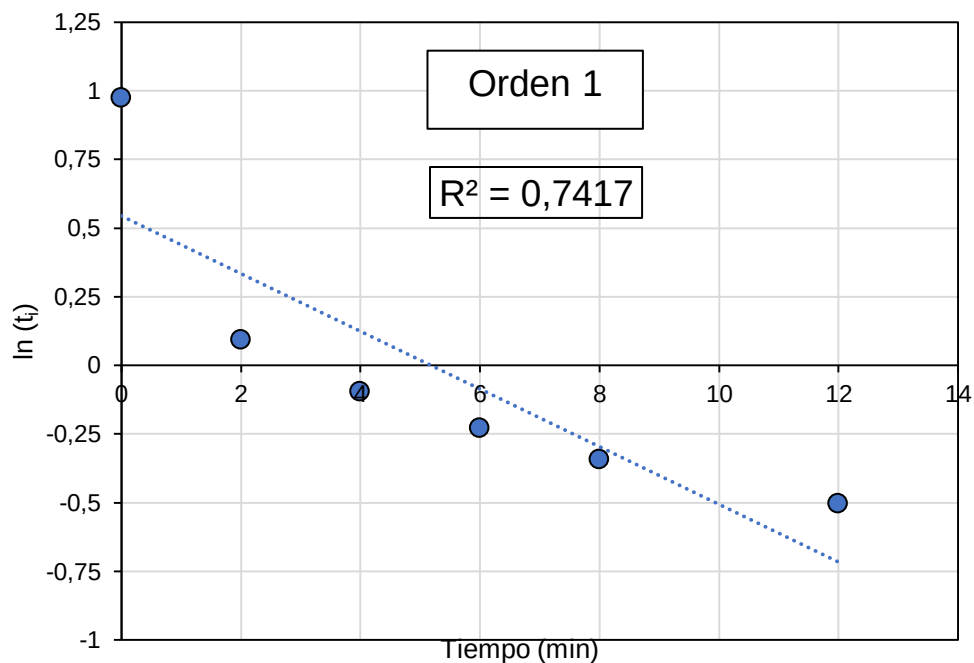


Figura 37. Logaritmo natural de la concentración remanente de valor en función del tiempo (orden 1).

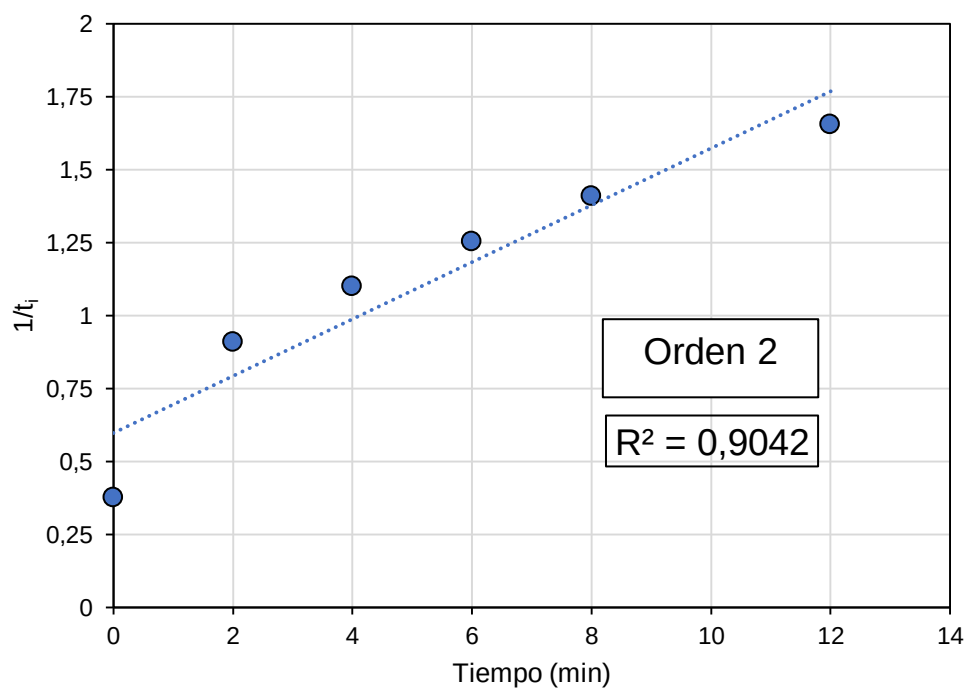


Figura 38. Recíproco de la concentración remanente de valor en función del tiempo (orden 2).

Una posible explicación para este fenómeno es el hecho de que a medida que se realizaban las pruebas de flotación el flujo de aire fue variable a lo largo de la prueba.

El aire corresponde a la fuerza motriz del proceso y por lo tanto un factor importante en la cinética de flotación. Con el fin de simplificar el análisis se asume que todas las pruebas de flotación batch se comportaron según una cinética de pseudo primer orden [52].

La cinética de flotación se encarga de estudiar la velocidad con la que ocurre el proceso, es decir la variación que existe del material de interés desde la pulpa hacia el concentrado. La importancia de modelar la cinética es el hecho de poder obtener los parámetros que describen el comportamiento de la velocidad y de esta forma conocer acerca de la transferencia del material de interés hacia el concentrado.

A continuación, se muestran los modelos cinéticos de primer orden que fueron utilizados para procesar los resultados de las pruebas de flotación.

a) Modelo de Garcia-Zuñiga

El modelo de Garcia-zuñiga proviene de considerar el proceso de flotación, específicamente el agregado partícula-burbuja en la zona de colección, como una reacción química de comportamiento de primer orden [53], la **Ecuación 38** muestra este modelo.

$$R(t) = R_{\infty}(1 - e^{-k*t}) \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde $R(t)$ corresponde a la recuperación del elemento en el tiempo t expresado porcentualmente, R_{∞} es la recuperación a tiempo infinito en porcentaje y k corresponde a la constante cinética de primer orden y tiene unidades de $1/\text{tiempo}$ [51].

b) Modelo de Klimpel

En realidad, existen varias especies mineralógicas dentro de una celda de flotación con distintos comportamientos, es decir, distintas constantes cinéticas. Particularmente en este caso, Klimpel considero una distribución de constantes cinéticas de forma rectangular (ver **Ecuación 39**) y de esta forma lo ilustra la **Figura 39**.

$$E(k) = \begin{cases} \frac{1}{k_{max}} & \text{si } 0 < k < k_{max} \\ 0 & \text{si } k > k_{max} \end{cases} \quad \text{Ecuación 39}$$

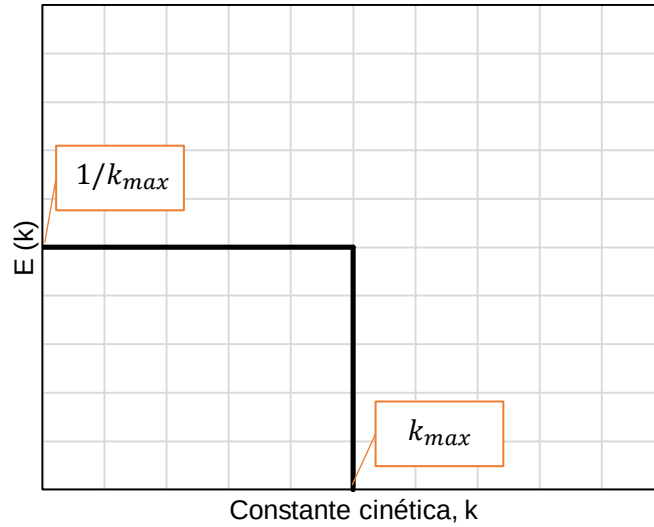


Figura 39. Distribución rectangular del modelo de Klimpel (adaptado de Yianatos) [53].

Mientras que el modelo propiamente tal viene dado por la **Ecuación 40**.

$$R(t) = R_{\infty} \left(1 - \frac{(1 - e^{-k_{max}t})}{k_{max}t} \right) \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde $R(t)$ es la recuperación metalúrgica en el tiempo t expresada en porcentaje, R_{∞} es la recuperación a tiempo infinito también expresada en porcentaje y k_{max} es la constante cinética máxima de una distribución rectangular expresada en unidades de 1/tiempo [51].

Esta distribución tiene la ventaja de mantener el mismo número de parámetros que G-Z, pero aumenta la flexibilidad pues considera la existencia de especies con diferentes velocidades de flotación [53].

Para ajustar el modelo a los datos obtenidos y obtener los parámetros de estas ecuaciones se hace necesaria la minimización de errores cuadráticos utilizando una función objetivo. Mediante la herramienta adjunta al programa Microsoft Office, Excel (Solver). La **Ecuación 41** muestra esta función.

$$\beta = \text{Min} \sum (R_i - R_{mi})^2$$

Ecuación 41

Donde R_i corresponde a la recuperación obtenida de forma experimental en el tiempo i y R_{mi} es la recuperación modelada en el tiempo i .

Dentro de estos dos modelos se realizó un análisis para trabajar con solo uno. Para ello se tomaron datos experimentales de recuperación y se ajustaron ambos modelos. La **Figura 40** y **Figura 41** muestran los gráficos de paridad⁴ construidos a partir del modelo de Garcia-Zuñiga y Klimpel respectivamente, en el cual se puede observar que el coeficiente de correlación cuando se realiza un ajuste con el modelo de Klimpel es mayor que cuando se ajusta con Garcia-Zuñiga, por lo tanto, se decidió utilizar este modelo para la realización de esta memoria.

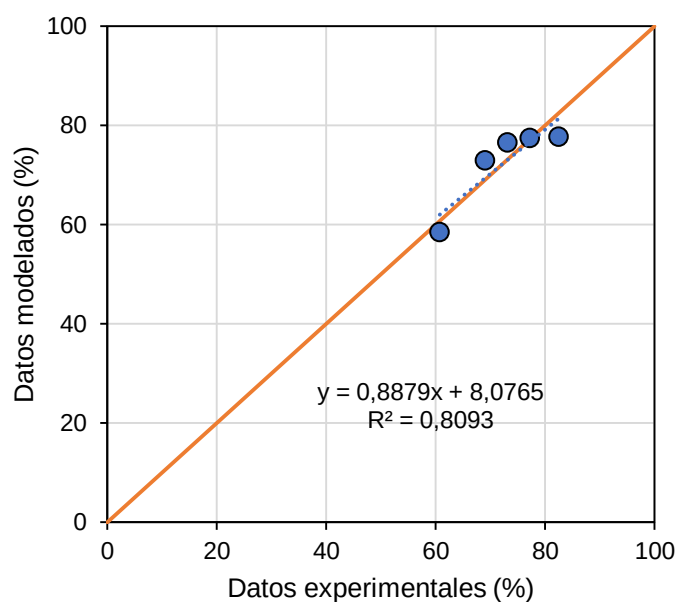


Figura 40. Gráfico de paridad de la recuperación experimental y modelada de Cu, utilizando el modelo de Garcia-Zuñiga.

⁴ El Gráfico de paridad corresponde al diagrama realizado entre los datos modelados y los datos obtenidos experimentalmente, el cual permite observar la correlación existente y que tan bien se ajusta el modelo a los datos.

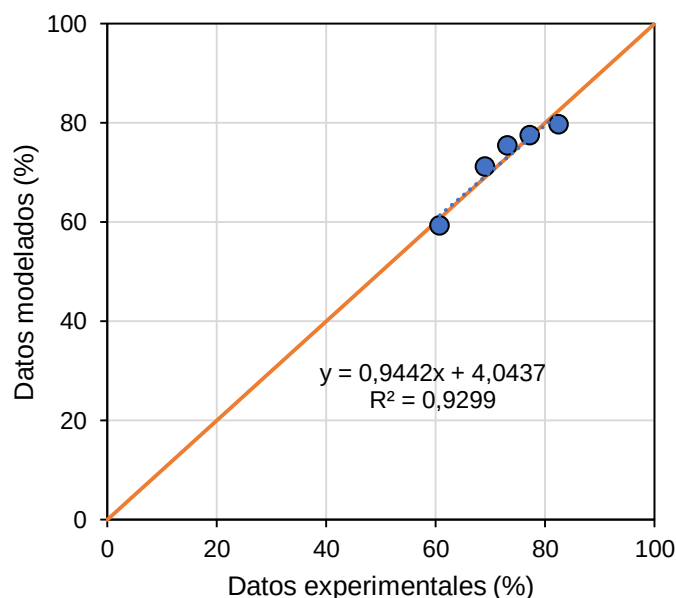


Figura 41. Gráfico de paridad de la recuperación experimental y modelada de Cu, utilizando el modelo de Klimpel.

Como el modelo de Klimpel considera una distribución de constante cinéticas y no solo una como lo hace el modelo de Garcia-Zuñiga, existe un mejor ajuste de los datos experimentales a este modelo.

Los modelos antes mencionados solo dan un entendimiento del rendimiento del proceso en cuanto a la recuperación máxima, sin embargo, deja de lado la calidad del producto que se está obteniendo (i.e., ley del concentrado). A continuación, se muestra el modelo de recuperación versus razón de enriquecimiento el cual si relaciona el rendimiento y la calidad del concentrado.

3.5.3. Modelo de recuperación versus razón de enriquecimiento

El modelo de recuperación en función de la razón de enriquecimiento permite obtener información conjunta acerca del desempeño metalúrgico y de la calidad del producto en un mismo gráfico, es decir permite obtener de manera previa del punto óptimo entre la entre estas dos variables metalúrgicas, lo cual es beneficioso si es que se desea explotar un nuevo yacimiento pues a partir de aquello se puede realizar un análisis económico acerca de la viabilidad técnica. La relación que existe entre estas dos variables es inversamente hiperbólica entre una y otra. Esto quiere decir que, si se aumenta la recuperación, la razón de enriquecimiento disminuye, y viceversa. Por lo

tanto, la información valiosa que permite entrega este tipo de modelos es el punto óptimo entre estas dos variables conocido como trade-off y que corresponde al punto de curvatura máxima. Este modelo se encuentra representado por la **Ecuación 42**, mientras que la **Figura 42** muestra un ejemplo aplicando este modelo, en donde se señalan sus parámetros.

$$R = R^* \left(1 - \frac{\sinh(b[\gamma - 1])}{\sinh(b[\gamma' - 1])} \right) \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde R es la recuperación metalúrgica, R^* es la recuperación máxima, γ corresponde a la razón de enriquecimiento, γ' es la razón de enriquecimiento máxima y b es un parámetro de ajuste. Para este modelo los parámetros corresponden R^* , γ' y b . Estos valores pueden ser obtenidos mediante minimización de los errores cuadráticos, el error en este caso sería la recuperación calculada experimentalmente y la recuperación modelada. Hay que mencionar que cuando la razón de enriquecimiento es igual a 1, significa que no hay separación, de modo que la recuperación es igual a 100%. Teniendo esto en cuenta, el parámetro R^* debe ser igual a 100%, por lo tanto, esto se transforma en una restricción cuando se minimiza la función objetivo.

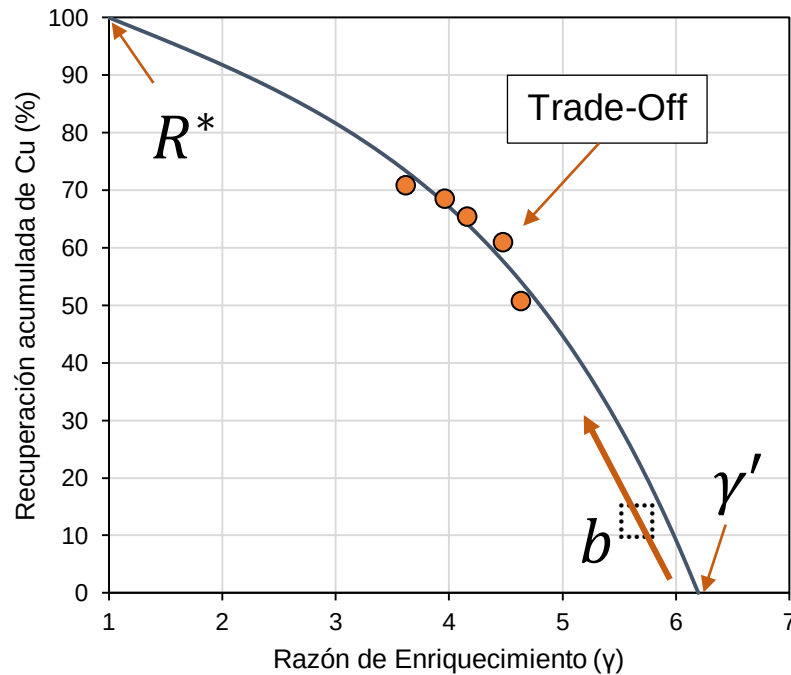


Figura 42. Diagrama de recuperación de Cu versus la razón de enriquecimiento para la prueba realizada con 10 ppm de F507.

En la **Tabla 19** se encuentran los valores de estos parámetros.

Tabla 19. Parámetros resultantes del ajuste del modelo de recuperación versus razón de enriquecimiento para la prueba realizada con 10 ppm de F507

	Valores	unidades
R*	100,00	(%)
b	0,48	(-)
y'	6,20	(-)
Trade-Off	4,48 - 61,29	(-, %)

La utilidad que tienen principalmente estas curvas es el hecho de poder encontrar el trade-off, es decir el punto óptimo entre recuperación y la calidad. Adicionalmente para este estudio las curvas se utilizarán para encontrar los valores de recuperación metalúrgica asociados a la flotación verdadera y por arrastre hidráulico.

Para poder utilizar estos modelos es necesario disponer de información robusta y consistente, por eso la sección siguiente permite realizar dicha acción.

3.5.4. Reconciliación de datos

Al realizar los balances de masa utilizando la data experimental obtenida, existen diferencias entre la masa de alimentación calculada y la masa inicial de la muestra, mientras que las leyes de alimentación calculadas también difieren de los valores obtenidos por análisis químico de la muestra inicial. Por otro lado, al comparar todos los test de flotación batch realizados, también se observan diferencias entre los valores calculados, tanto en masa como en leyes de alimentación.

Considerando lo antes mencionado, es que es necesario realizar una reconciliación de datos con el objetivo de normalizar y estandarizar los datos experimentales en función de la masa inicial y la ley de alimentación. El método utilizado en la reconciliación de datos fue por minimización de función objetivo, donde la expresión característica está determinada por la **Ecuación 43** [54] .

$$\phi = \text{Min} \sum_i k_i (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_j \text{Balance}(\hat{y}_i) \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde ϕ es la función objetivo, k_i es el factor de peso, y_i es el valor medido o experimental, $\hat{y}_i$ es el valor reconciliado. La segunda sumatoria corresponde a los balances de masa igualados a 0.

Como se puede observar en la ecuación antes mencionada, la reconciliación depende en gran medida de los factores de peso, los cuales dan cuenta de la confiabilidad de los datos medidos. Una aproximación correcta de estos factores es utilizar el inverso de la varianza de los datos experimentales, es decir que $k_i = (\sigma_i^2)^{-1}$.

Al momento de minimizar la función objetivo, se deben establecer las restricciones del problema, las cuales están dadas por los balances y los valores de la alimentación. La herramienta de minimización en este caso fue Solver (Excel) y las restricciones establecidas para la resolución se muestran en las siguientes ecuaciones (ver **Ecuación 44, Ecuación 45 y Ecuación 46**):

$$\sum_j \hat{C}_j + \hat{T} = \hat{F} \quad \text{Ecuación 44}$$

$$\frac{\sum_j \hat{c}_{ij} \hat{C}_j + \hat{t}_i \hat{T}}{\hat{F}} = \hat{f}_i \quad \text{Ecuación 45}$$

$$\hat{f}_i = f_i^{AQ} \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde $\hat{C}_j$ es la masa reconciliada de concentrado del tiempo j, $\hat{c}_{ij}$ es la ley reconciliada del elemento i en el concentrado del tiempo j, $\hat{T}$ es la masa reconciliada de relave, $\hat{t}_i$ es la ley reconciliada del elemento i en el relave, $\hat{F}$ es la masa reconciliada de alimentación, $\hat{f}_i$ es la ley reconciliada del elemento i en la alimentación y f_i^{AQ} es la ley analizada de i en la alimentación.

Esta metodología fue implementada en todas las pruebas y así de esta forma estandarizar la condición inicial de los tests de flotación batch [54].

La reconciliación es necesaria realizarla por el hecho de que existen diversas fuentes de error en la metodología propuesta y como es sabido ningún proceso es 100% ideal. A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas para realizar la propagación de errores y por qué utilizarlas.

3.5.5. Propagación de error

El procedimiento experimental llevado a cabo contiene una serie de fuentes de error que finalmente influyen en los cálculos realizados y por ende en el análisis de los resultados. Bajo esta premisa es necesario identificar las fuentes de error, de manera de establecer la confiabilidad del método llevado a cabo [55].

En el procedimiento experimental se identificaron diversas fuentes de error las cuales se detallan a continuación

- Homogeneización de la muestra de alimentación
- Masa inicial de la muestra de alimentación
- Masa de concentrado y relaves en los tests de flotación batch.
- Leyes de concentrado y relave de los tests batch
- Pérdida de masa de las muestras en proceso de filtrado y/o secado
- Análisis químico de leyes de concentrado y relave
- Recuperación de agua en el test de flotación
- Medición de gas holdup

El error de cada medición se estima como la desviación estándar de las repeticiones realizadas por prueba tal como lo indica la **Ecuación 47**.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 47

Donde x corresponde al valor de la medición, $\bar{x}$ es el promedio de las repeticiones y n el número de repeticiones. Finalmente teniendo los errores de las mediciones, es posible calcular la propagación de estos.

Dependiendo de la operación matemática que se realice, el error resultante se determinara de diferente manera. Cuando se realiza una suma o resta se debe aplicar la **Ecuación 48**.

$$\sigma x = \sqrt{(\sigma a)^2 + (\sigma b)^2} \quad \text{Ecuación 48}$$

Mientras que cuando la operación sea multiplicación o división se debe aplicar la **Ecuación 49**.

$$\frac{\sigma x}{x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\sigma b}{b}\right)^2} \quad \text{Ecuación 49}$$

Donde x , a y b son los valores promedios de los replicados, mientras que σx , σa y σb son las desviaciones estándar de los replicados.

Todas estas ecuaciones y formulas vistas anteriormente permitieron guiar en la forma correcta el estudio. A continuación, se abordará el capítulo 4, el cual consiste en analizar los resultados y discusiones respecto al estudio llevado a cabo.

4. CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Esta sección se subdivide en 5 partes principales, la primera consiste en abordar la exactitud del método de medición, en segundo lugar, abarcar la precisión del método de medición, seguida por la validación de la metodología. Mientras que en otro apartado se abordarán las mediciones realizadas en sistema bifásico y por último las pruebas desarrolladas en sistema trifásico y su relación con la metalurgia.

Cuando se hace referencia a la exactitud y precisión de la metodología propuesta, se está pensando principalmente en el instrumento adaptado que se utilizó para la medición de gas holdup y en el proceso total que involucra la flotación batch. Estos instrumentos y procedimientos involucran fuentes de error las cuales se propagan hasta los resultados y/o respuestas (i.e., recuperación metalúrgica, ley del concentrado, constantes cinéticas, entre otras). A continuación, en la **Figura 43** se muestra un

diagrama del proceso con las principales fuentes de error existentes, las cuales se encuentran encerradas con líneas punteadas, siendo las de color rojo las fuentes que tienen mayor relevancia.

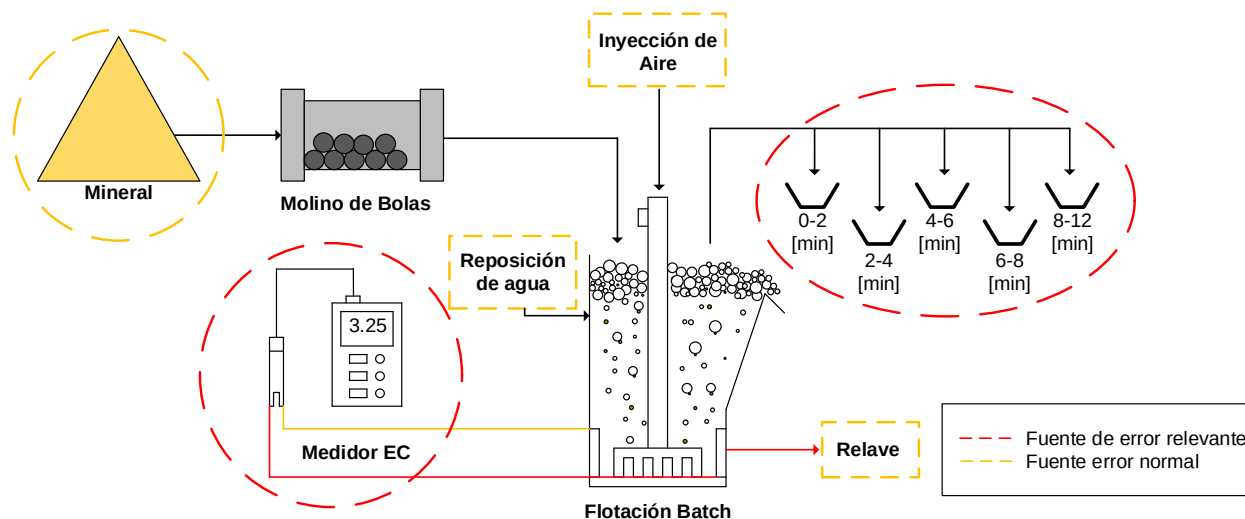


Figura 43. Diagrama del proceso de flotación donde muestra las principales fuentes de error.

Todos estos procesos y mediciones presentan variabilidad, es decir se mueven dentro de una banda de error, esto es equivalente a hablar de la precisión de las mediciones, mientras que por otra parte la exactitud se refiere a que tan alejado del valor real se encuentran las mediciones tomadas con los instrumentos utilizados en esta memoria. A continuación, se analiza estos dos aspectos (i.e., exactitud y precisión).

4.1. Exactitud del método de medición

El instrumento de medición utilizado en esta memoria se puede dividir en 2 secciones. Por una parte, se tiene la obtención de concentrados mediante la flotación batch. Mientras que, por otro lado, la obtención de los perfiles de gas holdup a partir de la conductividad eléctrica, dan cuenta de las condiciones hidrodinámicas relacionadas con la inyección de aire.

Como se mencionó anteriormente la exactitud indica el grado de cercanía de las mediciones experimentales con los valores reales. Con respecto al dispositivo adaptado para la obtención de gas holdup a partir de la conductividad eléctrica el cual se muestra en la **Figura 44**, es difícil conocer su exactitud, puesto que no existen

instrumentos calibrados en el comercio que permitan obtener la concentración de aire a partir de la conductividad eléctrica. La dificultad es inclusive mayor cuando la medida se necesita obtener en un sistema trifásico. La literatura muestra muchos resultados que han sido por lo general obtenidos en sistemas bifásicos solamente [5] [46] [49].

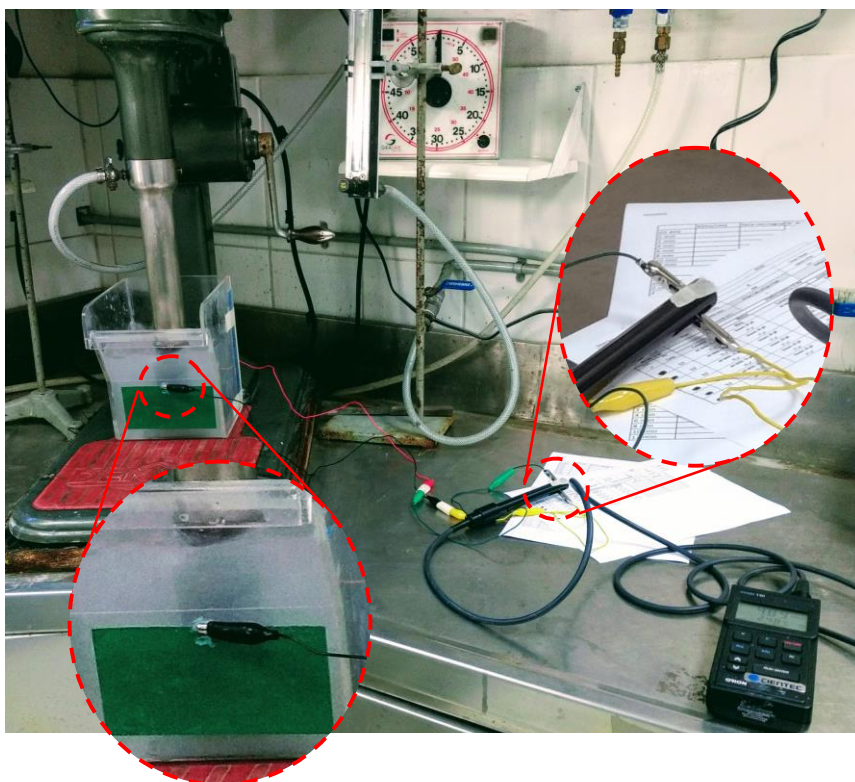


Figura 44. Celda de flotación batch con placas de acero instaladas en forma paralela para la medición de conductividad, y la eventual estimación de gas holdup. La figura muestra las conexiones a dichas placas y un conductímetro usado para medir la conductancia.

En la **Figura 44** se aprecia el sistema de medición, el cual consistía en dos placas de acero inoxidable las cuales se encontraban en la cara frontal y cara posterior de la celda acrílica de flotación, estas placas contemplaban una aleta, la cual se utilizaría para conectar a través de pinzas tipo caimán (ver **Figura 45**) los polos de la probeta del conductímetro con las mismas placas de acero.



Figura 45. Conectores tipo caimán utilizados para conectar las placas de acero inoxidable y los polos del conductímetro (Fuente Google).

Este método utilizado para determinar la concentración de aire en la celda de flotación batch tiene un sin número de desafíos a tener en cuenta al momento de estimar gas holdup. A continuación, se listan los aspectos más difíciles que se tuvieron que superar durante la medición experimental:

- El concepto de medición de conductividad se enfoca en medir la resistividad entre dos placas muy cercanas una de la otra. Sin embargo, a medida que la distancia entre las placas aumenta el área de estas también debería aumentar y medición de resistividad debe ser corregida por un factor conocido como la constante de celda.
- Placas de un área grande requieren conexiones eléctricas robustas y confiables.
- La medición de resistividad se llevó a cabo en forma relativa. En otras palabras, las medidas obtenidas del conductímetro de laboratorio no tienen significancia física por el tipo de configuración utilizado para realizar las mediciones. Al mismo tiempo, este instrumento al parecer no tiene la sensibilidad suficiente para magnificar las mediciones relativas llevadas a cabo.
- La contaminación de las placas por la exposición a la pulpa de flotación requiere una mantención frecuente, de lo contrario los resultados que se obtienen no son confiables.
- No se tenía un referente para calibrar la configuración de las placas a utilizar.

- Por último, por las características del diseño de la celda de flotación batch utilizada, el eje del rotor (shaft) se encontraba entre las dos placas. Esta configuración, sin duda, influyó la medida de resistividad.

Esta lista de desafíos impactó el procedimiento experimental llevado a cabo. En consecuencia, se cree que las medidas experimentales en términos de exactitud tienen un cierto grado de sesgo.

El desempeño metalúrgico en la forma en que se determinó también está sujeto a sesgo. El grado de exactitud se relaciona principalmente al nivel de experiencia asociado al operador.

Debido a que los valores verdaderos no se conocen (i.e., concentración de aire y desempeño metalúrgico), la estrategia de repetir tests ayuda a estimar el nivel de reproducibilidad de la experimentación lo que da cuenta de la precisión. La sección siguiente revisa y evalúa este aspecto.

4.2. Precisión del método de medición

La repetitividad de un procedimiento experimental es indicativo de un alto nivel de precisión. Si al llevar a cabo la repetición de los experimentos, se observa variabilidad, esta puede ser consecuencia de errores aleatorios, sistemáticos o ambos [56]. En esta sección se presentan los resultados de las pruebas que se llevaron a cabo en triplicado para evaluar el grado de precisión asociada a la metodología utilizada.

Pruebas de flotación en triplicado se ejecutaron para estimar la variabilidad del procedimiento experimental. Los resultados de gas holdup, diámetro de burbuja, recuperación de agua, recuperación másica, recuperación metalúrgica, ley de Cobre y Hierro se reportan en forma de gráficos y tabla en esta sección. Se llevaron a cabo 2 set de experimentos los cuales se detallan en la **Tabla 20**.

Tabla 20. Set de pruebas realizadas para evaluar la repetitividad de la medición.

	Molino			Acondicionamiento
	Colector 1	Colector 2	Colector Mo	Espumante
Triplicado 1	AP-9950; 15 g/t	AP-6404; 7 g/t	Diésel; 20 g/t	MIBC; 10 ppm
Triplicado 2	AP-9950; 15 g/t	AP-6404; 7 g/t	Diésel; 20 g/t	F501; 10 ppm

En esta tabla se muestra resultados para dos sets de pruebas en triplicado cuya diferencia es el tipo de espumante utilizado (triplicado 1, MIBC y triplicado 2, F501).

A continuación, en la **Figura 46** se muestra una secuencia con las principales variables y respuestas que permitirán evaluar la repetitividad. El abordar de esta forma la secuencia permite mantener un orden en cuanto a la presentación de los resultados.

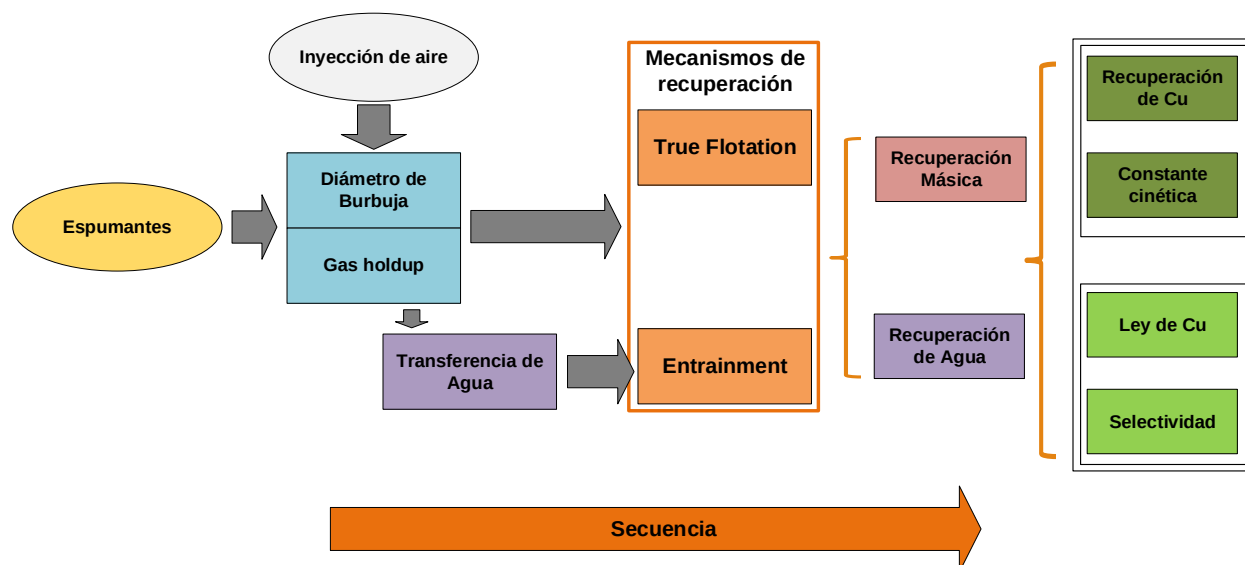


Figura 46. Secuencia de la evaluación metalúrgica llevada a cabo con los diferentes tipos de espumantes evaluados (i.e., recuperación de Cu, ley de Cu, constante cinética y selectividad).

En primera instancia se reportan los resultados obtenidos para las mediciones de gas holdup como parte de la cinética de flotación batch (ver **Figura 47**). Estas mediciones se realizaron usando los espumantes MIBC (grafico izquierdo) y F501 (gráfico derecho) a 10 ppm de concentración ($\mu\text{L}/\text{L}$).

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

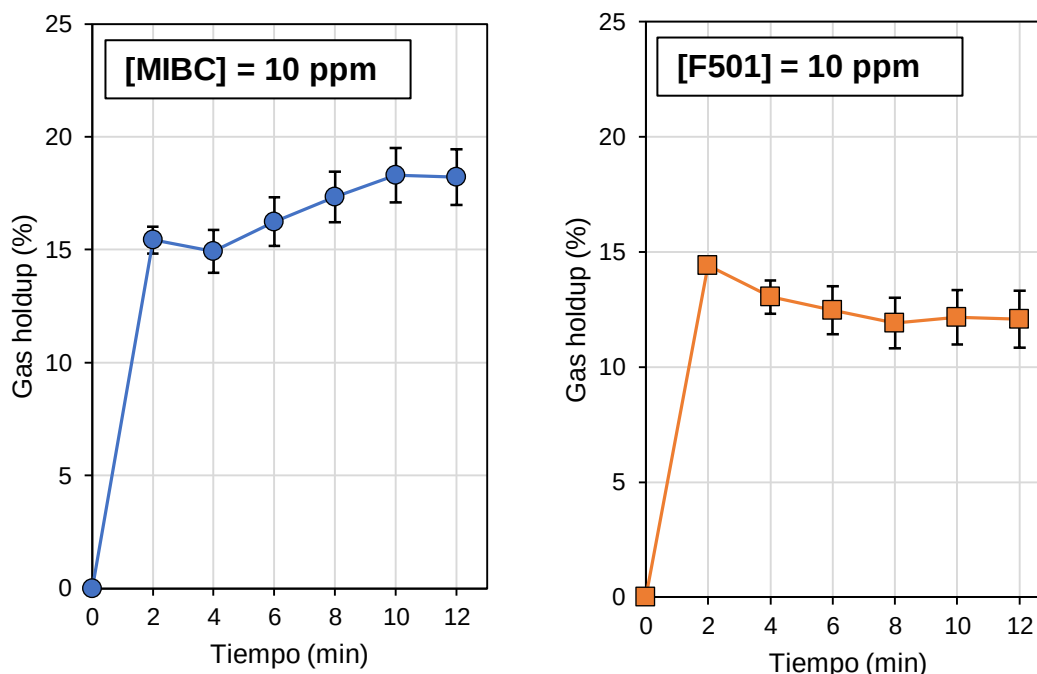


Figura 47. Resultados de gas holdup (%) en función del tiempo de flotación para pruebas con MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.

Para el caso del MIBC es posible notar que de cero a dos minutos existe un aumento brusco del gas holdup (0% → 16%) el cual es causado por la inyección de aire en el sistema. De dos a doce minutos hay que notar que el gas holdup aumenta progresivamente (16% → 18%). Por otra parte, el espumante F501 presenta un aumento de gas holdup (0% → 14%) en los dos primeros minutos, sin embargo, ε_g disminuye (14% → 12%) en los próximos diez minutos de flotación. Se cree que esta conducta diferente entre los espumantes se debe a las propiedades fisicoquímicas de ellos (i.e., solubilidad en agua y volatilidad, ver **Tabla 21**) y al mismo tiempo la inyección de aire la cual se fue variando a lo largo de la prueba según lo muestra la **Tabla 22**.

Tabla 21. Propiedades cualitativas de los espumantes estudiados.

	Solubilidad	Volatilidad
MIBC	Media	Alta
F501	Baja	Baja

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 22. Valores de cómo cambio la inyección y velocidad superficial de aire en el tiempo de flotación.

Tiempo (min)	Flujo de aire (L/min)	J_g (cm/s)
0	0	0,00
2	4	0,38
4	4	0,38
6	5	0,48
8	6	0,57
10	7	0,67
12	7	0,67

La **Figura 48** muestra un diagrama especulativo de la interacción que existe entre la solubilidad del surfactante, volatilidad y el impacto de la temperatura en ellos. Al aumentar la inyección del aire en el sistema, se sabe que la temperatura disminuye dentro de este mismo, consecuentemente, esta disminución en temperatura afecta la solubilidad del espumante (disminuye). Con respecto a la volatilidad, esta se ve incrementada al aumentar el flujo de aire, sin embargo, la disminución de temperatura debiese contrarrestar este efecto.

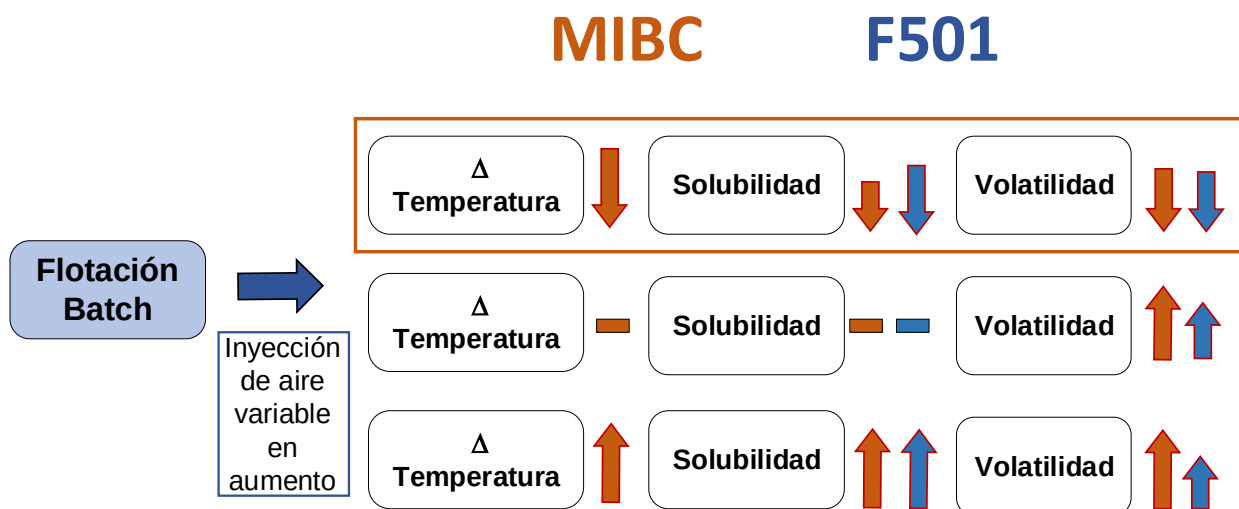


Figura 48. Efecto de la inyección de aire sobre las propiedades fisicoquímicas de los espumantes.

La suma de todos estos efectos impactará finalmente en el gas holdup obtenido. Por lo tanto, para el caso del MIBC es posible decir que el efecto de la inyección de aire disminuye su solubilidad en un delta más pequeño que el F501. Con respecto a su volatilidad, esta disminuye levemente o no es afectada (como lo demuestran los valores

experimentales de gas holdup), lográndose finalmente que siga disponible el espumante durante la flotación. Por otra parte, el F501 con el aumento de la inyección de aire, su solubilidad se ve disminuida aún más, como también su volatilidad. Consecuentemente la disponibilidad de este espumante durante el proceso de flotación se reduce lo cual se traduce en una disminución consistente del gas holdup.

A continuación, en la **Figura 49** se pueden apreciar los gráficos asociados a los diámetros de burbuja obtenidos a partir del gas holdup y la velocidad superficial de gas. El grafico izquierdo muestra los resultados para el MIBC, mientras que a mano derecha los resultados para el F501.

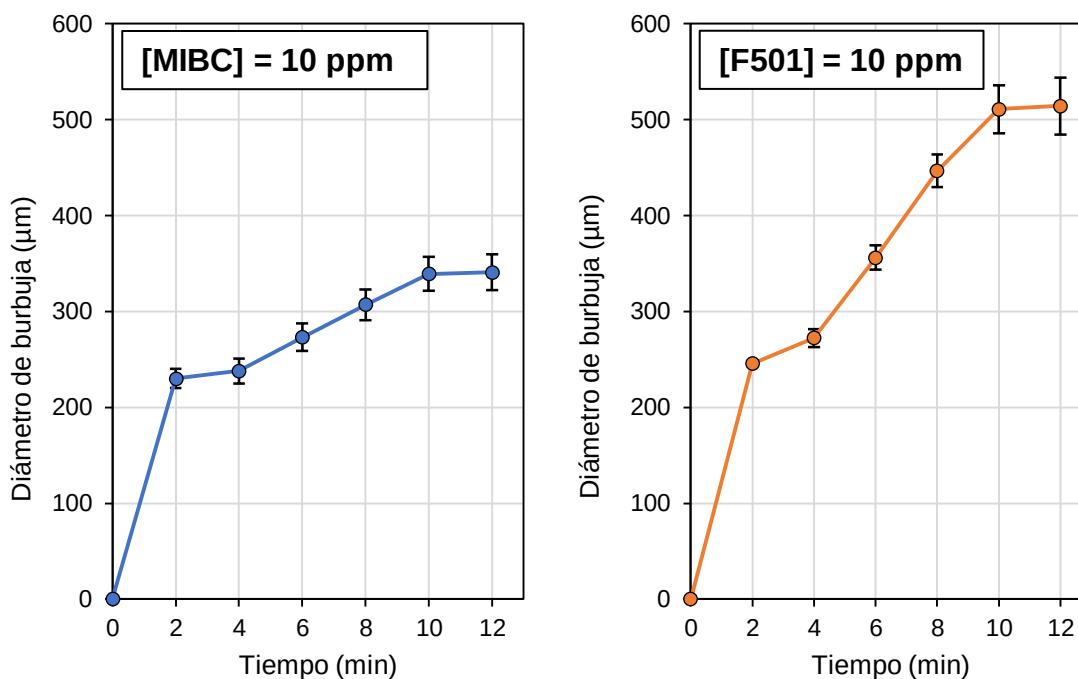


Figura 49. Resultados de diámetro de burbuja (μm) en función del tiempo para pruebas de MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm (pruebas realizadas en triplicado).

Con estos gráficos se puede corroborar lo planteado anteriormente con relación a la disponibilidad de los espumantes para controlar la coalescencia y mantener un tamaño de burbuja el cual genera una concentración de aire o holdup estable para llevar a cabo el proceso de flotación.

Por la lógica de estas curvas se podría inferir el desempeño metalúrgico a obtener para un mineral dado en base a estos perfiles de gas holdup y diámetro de burbuja.

Se puede evidenciar una mayor variación en las repeticiones para el caso del F501 alcanzándose una variabilidad máxima de alrededor a un 4%, valor que se encuentra dentro de los estándares permitidos. Por otra parte, cabe mencionar que estos gráficos concuerdan con la teoría, pues bien, para mayores valores de gas holdup se logra ver un menor diámetro de burbuja (caso MIBC), mientras que, para el caso contrario, a menores valores de gas holdup, se observan mayores diámetros de burbuja (caso F501).

En la **Figura 50** se muestran los resultados de recuperación de agua acumulada para los dos espumantes utilizados (i.e., MIBC y F501) en las pruebas realizadas en triplicado. El gráfico del lado izquierdo muestra los valores para el MIBC mientras que en el lado derecho se observan los resultados para el F501, con sus respectivas bandas de error.

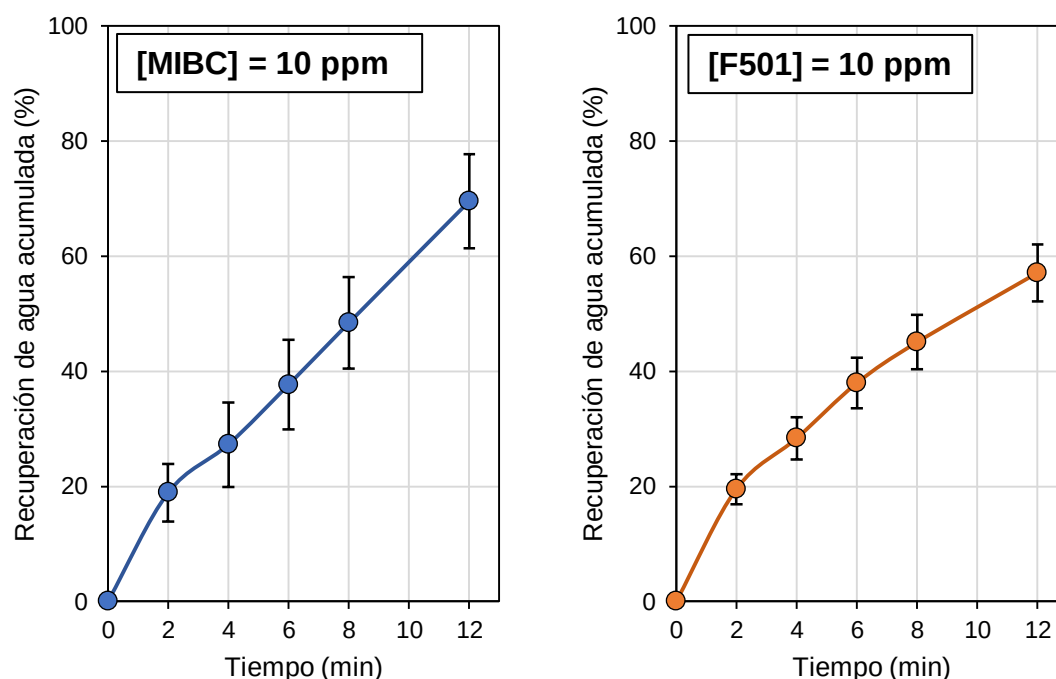


Figura 50. Resultados de recuperación de agua acumulada en función del tiempo para pruebas con MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.

Se logra apreciar que para el F501 se obtuvo una variabilidad menor que para el caso del MIBC, sin embargo, son aceptables estos valores puesto que la desviación estándar relativa máxima obtenida corresponde a un 13%.

Por definición un reactor del tipo batch (i.e., celda de flotación batch) tiene que ser operado a volumen constante por definición [52] esto quiere decir que el volumen que se extrajo de mineral más agua (concentrado), debe ser repuesto de igual forma por agua (make-up water) como se muestra en **Figura 51**. Además, se corrobora por el balance volumétrico expresado en **Ecuación 50**.

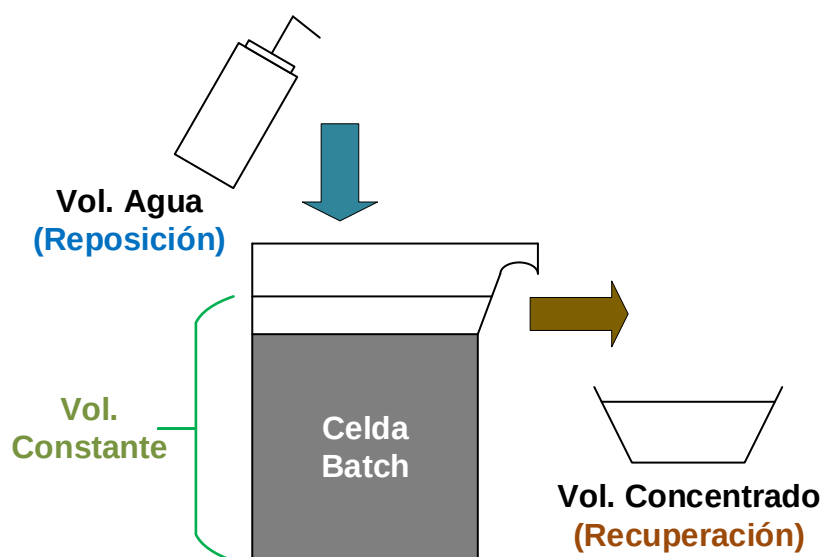


Figura 51. Diagrama representativo de un sistema batch el cual opera a volumen constante (i.e., Vol. de agua reposición = Vol. De concentrado recuperado).

$$Vol_{masa\ mineral} + Vol_{agua\ recuperada} = Vol_{agua\ repuesta}$$

Ecuación 50

Una forma de verificar la calidad de la experimentación asociada a un test de flotación batch, es comparando el volumen de concentrado removido a cada intervalo de tiempo con el agua de reposición adicionada. Esta comparación es indicativa de que el test se operó de acuerdo a las condiciones de borde establecidas para un reactor batch (Volumen constante a lo largo de la duración del test) como lo indica la **Figura 51**. La **Figura 52** muestra un gráfico donde se compara el error entre el volumen adicionado y removido para las diferentes condiciones experimentales evaluadas.

La **Ecuación 51** hace referencia al error antes mencionado entre el volumen de reposición y el volumen removido.

$$Error (\%) = \frac{Volumen_{removido} - Volumen_{agua reposición}}{Volumen_{removido}} \quad \text{Ecuación 51}$$

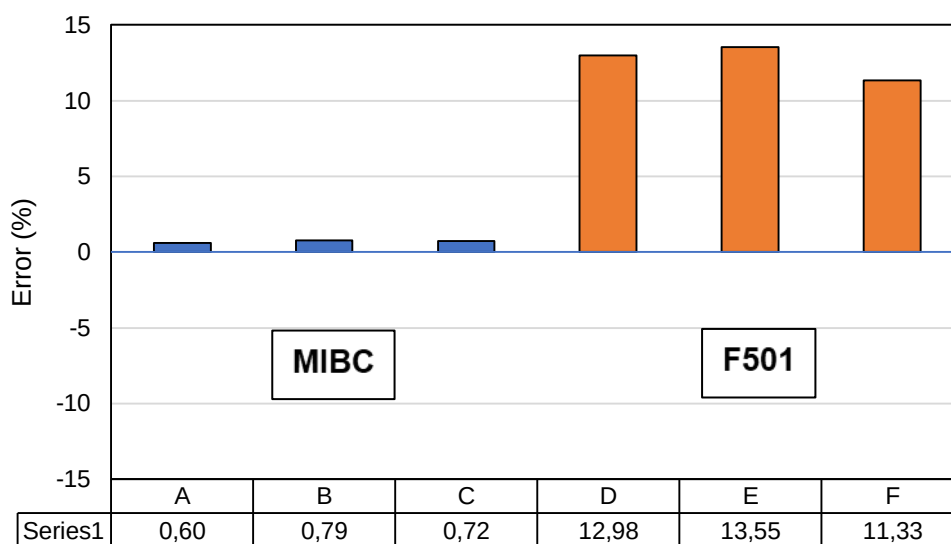


Figura 52. Gráfico de barras con los errores (%) entre el volumen repuesto y el volumen removido, obtenidos para las pruebas con los espumantes MIBC y F501. Notar que los valores reportados para MIBC son resultantes de experimentación en triplicado (A, B y C). De la misma forma los test realizados para F501 fueron ejecutados en triplicado (D, E y F).

En la **Figura 52** se observa que los tests realizados con el espumante MIBC generaron una pequeña discrepancia (< 2%) entre el volumen removido y el volumen adicionado (A, B y C). Por otro lado, el espumante F501 exhibió una discrepancia significativa (> 10%) entre el volumen removido y el volumen adicionado (D, E y F). Una posible causa para esto es el hecho de que la solubilidad del F501 es menor que la del MIBC, por lo tanto, el poder coalescente de este espumante es menor, haciendo que burbujas más grandes arrastren más agua hacia el concentrado. Como consecuencia de esto para el operador resulta más difícil reponer el volumen extraído en forma oportuna y en la cantidad adecuada, lo cual queda expresado en las discrepancias mostradas.

También es posible notar que la variabilidad existente por espumante es baja respecto al promedio, con una DER de 13,66% para el MIBC mientras que para el F501 una DER de 9,13% implicando de que por espumante se trata de un experimento que es repetible, sin embargo, estos errores siempre estarán muy influenciados por la habilidad que tenga el operador que realiza el test. Adicionalmente, es importante

destacar que desde un punto de vista de desempeño metalúrgico la separación del contenido de valor presente en la mena estudiada con los reactivos químicos utilizados y en el reactor seleccionado depende también del balance de agua en el sistema.

Con respecto a la recuperación másica, esta corresponde a una de las mediciones y fuente de error más grande dentro del proceso, pues afecta directamente al mineral valioso que se está recuperando. En la **Figura 53** se muestran los resultados asociados a la recuperación másica acumulada para los triplicados realizados con los espumantes MIBC y F501 respectivamente en función del tiempo.

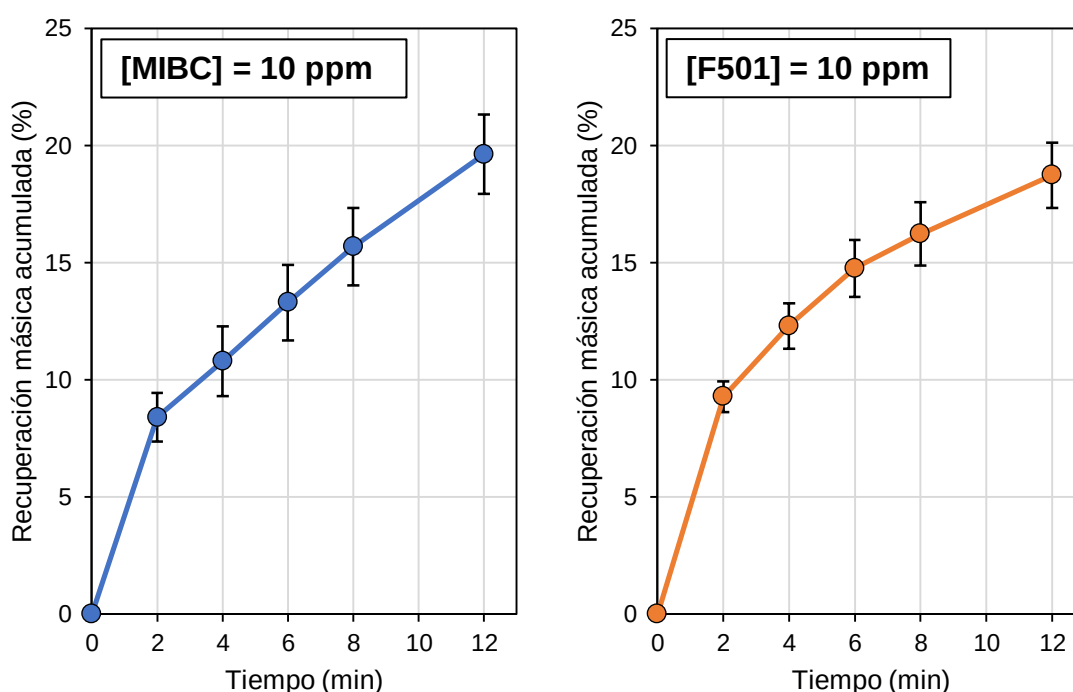


Figura 53. Resultados de recuperación másica acumulada en función del tiempo para las pruebas con espumantes MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.

Al observar los gráficos antes mencionados no se logra evidenciar mayores variabilidades ni diferencias significativas entre un espumante y otro. Sin embargo, hay que hacer mención de la habilidad y la experiencia que posee un operador el cual tiene un impacto significativo en la consistencia de los resultados que se obtienen en una celda de experimentación batch. No obstante, vale la pena destacar que estas masas recuperadas se obtuvieron asociadas a una masa de agua y como se observó en la sección anterior el espumante F501 generó un desafío mayor con el agua de

reposición. Consecuentemente, a pesar de que las recuperaciones másicas lucen similares el cuadro completo del desempeño metalúrgico no lo es.

En la **Figura 54** y **Figura 56** se muestran gráficos de barras los cuales ilustran la masa porcentual recuperada para MIBC y F501, Mientras que en la **Figura 55** y **Figura 57** se evidencia el error asociado al volumen removido y volumen repuesto (ver **Ecuación 51**).

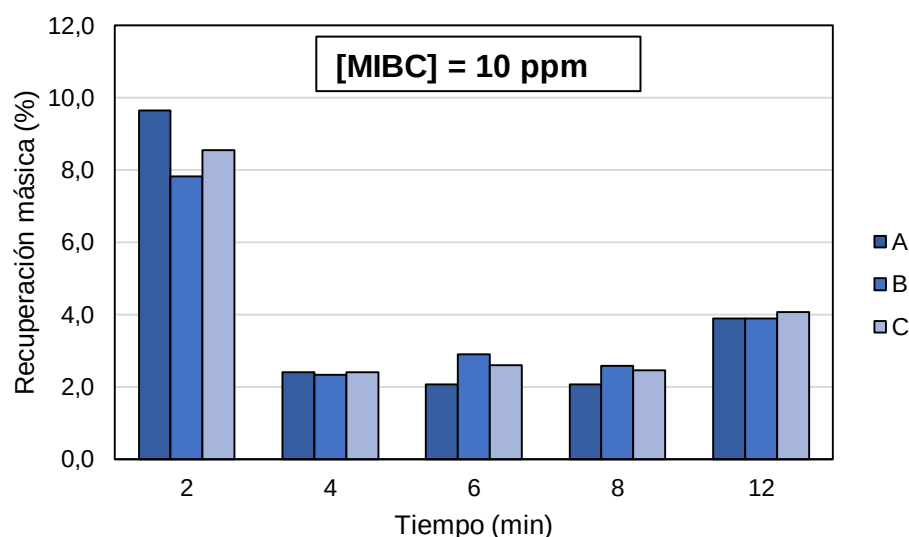


Figura 54. Gráfico de barras con la masa porcentual recuperada para cada tiempo en triplicado (10 ppm de MIBC).

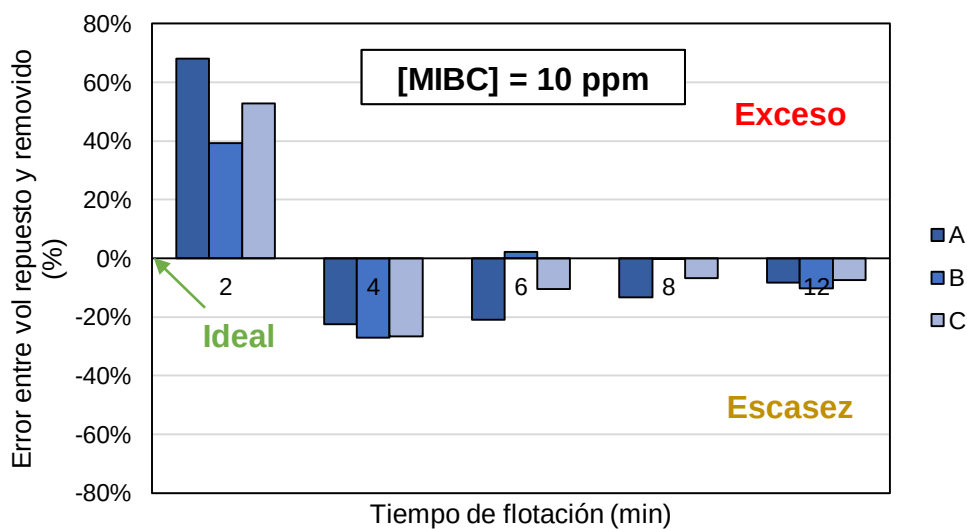


Figura 55. Gráfico de barras con los errores absolutos asociados entre el volumen removido y el volumen repuesto para cada tiempo en triplicado (10 ppm con MIBC).

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

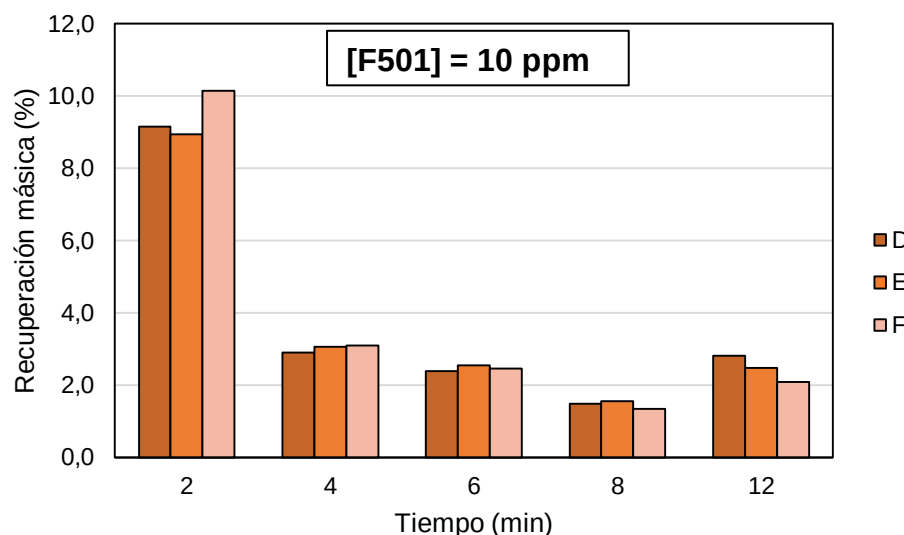


Figura 56. Gráfico de barras con la masa porcentual recuperada para cada tiempo en triplicado (10 ppm de F501).

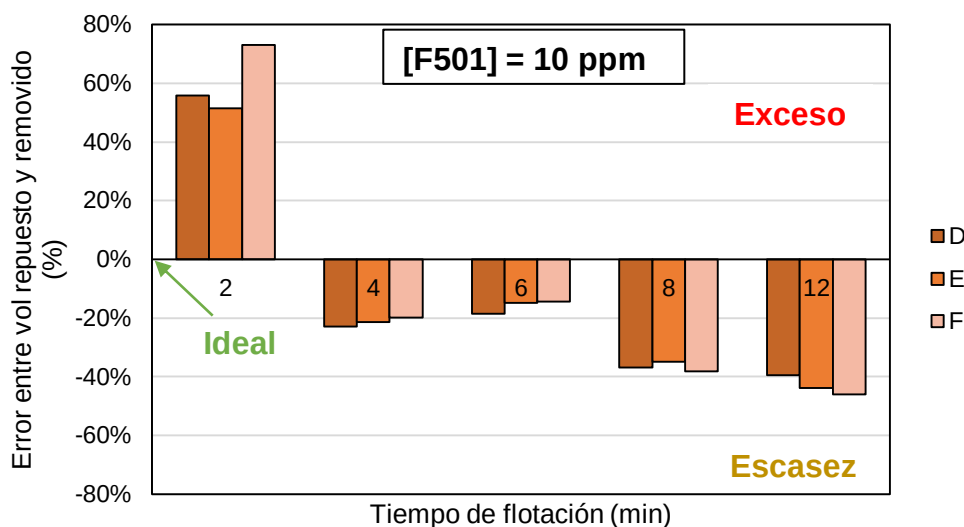


Figura 57. Gráfico de barras con los errores absolutos asociados entre el volumen removido y el volumen repuesto para cada tiempo en triplicado (10 ppm con F501).

Es posible notar que no existe una mayor variabilidad si se comparan los triplicados de ambos espumantes en cuanto a recuperación másica. No obstante, es muy distinto lo que se observa en los errores asociados al volumen removido de concentrado (sólidos y agua) y volumen repuesto (solo agua) por intervalo de tiempo. Se logra evidenciar que para el caso del MIBC los primeros 2 minutos se remueve más volumen del que se repuso, mientras que el resto del tiempo se invierte esta condición, es decir que el volumen removido es menor que el repuesto. De igual forma se da para el caso del

F501 no obstante del minuto 4 en adelante el porcentaje de error asociado es mayor que el MIBC.

La diferencia significativa entre estos volúmenes tiene un impacto en la confiabilidad de la operación del reactor batch, la **Figura 58** muestra 3 situaciones en donde existe una condición ideal de operación (volumen constante), un caso en donde el volumen removido es mayor que el repuesto y cuando el volumen removido es menor que el de reposición.

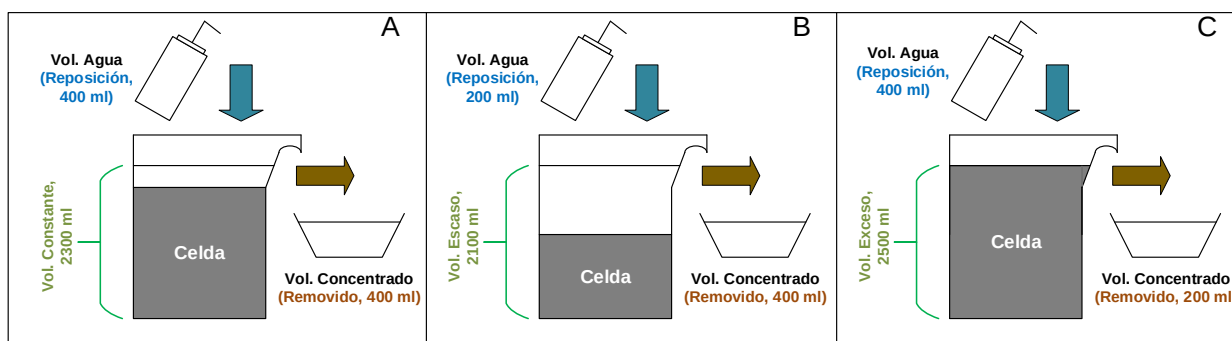


Figura 58. Diagrama con 3 casos en donde en A se observa que el sistema opera a volumen constante (caso ideal), en B el vol. removido es mayor que el repuesto por ende hay déficit dentro de la celda (caso en escasez) y en C el vol. removido es menor que el repuesto produciendo un exceso de volumen dentro de la celda (caso en exceso).

Desde un punto de vista metalúrgico, los resultados posteriores se ven afectados debido a la operación defectuosa de la celda de flotación batch (i.e., no operar reactor batch a volumen constante). Notar que la reposición de agua en términos excesivos o escasos impactará la calidad del concentrado producido (ley).

En las **Tabla 23** se muestran las desviaciones estándar relativas asociadas a la recuperación másica, mientras que en la **Tabla 24** se muestran los resultados para el error entre volúmenes removidos y repuestos por intervalo de tiempo.

Tabla 23. Valores de desviación estándar relativa (%) para la recuperación másica por intervalo de tiempo.

	MIBC [10 ppm]			F501 [10 ppm]		
Tiempo (min)	Promedio	Desv	DER (%)	Promedio	Desv	DER (%)
2	8,41	1,04	12,35	9,29	0,66	7,07
4	2,38	0,04	1,70	3,02	0,11	3,49
6	2,52	0,47	18,76	2,46	0,08	3,26
8	2,38	0,30	12,50	1,46	0,11	7,20
12	3,95	0,10	2,42	2,51	0,39	15,42

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 24. Valores de errores absolutos entre el valor volumen repuesto y volumen removido para MIBC y F501.

	MIBC [10 ppm]			F501 [10 ppm]		
Tiempo (min)	A	B	C	D	E	F
2	68%	39%	53%	56%	52%	73%
4	-22%	-27%	-27%	-23%	-21%	-20%
6	-21%	2%	-11%	-18%	-15%	-14%
8	-13%	0%	-7%	-37%	-35%	-38%
12	-8%	-10%	-7%	-39%	-44%	-46%

Los primeros 2 minutos para ambos espumantes se encuentra la mayor variabilidad en cuanto a recuperaciones másicas, la cual se atribuye netamente al hecho que el paleteo de colección de concentrado es cada 5 segundos el primer minuto, por ende, es más fácil cometer errores en esta parte del proceso. De igual forma ocurre para los errores asociados al volumen repuesto y volumen removido, se presenta una alta variabilidad los primeros 2 minutos por acción del hecho antes mencionado.

Finalmente hay que mencionar que es importante observar y prestar atención en la variabilidad conjunta (i.e., agua y masa de mineral recuperada) puesto que permite indicar si el sistema batch se operó adecuadamente (i.e., manteniendo el volumen del reactor constante a lo largo de la duración del test).

En la **Figura 59** se observan curvas de recuperación de Cu y Fe para las pruebas con MIBC (grafico izquierdo) y F501 (grafico derecho). Cada curva está compuesta con sus respectivas bandas de error para dar cuenta de la variabilidad.

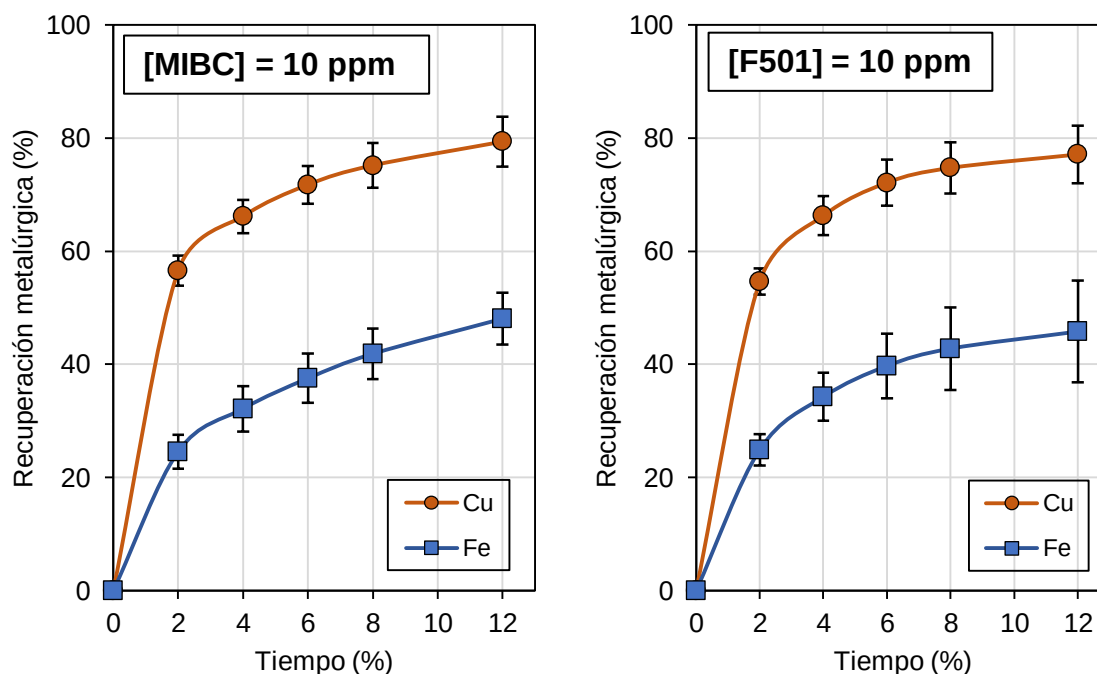


Figura 59. Recuperación Metalúrgica de Cu y Fe para pruebas con MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.

Para el caso del cobre, en ambos casos se observa que la variación no alcanza a ser mayor que 5 puntos porcentuales. Sin embargo, el fierro (Fe) para las pruebas en triplicado con F501 presentan una mayor variabilidad, consecuencia de esto pudo haber sido el hecho de que en intervalos de tiempo la celda de flotación no se operó correctamente (volumen no constante) y así lo demuestran los gráficos de barra expuestos anteriormente, implicando en que el operador a ratos quizás no solo recuperaba espuma mediante paleteo sino también pulpa lo que pudo haber ocurrido los primeros 2 minutos. Otra posible causa se puede deber al hecho de que como la solubilidad del F501, provoca que durante el test la coalescencia de las burbujas aumente (i.e., las burbujas crecen) y esto impacta directamente el entrainment, por otro lado, también genera inestabilidad en el sistema haciendo que sea más dinámico, pues el agente que controla el tamaño de burbuja (i.e., espumante) se ve disminuido en cuanto a disponibilidad durante el test.

En la **Figura 60** se muestran las curvas de ley acumulada para el Cu y Fe, con cada uno de los espumantes utilizados (i.e., MIBC y F501 respectivamente). Se puede evidenciar que para ambos espumantes las curvas del cobre muestran una tendencia

normal que correspondería a descender en todo momento, sin embargo, las curvas de ley de Fe en función del tiempo para ambos espumantes en el minuto cuatro muestra una situación anómala debido a que la ley acumulada en ese punto aumenta, lo que estaría indicando una mayor recuperación de Fe en el tramo de dos a cuatro minutos.

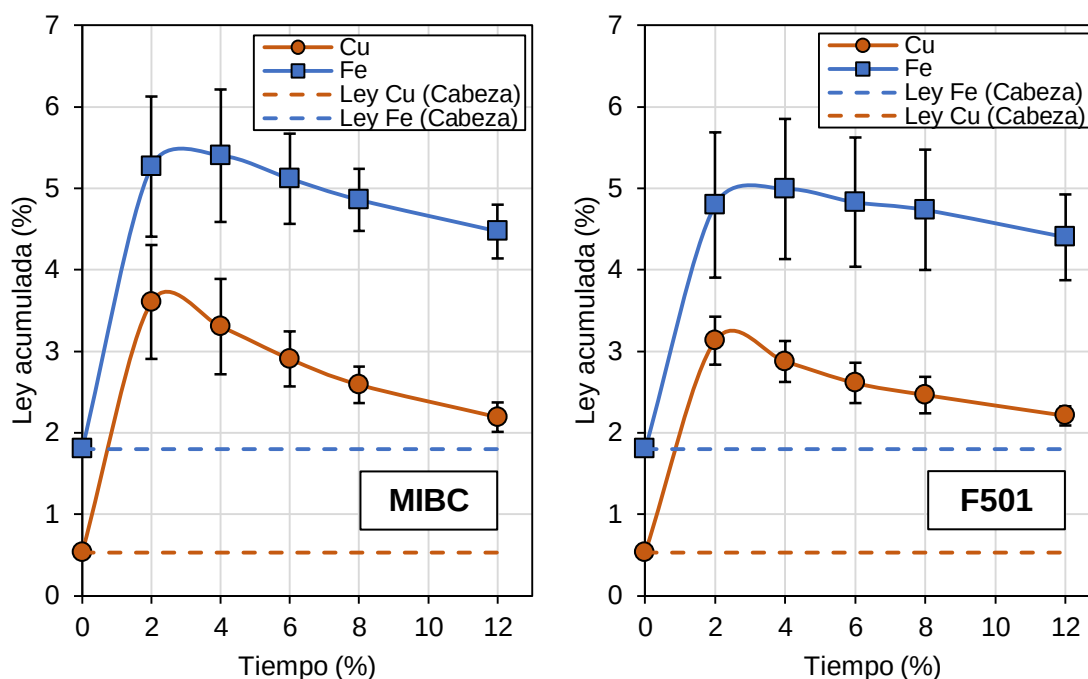


Figura 60. Ley acumulada de Cu y Fe para pruebas de MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.

Con respecto a las bandas de error, se logra evidenciar una mayor variabilidad para las mediciones del Fe, posiblemente atribuido al entrainment pues bien corresponde a un proceso de recuperación no selectiva. Por otra parte, el hecho de que en intervalos no se haya operado con el reactor a volumen constante, induce en variabilidades como las vistas anteriormente. Con respecto al cobre, la variabilidad cuando se utiliza MIBC es mayor, una posible atribución a este efecto puede ser el hecho de que como no se repuso en intervalos de tiempo una cantidad de agua equivalente al volumen que se estaba extrayendo, provoco inestabilidad en la interfase pulpa/espuma pudiendo causar un mayor arrastre de pulpa más que de espuma o viceversa. Este arrastre de pulpa se puede reflejar en las altas variabilidades de la calidad del concentrado por ser un proceso no selectivo.

En la **Figura 61** se muestra graficada la razón de enriquecimiento para el cobre y hierro obtenidos en las pruebas en triplicado con MIBC Y F501 a una concentración 10 ppm.

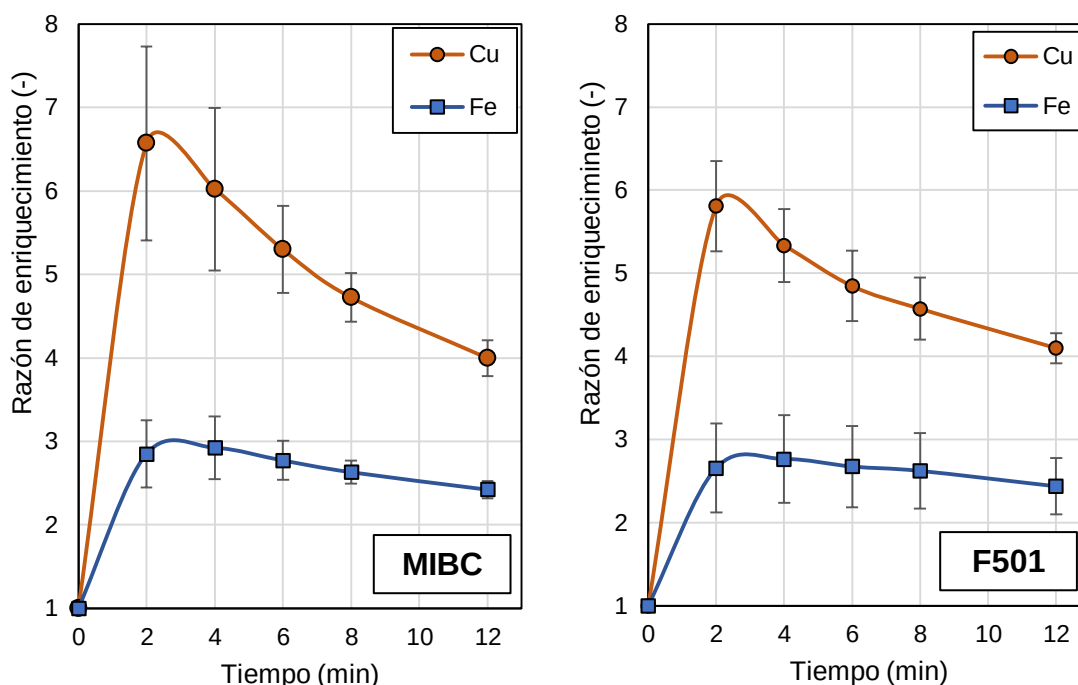


Figura 61. Razón de enriquecimiento para Cu y Fe con pruebas realizadas con MIBC y F501 respectivamente a 10 ppm en triplicado.

Para ambos casos se observa que en los primeros 2 minutos se alcanza la máxima razón de enriquecimiento en cuanto al cobre y fierro, y después esta desciende hasta alcanzar cierta estabilidad después de 12 minutos. Ligeramente para el caso del MIBC se obtiene una razón de enriquecimiento mayor para los primeros minutos, de igual forma ocurre lo mismo para el Fe.

Con respecto a la cinética de flotación, esta se describió mediante el modelo de Klimpel⁵. La importancia de la descripción cinética de los tests de flotación batch es dar cuenta de la velocidad de transferencia del mineral valioso asociado al cobre desde la pulpa hacia el concentrado. En la **Tabla 25** y **Tabla 26** se muestran los valores de los parámetros del modelo de Klimpel (i.e., constante cinética y recuperación a tiempo infinito) de cobre y hierro para ambos espumantes (MIBC y F501) en triplicado.

⁵ Ver modelo cinético de Klimpel en 3.5.2.

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 25. Valores de los parámetros de Klimpel de Cu y Fe con el MIBC.

		MIBC					
		A	B	C	Prom.	Desv.	DER (%)
Cu	Constante cinética (1/min)	1,56	1,22	1,33	1,37	0,17	12,50
	R inf (%)	79,71	83,49	82,56	81,92	1,97	2,40
Fe	Constante cinética (1/min)	0,62	0,46	0,52	0,53	0,08	14,59
	R inf (%)	51,43	54,98	54,14	53,52	1,86	3,47

Tabla 26. Valores de los parámetros de Klimpel de Cu y Fe con el F501.

		F501					
		D	E	F	Prom.	Desv.	DER (%)
Cu	Constante cinética (1/min)	1,27	2,27	1,49	1,68	0,53	31,39
	R inf (%)	83,17	80,83	80,95	81,65	1,32	1,61
Fe	Constante cinética (1/min)	0,73	0,67	0,75	0,72	0,04	5,75
	R inf (%)	53,48	52,54	48,09	51,37	2,88	5,60

Al observar los valores de las constante cinéticas del Cu y Fe fueron mayores cuando se trabajó con F501 (1,68 y 0,72 respectivamente) comparadas con el MIBC (1,37 Cu y 0,53 Fe), estos valores estarían indicando que la transferencia de mineral valioso desde la pulpa hacia el concentrado fue más rápida para el caso del F501. Por otra parte, para el caso del Cu con F501 se reporta una variabilidad cercana al 32%. Variabilidades posiblemente causadas por cómo se operó el test, sin embargo, diferencias significativas entre uno y otro no se ven reflejadas, quizás esto se deba netamente por pertenecer a la misma familia química (i.e., alcoholes). Con respecto a las Recuperaciones a tiempo infinito para el caso del Cu para ambos espumantes se reportan valores cercanos al 82% aprox. con una variabilidad no mayor al 3%, mientras que para el Fe se obtiene un valor de recuperación infinita ligeramente mayor para el MIBC (54% aprox.) que para el F501 (52% aprox.) no obstante la variabilidad obtenida en este apartado es menor para el MIBC (<4%) respecto al F501 (<6%).

La selectividad es otra de las variables que se ve fuertemente afectada por el tipo y la concentración de espumante, en este caso propiamente tal la selectividad entre el Cu y Fe es la más importante de analizar pues bien esta afecta directamente la calidad del

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

concentrado. A continuación, en la **Tabla 27** se muestran los valores calculados de selectividad mediante el método que relaciona la recuperación másica y la recuperación metalúrgica (ver metodología en la sección 2.3.1.2). A su vez en la **Tabla 28** se muestran los promedios y desviaciones estándar referidas al índice de separabilidad antes mencionado.

Tabla 27. Valores de selectividad extraídos del diagrama de separación (recuperación metalúrgica en función de la recuperación en peso).

	R_{Cu} (%)	R_{Fe} (%)	MR (%)	h_{Cu}	h_{Fe}	$S (h_{Cu}/h_{Fe})$
MIBC	77,42	46,58	19,82	40,73	18,92	2,15
	79,37	46,18	19,19	42,55	19,09	2,23
	79,14	47,05	19,90	41,89	19,20	2,18
F501	78,11	47,80	18,70	42,01	20,58	2,04
	76,04	46,15	18,45	40,73	19,59	2,08
	76,31	42,90	19,09	40,46	16,84	2,40

Tabla 28. Medidas de tendencia y variabilidad para los índices de selectividad obtenidos a partir del diagrama de separación.

	Prom.	Desv.	DER (%)
MIBC	2,19	0,04	1,78
F501	2,17	0,20	9,13

Por otro lado, en la **Tabla 29** se muestran valores de selectividad para el MIBC y F501 extraído a partir desde sus constantes cinéticas para las pruebas en triplicado, mientras que en la **Tabla 30** se podrán observar los promedios y desviaciones estándar de los valores antes mencionado.

Tabla 29. Valores de selectividad extraídos a partir de las constantes cinéticas.

		k_{Cu}	k_{Fe}	k_{Cu}/k_{Fe}
MIBC	A	1,56	0,62	2,52
	B	1,22	0,46	2,64
	C	1,33	0,52	2,55
F501	D	1,27	0,73	1,74
	E	2,27	0,67	3,38
	F	1,49	0,75	1,97

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 30. Medidas de tendencia y variabilidad para los índices de selectividad obtenidos a partir de las constantes cinéticas.

	Promedio	Desv.	DER (%)
MIBC	2,57	0,06	2%
F501	2,36	0,89	37%

Para entender los valores es necesario saber que un valor de índice igual a uno indica que no existe separación entre los elementos, por otro lado, mientras más grande sea el valor, es un indicio de que la separación en este caso entre el Cu y el Fe es más fuerte. En este caso para estos triplicados existe una mayor variabilidad para el caso del F501 alcanzando un 9% aproximadamente, sin embargo, estos valores son aceptables en cuanto a la confiabilidad de los resultados. Comparando entre ambos espumantes los valores son muy similares, por lo que se estaría sugiriendo que no existen diferencias significativas entre ambos, una posible causa para esto es que la química de estos agentes es similar (ambos son alcoholes).

Otra forma de observar la selectividad es mediante las curvas de separación graficadas a partir de la recuperación versus la razón de enriquecimiento. En la **Figura 62** se muestran graficados los promedios de la recuperación metalúrgica acumulada en función de la razón de enriquecimiento del Cu para pruebas realizadas con MIBC y F501 en triplicado a 10 ppm.

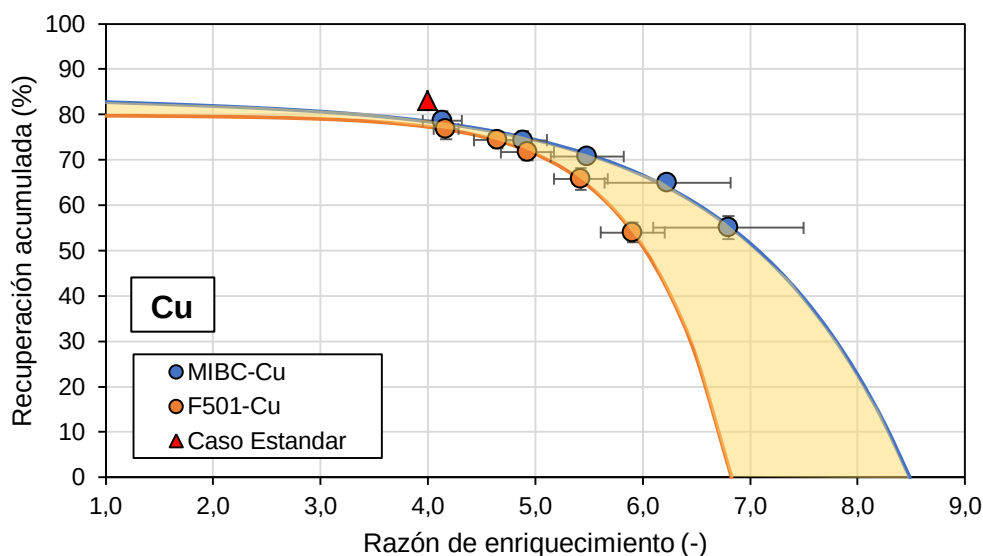


Figura 62. Curva de separación de Cu para las pruebas en triplicado con MIBC y F501 a 10 ppm.

En el eje Y se muestra la recuperación metalúrgica acumulada para ambos espumantes. Las curvas modeladas parten de aproximadamente el mismo número (80%) esto indica que para ambos tests la recuperación máxima que se puede llegar a obtener en condiciones ideales correspondería a este valor. Por otra parte, en el eje X se muestra la razón de enriquecimiento del Cu para ambos espumantes, desde este punto de vista si se observan diferencias puesto que para el caso del MIBC la curva intercepta el eje en 8,5 (-) mientras que el F501 lo hace en 6,8 (-) esto estaría indicando que el MIBC presenta una mayor selectividad frente al F501 pues en casos ideales el concentrado de las pruebas con este espumante estará más enriquecido. Estas diferencias podrían ser atribuidas a la química del reactivo puesto que según los resultados anteriores el MIBC es un espumante que produce un mayor gas holdup y un menor diámetro de burbuja. Cabe destacar, sin embargo, que la diferencia en desempeño de los espumantes también se vio afectada por la forma en que se realizó el test (condiciones batch no totalmente satisfechas). No obstante, está claro que bajo las condiciones a las que se trabajaron los experimentos, estas pruebas generaron información la cual define una banda de desempeño metalúrgico como se destaca en la **Figura 62**. Es importante destacar que estas muestras de mineral estudiadas provienen de una planta concentradora la cual presenta ciertos parámetros como resultado de su operación, por lo tanto, se hace necesario realizar el ejercicio comparando el punto de operación de la planta con los resultados obtenidos. En la figura antes mencionada el marcador rojo indicaría el punto en que trabaja la operación, notar que tiene una alta recuperación (85 % aprox.), sin embargo, la razón de enriquecimiento es baja (4,0 aprox.) por lo tanto al ser un valor relativamente bajo sería un indicativo de que es una etapa selectivamente pobre. Para este escenario se podrían recomendar acciones de mejoramiento, las cuales permitirían acercar el desempeño estándar de la operación al trade-off⁶ de la curva de separación. A continuación, se listan las principales medidas para influenciar desempeño metalúrgico:

- Manipular el flujo de aire.
- Manipular nivel de la pulpa en la celda (i.e., profundidad de espuma).
- Manipular la agitación para observar cambios en la ley final del concentrado.

⁶ Se entiende por trade-off el punto de radio máximo de la curva entre la recuperación metalúrgica y la razón de enriquecimiento.

- Aumentar la adición de espumante, quizás actualmente se trabaja a una dosificación no óptima.
- Cambiar el tipo de espumante a uno que promueva la selectividad evitando el exceso de recuperación de agua, pues es indicativo de un alto entrainment en el proceso.

De igual forma que para el Cu a continuación en la **Figura 63** se muestran las curvas de separación de Fe para las pruebas realizadas en triplicado con 10 ppm de MIBC y F501.

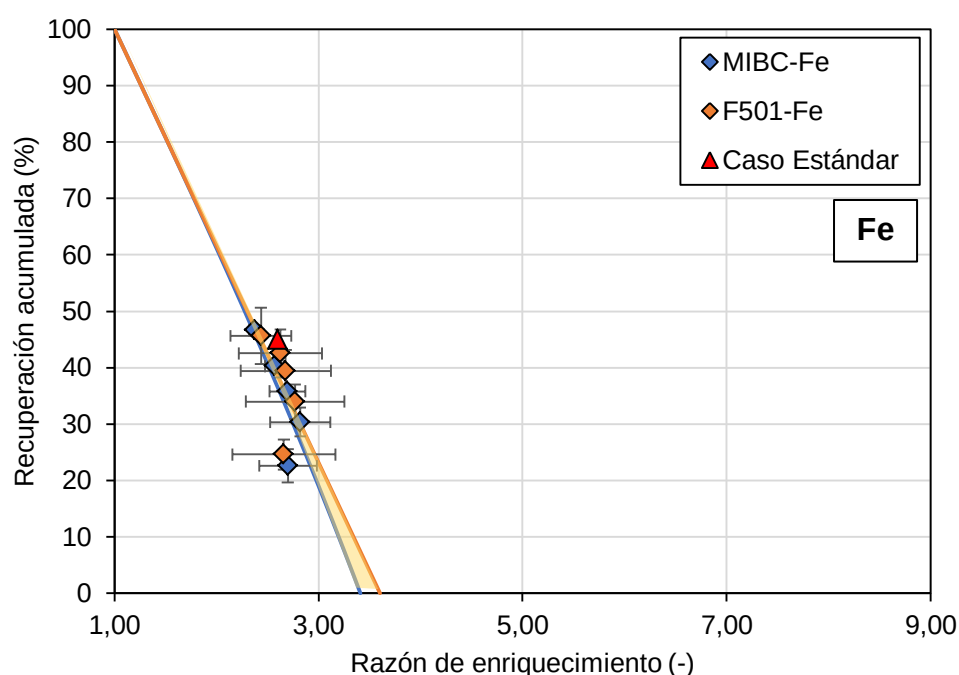


Figura 63. Curva de separación de Fe para las pruebas en triplicado con MIBC y F501 a 10 ppm.

En el eje Y se encuentra graficada la recuperación máxima que se podría alcanzar en casos ideales la cual parte desde 100% por condiciones impuestas en el modelamiento pues la recuperación no puede ser mayor a este valor. En el eje X se observa la razón de enriquecimiento del Fe, en los concentrados de Cu lo que se busca es que estos valores sean menores o bajos puesto que sería indicativo de un proceso más selectivo, para este caso se ve que el F501 en condiciones ideales alcanzaría una leve mayor razón de enriquecimiento que el MIBC, sin embargo al ser valores muy cercanos se podría inferir que no existen diferencias significativas en cuanto a las curvas de

separación del Fe. De igual manera que el caso anterior se presenta la condición estándar graficada en la **Figura 63** para ver donde se y entender un poco más el desempeño estándar. Se observa que el punto de operación para el caso del Fe se encuentra justo en la banda de error, por ende, estos dos espumante no aportan en la calidad del concentrado estándar (reducción de la razón de enriquecimiento del Fe) ni tampoco hay un impacto significativo en la recuperación del Fe. A continuación, en la **Tabla 31** se muestran los parámetros obtenidos al modelar las curvas de separación para el MIBC y F501.

Tabla 31. Parámetros obtenidos a partir de modelar las curvas de separación para el MIBC y F501.

	MIBC (Cu)	MIBC (Fe)	F501 (Cu)	F501 (Fe)
R*	83	100	80	100
b	0,656	0,289	1,230	0,003
Gamma	8,486	3,410	6,827	3,602

Como se mencionó los parámetros de las curvas de separación para el caso del Fe fueron similares (no existen diferencias significativas) sin embargo, las curvas de separación para el caso del Cu si presentan diferencias siendo la del MIBC la que presenta mejores resultados de selectividad y así lo muestran sus parámetros puesto que, el MIBC en condiciones ideales podría generar una recuperación del 83% con una calidad de concentrado 8,4 veces la ley de alimentación, mientras que el F501 como máximo podría generar una recuperación del 80% enriqueciendo 6,8 veces su ley de alimentación.

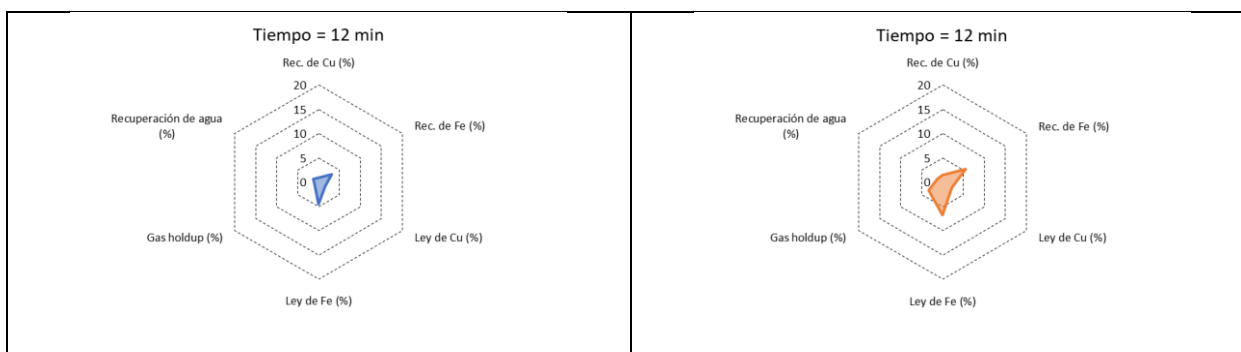
A modo de conclusión en la sección se analizaron experimentos realizados en triplicado para determinar la precisión de la medición evaluando las métricas asociadas al aire (gas holdup y diámetro de burbuja) y las asociadas al desempeño metalúrgico (recuperación, ley, constante cinética y selectividad). Como resultado concreto de todo esto es el poder observar las variabilidades existentes para cada medición. A continuación, en la **Tabla 32** se presentan las desviaciones estándar relativas obtenidas para cada variable tanto para MIBC como F501 respectivamente de forma diagramática.

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 32. Comparación entre los errores experimentales por variable medida y para cada tiempo. Estos se obtuvieron a partir de las pruebas en triplicado realizadas con MIBC y F501.



METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN



En la **Tabla 32** se observan diagramas radiales (hexágonos) que consideran en sus vértices seis resultados de desviaciones estándares asociadas al desempeño en flotación para los dos espumantes estudiados (MIBC y F501). Las variables de desempeño metalúrgico consideradas fueron recuperación de cobre, recuperación de hierro, ley de cobre, ley de hierro, gas holdup y recuperación de agua. La escala de las desviaciones estándares determinadas oscilan entre 0 y 20%. El beneficio de estos diagramas radiales permite visualizar áreas que se generan de la incertidumbre asociadas al desempeño metalúrgico.

Al observar los gráficos anteriores no se logran apreciar grandes diferencias significativas entre un espumante y otro. Cabe mencionar que en los intervalos de 6 a 8 minutos se manifestaron las mayores variabilidades (observar la extensión de las áreas generadas), las cuales fueron causadas por la inyección de aire, pues esta fue variando durante el test. Esto provocó un impacto mayor en las desviaciones asociadas a la recuperación de cobre, la ley de cobre, la recuperación de hierro y de agua, alcanzando valores cercanos al 20% en algunos casos. Sin embargo, el resto de los errores mostrados de forma discreta no reportan errores mayores al 10%, por lo que supone que dentro de todos los errores experimentales (flotación alejada de los parámetros de condición batch) y la baja sofisticación en el instrumento de medición de las métricas del aire se obtuvo como resultado una variabilidad aceptable. Por último, en base a este análisis se concluye que en términos prácticos el efecto de los espumantes en términos del desempeño metalúrgico fue similar. Sin embargo, cabe destacar desde un punto de vista cinético y de separabilidad el espumante MIBC generó un leve mejor desempeño.

En la sección **4.3** se abordará la validación del método de medición de gas holdup (concentración de aire) el cual permite inferir el diámetro de burbuja. Esto se llevará a cabo realizando una comparación con un método directo de medición de diámetro de burbuja.

4.3. Validación del método de medición de gas holdup.

Para agregar robustez a las estimaciones de diámetro de burbuja a partir del gas holdup y la velocidad superficial, se realizó una comparación con un método directo de obtención de diámetros de burbuja, en base a un estudio realizado por Tucker (1994) [47] en el cual utilizando un instrumento que tomaba muestras filtradas a partir de una pulpa, la cual era llevada hasta un capilar de diámetro conocido, permitía conocer el diámetro de burbuja a partir del número de burbujas dibujadas en el capilar. Las condiciones con las que trabajo el autor en su publicación se muestran en la **Tabla 33** junto a las condiciones de pruebas preliminares que se realizaron para este proyecto de memoria.

Tabla 33. Condiciones del experimento realizado por Tucker y del experimento ejecutado en esta memoria.

	The UCT Bubble Size Analyzer	Ejecutado en este documento
Flujo de aire	6 L/min	6 L/min
velocidad de agitación	1200 rpm	1200 rpm
Espumante	MIBC	MIBC
Concentración ($\mu\text{L/L}$)	0, 5, 10, 15, 20 ppm	0, 5, 10, 15, 20 ppm
Sólidos	0%	0%
Volumen de celda	3 litros	3 litros
Modelo de máquina de Flotación	Desconocida	Denver D12

Como las condiciones fueron similares en ambos experimentos, se realizó una comparación de ambos métodos con la finalidad de encontrar si existen diferencias significativas entre utilizar el método propuesto por Tucker y el método que se propone en este documento. La **Figura 64** presenta un diagrama que correlaciona el diámetro de burbuja medido experimentalmente en función de la concentración de espumante. Los diámetros de burbuja graficados en esta figura se determinaron usando dos metodologías diferentes; (1) UCT bubble size analizar, y (2) Método ejecutado en esta memoria. Se observa que las metodologías (1) y (2) generaron resultados muy

comparables que están dentro de los límites de ruido experimental superior e inferior como lo indican las curvas graficadas en línea segmentada. Los resultados graficados en la **Figura 64** permiten concluir que el método ejecutado y utilizado en este proyecto de memoria proporciona información confiable dentro de las condiciones de borde de la medición de laboratorio. Por último, la **Figura 64** indica que ambas metodologías tienden a un valor asintótico de tamaño de burbuja en función de la concentración de espumante (aproximadamente 15 ppm).

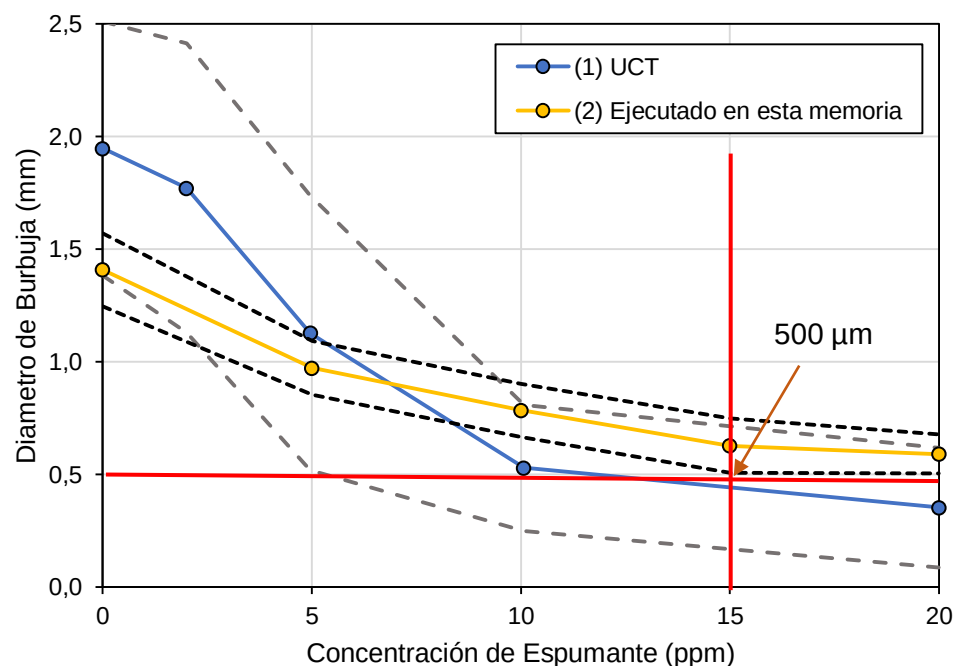


Figura 64. Curvas de diámetro de burbuja versus concentración de espumante, la curva azul corresponde a las mediciones realizadas por Tucker mientras que la curva amarilla corresponde a la estimación del tamaño de burbuja usando la metodología ejecutada en esta memoria.

Las líneas segmentadas muestran los intervalos de confianza al 95% de cada set de mediciones. Es posible notar que las bandas de error se traslapan lo que estaría indicando que no existen diferencias significativas si se trata de estimar mediante gas holdup y velocidad superficial de gas que medir directamente por el método de Tucker.

Otra forma de corroborar si es que existen o no diferencias significativas entre un método y otro es aplicando un test de hipótesis de las varianzas. Las hipótesis nula y alternativa planteadas para el test de Fisher se muestran en la **Ecuación 52** y **Ecuación 53** respectivamente.

$$H_0: \frac{S_A^2}{S_B^2} = 1 \quad \text{Ecuación 52}$$

$$H_1: \frac{S_A^2}{S_B^2} \neq 1 \quad \text{Ecuación 53}$$

La prueba necesita como datos calcular las varianzas muestrales para cada tratamiento y los grados de libertad. En la **Tabla 34** se muestran estos valores.

Tabla 34. Datos y valores para la realización del test de varianzas entre el método de Tucker y el método ejecutado en esta memoria.

Tucker		Estimado	
Concentración de espumante [ppm]	Diámetro de burbuja [mm]	Concentración de espumante [ppm]	Diámetro de burbuja [mm]
0	1,95	0	1,41
2	1,77	5	0,97
5	1,13	10	0,79
10	0,53	15	0,63
20	0,35	20	0,59

	Tucker	Estimado
Varianza	0,511	0,111
Grados de libertad	4	4

Con esta información es posible entrar a la distribución de Fisher puesto que es necesario encontrar los valores de los límites cuando se trabaja a un 95% de confianza y con los grados de libertad que se tienen. De la tabla de valores críticos de la distribución F de Fisher se obtuvieron los límites que se encuentran dibujados en la **Figura 65**.

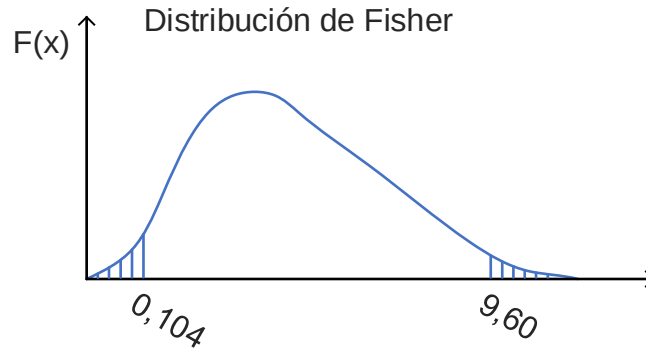


Figura 65. Distribución F de Fisher con los valores críticos a un intervalo de confianza al 95% y con los grados de libertad de ambos tratamientos (4 y 4).

Como paso seguido es calcular la razón entre las varianzas muestrales de ambos métodos y observar si es que esta se encuentra dentro o fuera de los intervalos antes mencionados y de esta forma poder aceptar o refutar la hipótesis nula. La **Ecuación 54** muestra la operación antes mencionada.

$$\frac{S_A^2}{S_B^2} = \frac{0,511}{0,111} = 4,60$$

Ecuación 54

Es evidente que el valor calculado cae dentro de los límites obtenidos a partir de la distribución F, por lo tanto, se puede inferir con un 95% de certeza que las varianzas entre el método aplicado por Tucker y la metodología ejecutada en esta memoria son iguales.

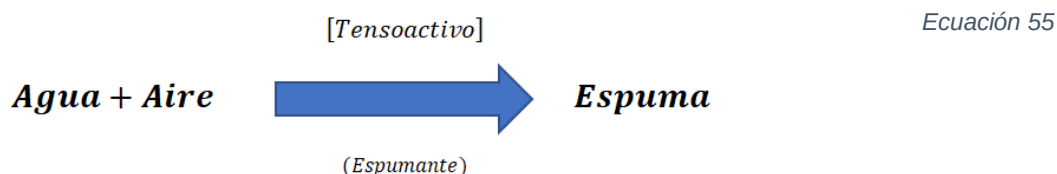
Con esta información adicional se estaría corroborando que no existen diferencias en cuanto a resultados obtenidos entre medir con el método de Tucker y el método ejecutado en esta memoria. Por lo tanto, el realizar mediciones de gas holdup y estimaciones de diámetro de burbuja no están alejadas de valores reales, además se pudo evidenciar el efecto del diámetro de burbuja cuando se trabaja concentraciones mayores de espumante lo cual guía en dirección correcta la hipótesis propuesta.

Realizar este estudio respecto a la repetitividad de la metodología propuesta entrega mayor robustez y credibilidad acerca de las mediciones y/o resultados que se obtuvieron de este proyecto.

En la sección 4.4 se tratarán los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas en sistema bifásico.

4.4. Mediciones en sistema bifásico

El sistema bifásico (i.e., agua más aire) resulta ser un escenario ideal para estimar y medir las métricas relacionadas al aire, puesto que al agregar sólidos el escenario de medición se complejiza más. Las pruebas realizadas en este sistema se llevaron a cabo con la finalidad de tener una primera aproximación de las mediciones y consistieron en pruebas de espumación (**ver procedimiento en la sección 3.2.3**), es decir no existió recuperación de ningún tipo de líquido y solo se fue cambiando el flujo de gas, para poder observar el efecto de esta variable sobre el gas holdup (%) y a su vez sobre el diámetro de burbuja (μm).



El diámetro de burbuja corresponde a una medida estimada en la presente memoria para ello se tomaron supuestos los cuales provienen específicamente del flujo de área superficial de gas (S_b). La **Figura 66** ilustra algunos conceptos relacionados con la métrica del aire.

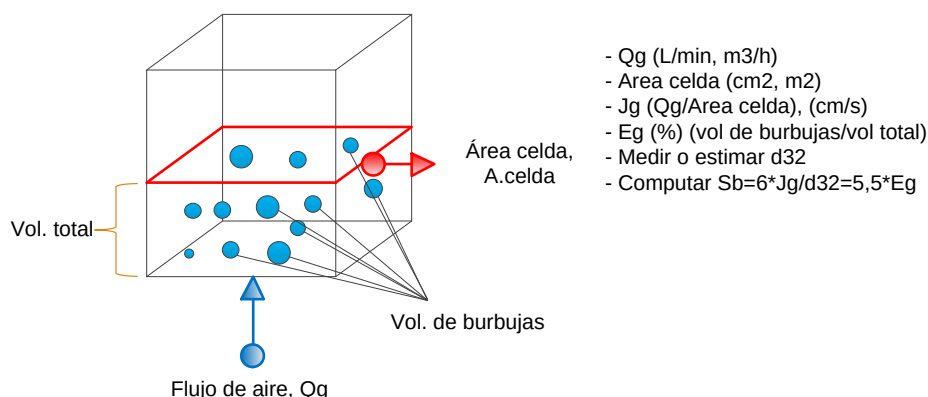


Figura 66. Ilustración de una celda de flotación identificando conceptos fundamentales de la métrica del aire.

En la **Figura 66** se observa una celda de flotación en donde se visualiza la inyección de aire por la parte inferior (Q_g) la cual es capaz de generar burbujas. Al dividir este caudal de gas por el área de la celda se obtiene la velocidad superficial de gas y de esta forma lo indica la **Ecuación 56**.

$$J_g = \frac{Q_g}{A_{celda}} \quad \text{Ecuación 56}$$

Esta velocidad superficial de gas se reporta comúnmente cm/s. El volumen de burbujas generado por la inyección de aire permite estimar la concentración de aire contenido en un volumen específico, es decir gas holdup (%). La **Ecuación 57** muestra esta relación

$$\varepsilon_g(\%) = \frac{\text{Volumen de burbujas} * 100}{\text{Volumen total}} \quad \text{Ecuación 57}$$

Específicamente en la presenta memoria se utilizó la conductividad eléctrica (**ver ecuación de Maxwell en la sección 2.3.2.3**) para estimar la métrica antes mencionada, pero físicamente representa el volumen de burbujas contenido en un volumen determinado. Por otro lado, al dividir el J_g por el gas holdup obtenido es posible obtener la velocidad de ascenso de las burbujas.

$$U_g = \frac{J_g}{\varepsilon_g} \quad \text{Ecuación 58}$$

También expresada comúnmente en cm/s. Para encontrar el valor de S_b es necesario conocer los valores de diámetros de las burbujas generadas en el sistema para ello existen diferentes métodos que permiten la obtención de dichos valores.

Las medidas que definen el área y el volumen de las burbujas son esenciales para calcular el S_b , en la **Ecuación 59** y **Ecuación 60** se muestran los cálculos de área y volumen de burbuja respectivamente.

$$A_b = \pi * d_b^2 \quad \text{Ecuación 59}$$

$$V_b = \pi * \frac{d_b^3}{6} \quad \text{Ecuación 60}$$

Donde db corresponde al diámetro de burbuja promedio.

Por otro lado, el número de burbujas por unidad de tiempo viene dado por la **Ecuación 61**.

$$n = \frac{Q_g}{\pi * \frac{d_b^3}{6}} \quad \text{Ecuación 61}$$

Donde Q_g corresponde al flujo de gas inyectado. El S_b se define como la velocidad de la superficie de las burbujas elevándose a través de la celda por unidad de área transversal definida por la **Ecuación 62**.

$$S_b = n * \frac{A_b}{A_{celda}} = \frac{Q_g}{\pi * \frac{d_b^3}{6}} * \frac{\pi * d_b^2}{A_{celda}} \quad \text{Ecuación 62}$$

Reduciendo esta expresión finalmente queda como lo muestra la **Ecuación 63**.

$$S_b = \frac{6 * J_g}{d_b} \quad \text{Ecuación 63}$$

Finalmente, como se mencionó anteriormente el diámetro no se midió directamente, pero si es posible inferirlo si se conoce la relación empírica mostrada en la **Ecuación 64**.

$$S_b = 5,5 * \varepsilon_g \quad \text{Ecuación 64}$$

Al igualar la **Ecuación 63** y **Ecuación 64** se obtiene la **Ecuación 65**.

$$5,5 * \varepsilon_g = \frac{6 * J_g}{d_b} \quad \text{Ecuación 65}$$

De esta manera se pudo estimar el diámetro promedio de las burbujas para estas pruebas, puesto que el gas holdup y la velocidad superficial de gas fueron variables que se midieron durante los experimentos.

Por otra parte, el diámetro Sauter (d_{32}) es otra forma de caracterizar el tamaño de las burbujas. Este se calcula por medio del volumen total de burbujas en la pulpa dividido por el área total de estas. La relación útil para calcular el d_{32} se muestra en la **Ecuación 66**.

$$d_{32} = \frac{\text{Volumen total de burbujas}}{\text{Área total de burbujas}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad \text{Ecuación 66}$$

No obstante estimarlo se hace imposible puesto que este proviene directamente de una distribución de tamaños de burbujas.

Vinnett (2014) publicó un artículo en donde aplicando un modelo fue posible obtener una relación entre el diámetro de Sauter (d_{32} , mm) y la velocidad superficial de gas (J_g , cm/s), a partir de un set de datos obtenidos a nivel industrial. En la **Figura 67** se presentan los datos medidos a nivel industrial. Estos datos se despliegan en la gráfica definiendo una banda que captura la variabilidad de los posibles tamaños de burbuja a obtener en las condiciones de operación de los respectivos sistemas estudiados. Notar que los datos experimentales se utilizaron para derivar un modelo empírico que dé cuenta de la relación que existe entre el tamaño de la burbuja y J_g .

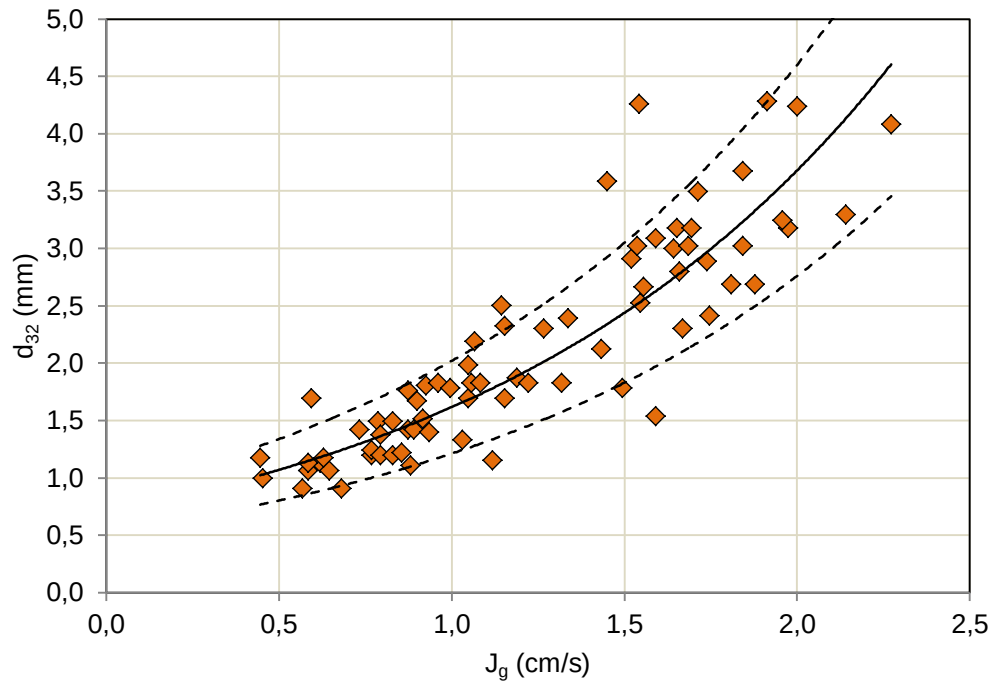


Figura 67. Diámetro de burbuja Sauter en función de la velocidad superficial de gas (adaptado de Vinnett 2014).

En otras palabras, a medida que los valores de J_g aumentan también lo hacen los diámetros de burbuja de una forma exponencial. El modelo ajustado fue el que se muestra en la **Ecuación 67**.

$$d_{32} = d_0 * e^{\gamma * J_g} \quad \text{Ecuación 67}$$

Este modelo tiene dos parámetros: d_0 y gamma (γ). El valor de d_0 corresponde al intercepto de la curva obtenida con el modelo empírico con el eje Y. Para los valores ajustados anteriormente se obtuvo como parámetro $d_0 = 0,77$ mm y un valor de $\gamma = 0,77$ s/cm. Los autores de este artículo hicieron mención a la propagación de error sobre los parámetros obtenidos. Es importante destacar que la aplicabilidad de este modelo empírico es solo válida para el rango y las condiciones de medición operantes durante el levantamiento de los datos. No obstante, la relación analítica entre el tamaño de burbuja y J_g propuesta por estos autores tiene sin duda una utilidad práctica, i.e., inferir el diámetro de la burbuja a partir de la variable operacional J_g .

Según los datos obtenidos a partir de esta memoria sería posible replicar y ajustar un modelo de las mismas características mostradas anteriormente. En la **Figura 68** se muestra un gráfico con los diámetros estimados en este trabajo para pruebas de espumación en sistema bifásico a nivel batch en función de la velocidad superficial de aire. Se observa que los datos también definen una banda la cual el error experimental del procedimiento de laboratorio. De la misma forma a como lo realizaron los autores (Vinnett et. al. [57]) los datos experimentales se utilizaron para derivar un modelo empírico que diera cuenta la relación que existe entre el tamaño de la burbuja promedio y J_g .

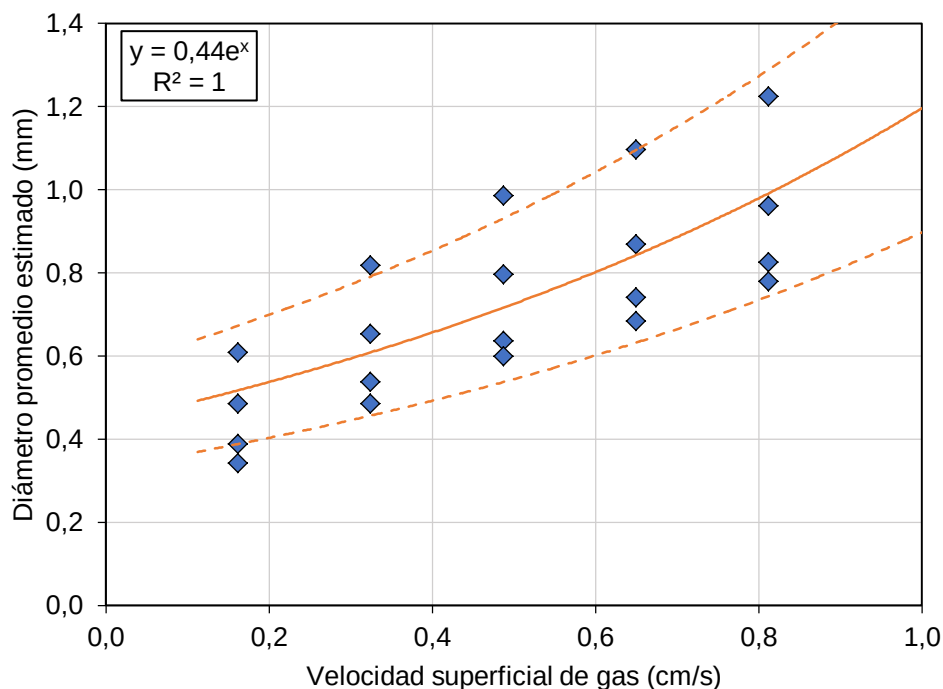


Figura 68. Diámetro de burbuja promedio estimado para pruebas de espumación en función de la velocidad superficial de gas.

En el gráfico también se observó una tendencia exponencial de diámetro de burbuja con respecto a los valores de velocidad superficial de gas. Los parámetros del modelo se obtuvieron a través de una regresión no lineal de los datos (herramienta Solver de Excel). Los valores obtenidos fueron de 0,44 para d_0 y de 1 para γ . Al comparar los valores de los parámetros del modelo con los reportados por Vinnett (2014) [57] se observa que el valor de d_0 es menor para la situación de laboratorio. Por otro lado, el valor de γ es un poco mayor en laboratorio. Estas diferencias se deben a los tipos de sistemas donde se obtuvieron los datos experimentales (i.e., operación industrial continua versus celda de laboratorio batch).

En las primeras pruebas se testearon 4 espumantes (MIBC, F501, F549 y F507) cada uno de estos son provenientes de distintas familias químicas (alcohol, mezcla de alcohol, éter de glicol y poliglicol puro). Se midió la conductividad eléctrica de las soluciones a los diferentes espumantes utilizados al inyectar aire a la celda flotación. Estas mediciones se realizaron a cuatro diferentes concentraciones (5 ppm, 10 ppm, 15 ppm y 20 ppm) para evaluar efecto sobre la concentración de aire alcanzada. A continuación, en la **Figura 69** y **Figura 70** se muestran los resultados de gas holdup

(ε_g , %) en función de la velocidad superficial de gas (J_g^7 , cm/s). Estas curvas se encuentran ordenadas según el tipo de espumante utilizado.

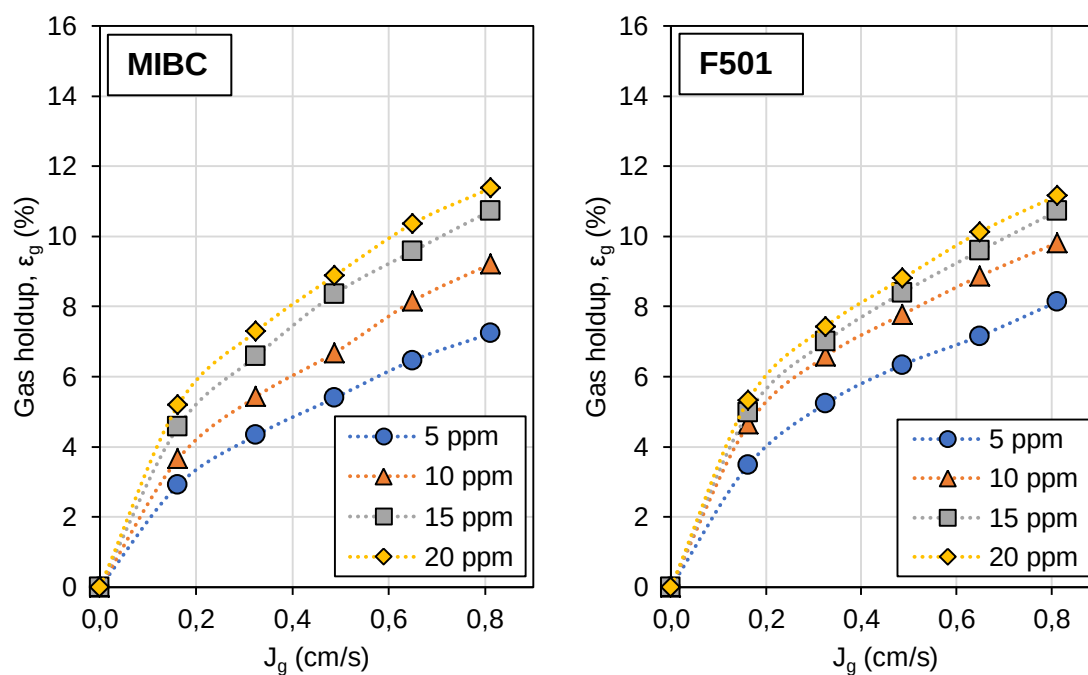


Figura 69. Curvas de ε_g versus J_g para MIBC (izquierda) y F501 (derecha) a distintas concentraciones (5, 10, 15 y 20 ppm).

⁷ J_g igual a caudal de aire dividido por el área trasversal de la celda.

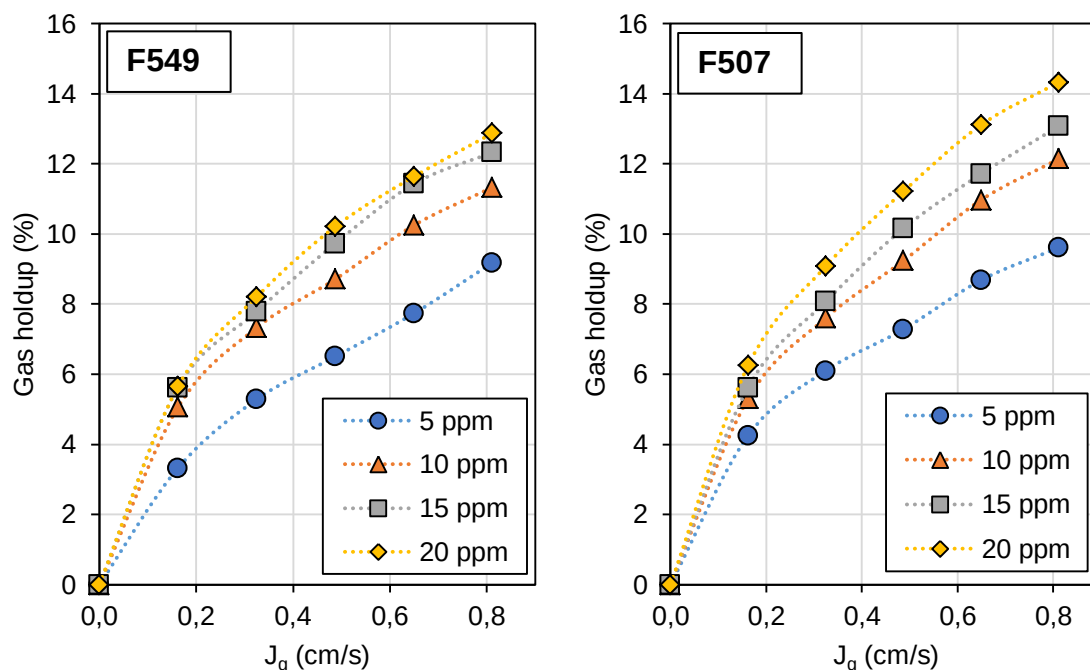


Figura 70. Curvas de ε_g versus J_g para F549 (izquierda) y F507 (derecha) a distintas concentraciones (5, 10, 15 y 20 ppm).

Se evidencia que a medida que aumenta la inyección del flujo de gas en la celda de flotación, el gas holdup aumenta para todas las pruebas realizadas. Por otra parte, cuando se trabaja a un flujo de aire fijo, el gas holdup aumenta para todos los espumantes.

Un mayor flujo de aire en el sistema provoca un aumento en el número de burbujas, por lo tanto, implica que una mayor cantidad de aire reside en la zona de colección.

Cuando se trabaja a mayores concentraciones de espumante se produce una disminución en la tensión superficial, traduciéndose en una disminución del diámetro de burbuja. Entonces para una misma velocidad superficial de gas (i.e., flujo de aire constante) se tendrá como resultado un mayor número de burbujas de menor tamaño en el sistema, una de las cualidades que presentan las burbujas pequeñas es que tienen velocidades de ascenso menores, por ende, residen un mayor tiempo en la zona de colección traduciéndose en un aumento del gas holdup.

En la **Figura 71** y **Figura 72** se muestran las mismas curvas de gas holdup en función de la velocidad superficial de gas mostradas anteriormente, pero ordenadas por la

concentración de espumante utilizada en los experimentos. En la **Figura 71** se muestran graficadas los resultados realizados a 5 ppm (imagen izquierda) y 10 ppm (imagen derecha), mientras que en la **Figura 72** se encuentran los resultados de las pruebas para 15 ppm (imagen izquierda) y 20 ppm (imagen derecha).

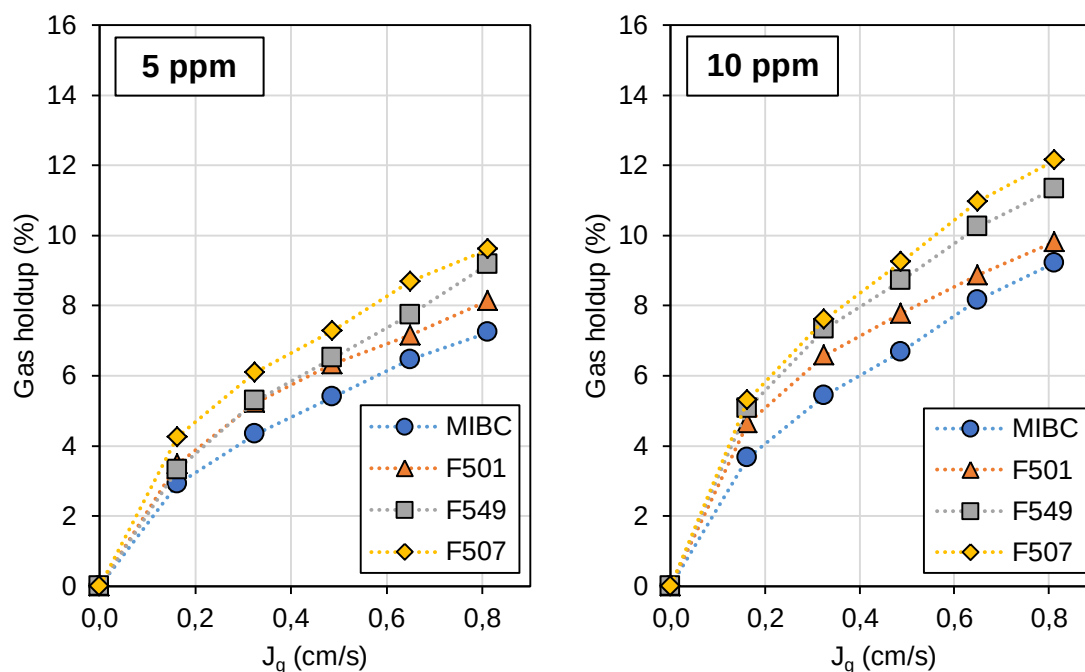


Figura 71. Curvas de ε_g versus J_g a 5 ppm (izquierda) y 10 ppm (derecha) para los distintos tipos de espumantes.

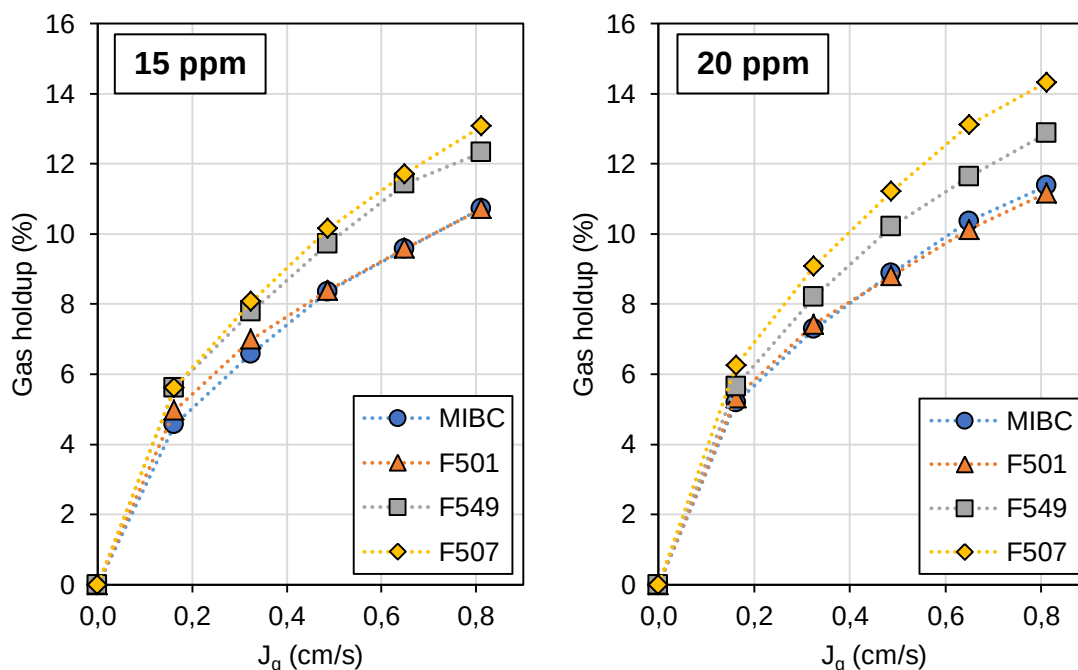


Figura 72. Curvas de ε_g versus J_g a 15 ppm (izquierda) y 20 ppm (derecha) para los distintos tipos de espumantes.

A partir de estas figuras se logra evidenciar la relevancia de las familias químicas en cuanto a la generación de gas holdup. En las cuatro imágenes (5, 10, 15 y 20 ppm) se evidencia que el F507 muestra mayores resultados de gas holdup, seguido por F549, F501 y finalmente el MIBC. Esto se podría deber principalmente a que los dos primeros espumantes (F507 y F549) corresponden a poliglicoles, mientras que los últimos dos (F501 y MIBC) son alcoholes. En capítulos anteriores (**ver sección 2.3**) se mencionó que los poliglicoles tienen la capacidad de generar una capa de agua más gruesa que los alcoholes, de cierta forma esta capa podría ayudar a preservar un mayor tiempo el tamaño de las burbujas, retardándose de esta forma el fenómeno de coalescencia [19].

A partir de los datos de gas holdup obtenidos mediante conductividad eléctrica y la velocidad superficial de gas utilizada en las pruebas, se estimaron los diámetros de burbujas (**ver cálculos en sección 3.3.2**) para las pruebas realizadas anteriormente y los resultados se muestran a continuación. En la **Figura 73** y **Figura 74**, se encuentran graficados los valores de diámetros de burbuja estimados en función de la concentración de espumante para diferentes flujos de aire y para cada uno de los espumantes utilizados.

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

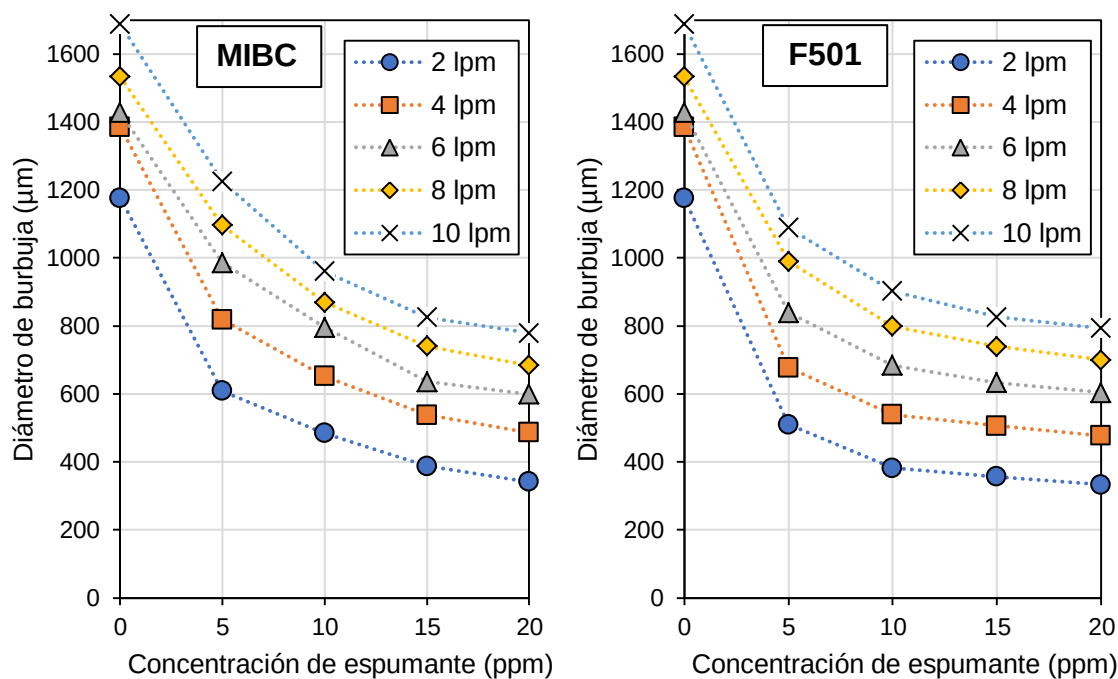


Figura 73. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante para MIBC (Izquierda) y F501 (derecha).

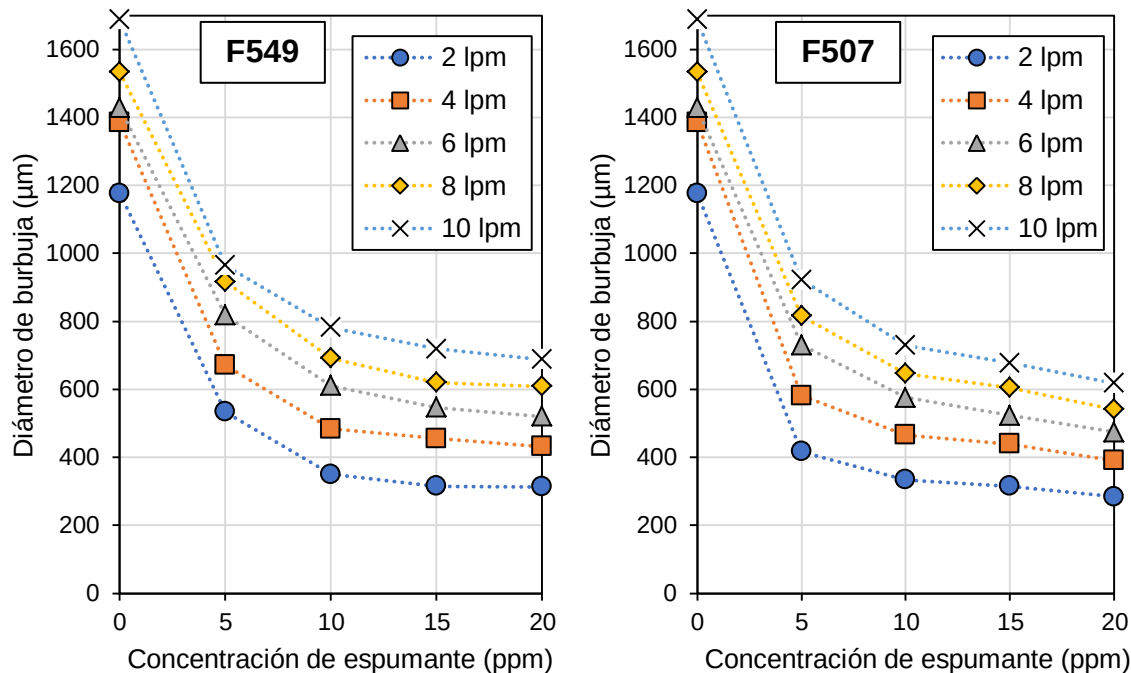


Figura 74. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante para F549 (Izquierda) y F507 (derecha).

Observando las imágenes se hace evidente el efecto de los espumantes sobre el diámetro de burbuja, y como se comentó a principio de este proyecto, los espumantes reducen la tensión superficial evitando que las burbujas coalezcan, por lo tanto, estas a mayores concentraciones de espumantes, su tamaño original prevalece por un mayor tiempo. Por otra parte, se observa también que, para una misma concentración de espumante, el diámetro de burbuja aumenta a medida que el flujo de aire es mayor, una posible causa es el hecho de que, a un mayor flujo de aire, la cantidad de burbujas aumenta en el sistema haciendo que se necesite una mayor cantidad de espumante para producir el efecto anticoalescente.

A continuación, se presenta la misma información, es decir los valores obtenidos de diámetros de burbuja en función de la concentración de espumantes para las distintas familias químicas de espumantes vistas en esta memoria a un flujo de aire fijo. En este caso solo se mostrará el grafico a 6 [L/min], puesto que los otros (a 2, 4, 8 y 10 [L/min]) muestran la misma tendencia y se encuentran en los apéndices de este proyecto. Como bien se mencionó, la **Figura 75** muestra el diámetro de burbuja obtenido en función de la concentración para diferentes espumantes a un flujo de 6 [L/min].

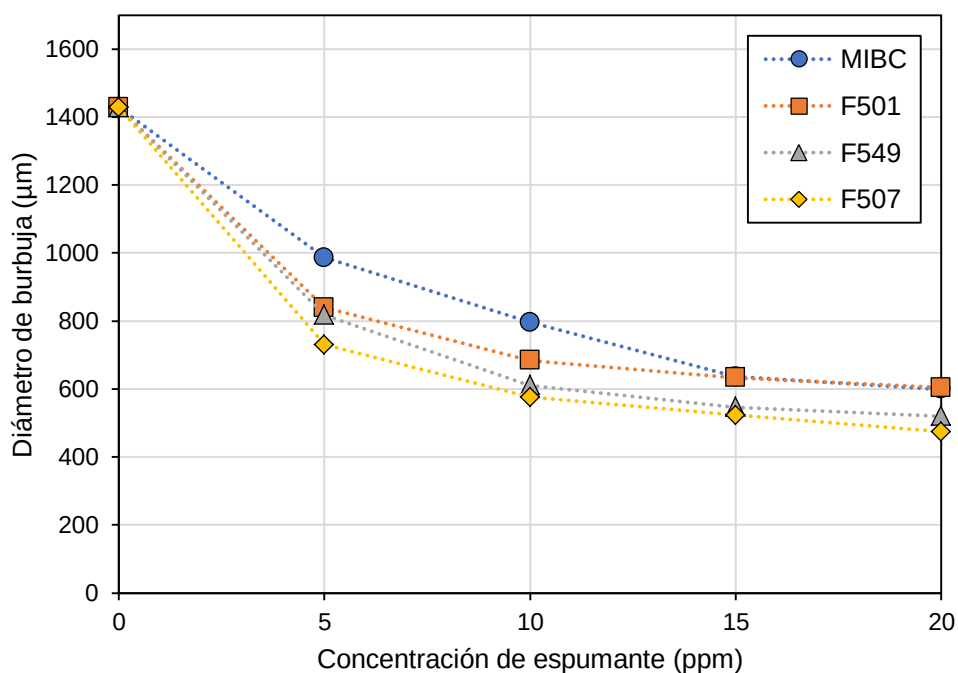


Figura 75. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fija (6 [L/min]).

Se logra observar que como se predijo anteriormente, el diámetro de burbujas depende del tipo de espumante (familia química del espumante) utilizados. Los alcoholes (MIBC y F501) generan mayores diámetros de burbuja, mientras que los poliglicoles (F549 y F507) generan diámetros menores. Como se mencionó, este efecto podría ser causado por la capa de agua más gruesa que producen los poliglicoles al ser moléculas más grandes que los alcoholes, por ende, retardarían la coalescencia de manera más fuerte.

El hecho de medir el gas holdup en sistema bifásico es lo que comúnmente se hace en los ensayos de laboratorios y es lo que se reporta en publicaciones de revistas científicas [41] [49] [46], pero la realidad es que se debiese incluir mediciones en sistema trifásico, puesto que se asemeja más a la realidad de las plantas de flotación industrial.

Se realizó una prueba para observar las diferencias entre el sistema bifásico y trifásico, en cuanto a las métricas de gas holdup en función del flujo de aire inyectado, los resultados se muestran en la **Figura 76**. Cabe mencionar que estas pruebas correspondieron a pruebas de espumación para observar solo el cambio de gas holdup.

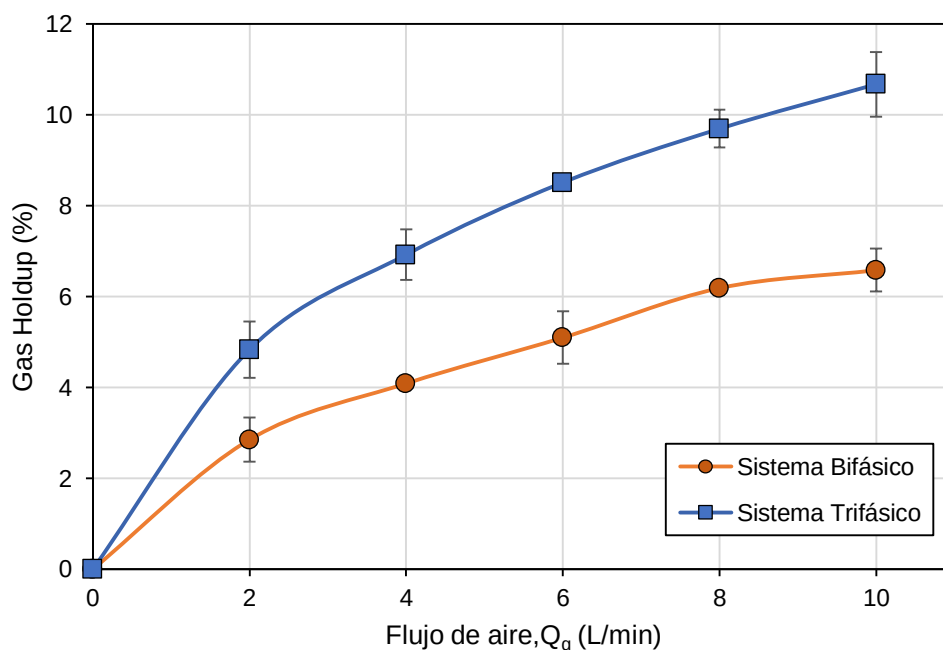


Figura 76. Diferencia entre el gas holdup medido en sistema bifásico y trifásico con 8 ppm de MIBC.

Se han graficado los resultados de dos pruebas realizadas en triplicados a una misma concentración de MIBC con sus respectivos intervalos de confianza al 95% una en sistema bifásico y otra en sistema trifásico en la cual se puede evidenciar diferencias significativas en los valores de gas holdup obtenidos entre un sistema y otro. Se hace notar el efecto positivo del sólido sobre el gas holdup y tiene bastante sentido pensar en un resultado así pues los sólidos retienen en la zona de colección las burbujas por una mayor cantidad de tiempo y, por otra parte, las burbujas mineralizadas poseen una velocidad de ascenso menor que las burbujas formadas en un sistema bifásico.

En la sección 4.5 se abordará más a fondo el efecto del sólido sobre las métricas de aire y también el efecto de estas métricas sobre las respuestas de desempeño metalúrgico.

4.5. Relación en el sistema trifásico (metalurgia y métrica del aire)

Se pudo observar que el gas holdup se ve fuertemente influenciado por el sólido presente en las pruebas de espumación, por lo tanto, es normal pensar que desde ya no es indiferente el medio (i.e., bifásico o trifásico) en el cual se evalúa el potencial rendimiento de los agentes surfactantes (i.e., espumantes).

A continuación, en la **Figura 77** se muestra un diagrama que ilustra las principales variables afectadas y que podrían depender de las métricas del aire de manera secuencial.

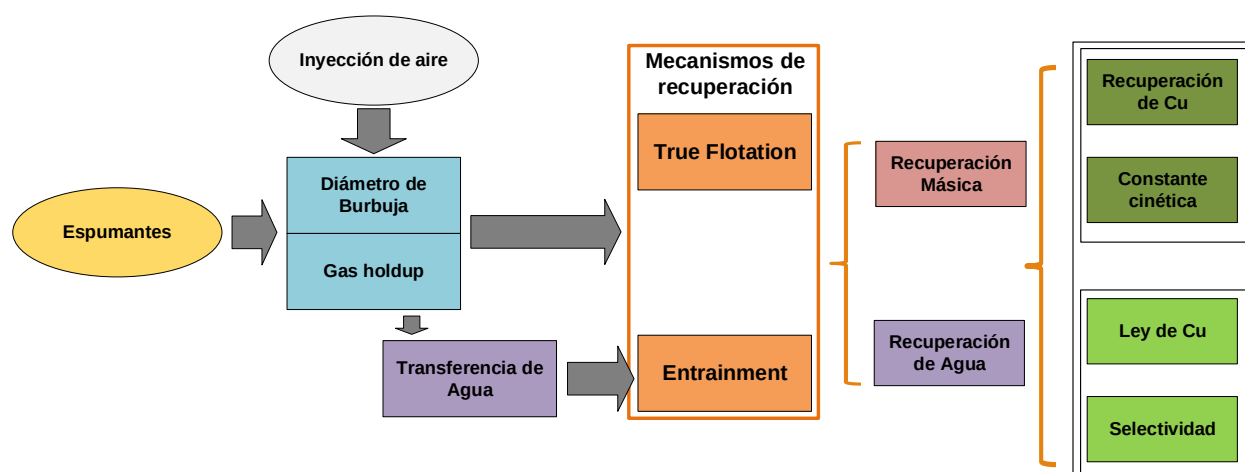


Figura 77. Secuencia y dependencia de las respuestas metalúrgicas en función de la acción de los espumantes.

Como el aire es la fuerza motriz de la flotación, este tendrá un efecto sobre las respuestas del proceso (selectividad, recuperación y ley), y a su vez esta variable se ve fuertemente afectada por el tipo y concentración de espumante según lo planteado en el contexto inicial de este trabajo, por lo tanto, en esta sección se busca finalmente evaluar la hipótesis (i.e., corroborar o refutar).

La secuencia antes mostrada será la forma de abordar los resultados que integran las variables hidrodinámicas con las respuestas del desempeño metalúrgico. Para tales resultados, se realizaron cinéticas de flotación de 12 minutos con mineral sulfurado de una minera del norte del país, para poder comparar el rendimiento con las métricas del aire. A continuación en la **Figura 78** y **Figura 79** se muestran los perfiles de gas holdup en función del tiempo obtenidos para pruebas realizadas en sistema trifásico con 4 tipos de espumantes (MIBC, F501, F549 y F507) a 4 concentraciones diferentes (5, 10, 15 y 20 ppm).

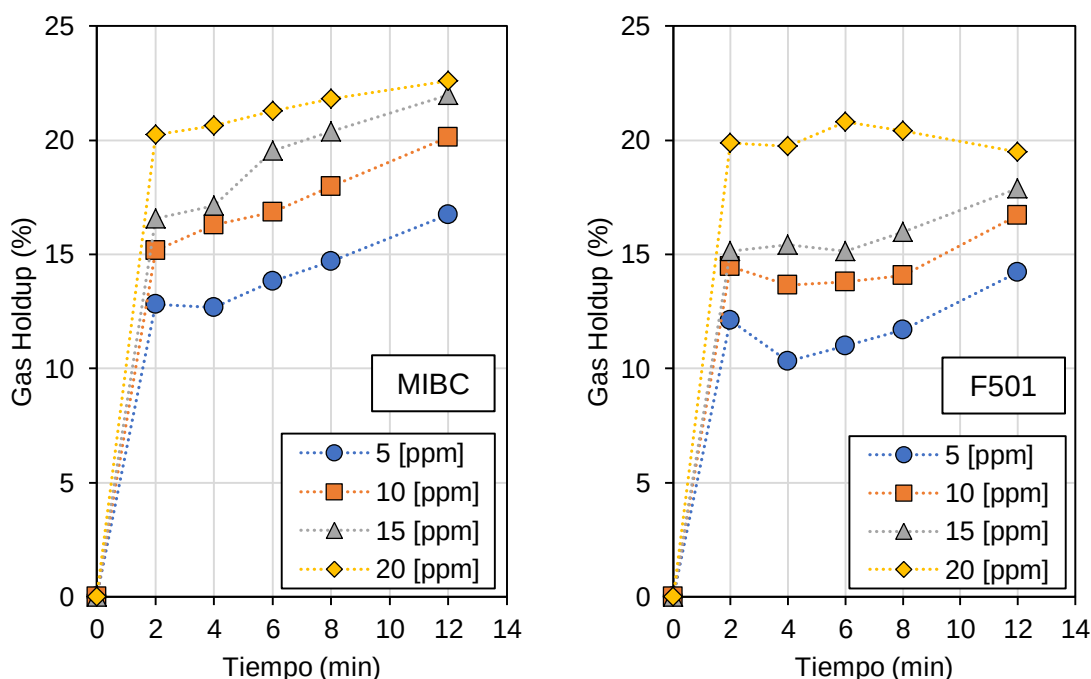


Figura 78. Curvas de gas holdup (ϵ_g) en función del tiempo para MIBC (grafico de la izquierda) y F501 (grafico de la derecha) para pruebas en sistema trifásico.

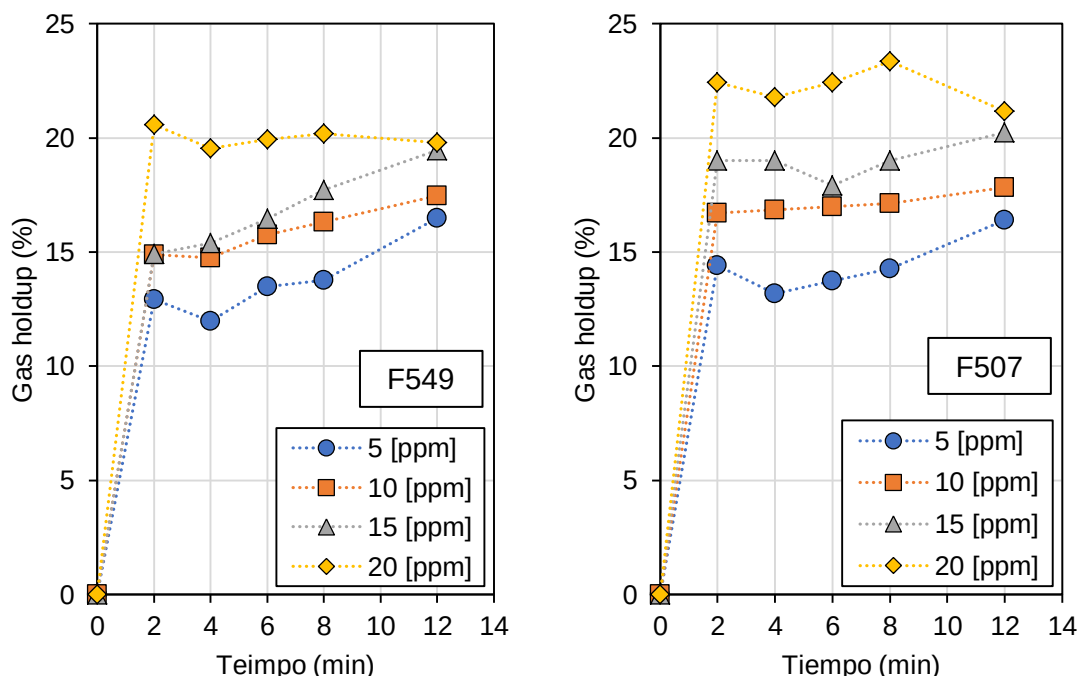


Figura 79. Curvas de gas holdup (ϵ_g) en función del tiempo para F549 (grafico de la izquierda) y F507 (grafico de la derecha) para pruebas en sistema trifásico.

Se observa que la mayoría de los perfiles mostrados anteriormente después de los 2 minutos de flotación, se presenta un comportamiento que va en ascenso el cual fue causado principalmente por el aumento del flujo de aire durante la flotación (minuto 4, 6 y 8). Por otro lado, a medida que aumenta la concentración de espumante, el gas holdup tiende a ser mayor, lo que concuerda con la tendencia observada en sistema bifásico. Una mayor cantidad de espumante disponible en el sistema, preserva las burbujas más pequeñas por un tiempo más prolongado debido a la reducción de la tasa de coalescencia. Esto se traduce en un tiempo de residencia mayor de las burbujas en la pulpa, viz., una mayor concentración de aire.

A continuación, en la **Figura 80** y **Figura 81**, se encuentran graficados los resultados expuestos con anterioridad a diferencia de que se presentan ordenados a una concentración fija y de esta forma observar el comportamiento de la familia de los distintos espumantes estudiados. En la **Figura 80** se muestran los resultados para 5 ppm (grafico izquierdo) y 10 ppm (grafico derecho) mientras que en la **Figura 81** se encuentra graficados los resultados a 15 ppm (grafico izquierdo) y 20 ppm (grafico derecho).

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

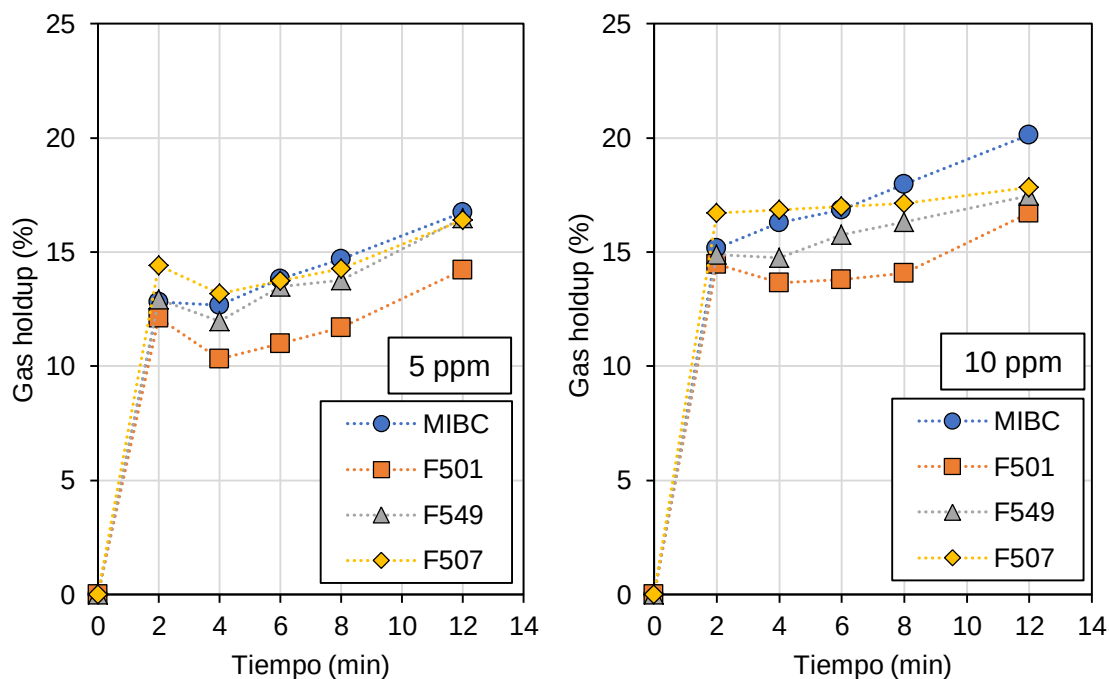


Figura 80. Curvas de gas holdup (ϵ_g) en función del tiempo para 5 ppm (grafico de la izquierda) y 10 ppm (grafico de la derecha) para pruebas en sistema trifásico.

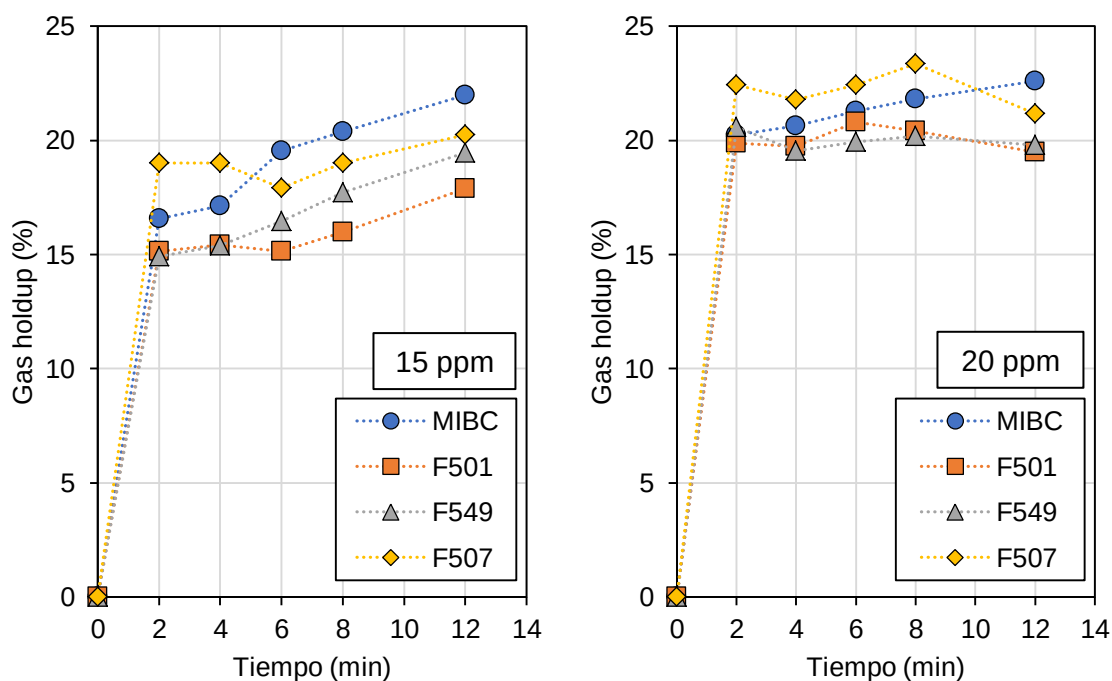


Figura 81. Curvas de gas holdup (ϵ_g) en función del tiempo para 15 ppm (gráfico de la izquierda) y 20 ppm (gráfico de la derecha) para pruebas en sistema trifásico.

Se observa en los gráficos antes mostrados que los espumantes que generan un mayor holdup a lo largo del tiempo corresponden al MIBC y F-507, dos espumantes de

química distinta (alcohol y poliglicol respectivamente. Es de esperar que los alcoholes presenten menores holdup, como fue lo que se presencié en sistema bifásico, evidentemente éste espumante potencia su efecto con la adición de sólidos. Notar que el MIBC es muy volátil, sin embargo, los sólidos de cierta forma estabilizan a la molécula logrando que no se volatilice y de esa forma se puede disponer del reactivo un mayor tiempo en el reactor.

Para poder comparar con el sistema bifásico fue necesario encontrar un valor representativo de las mediciones de gas holdup a lo largo de los 12 minutos, para ello se realizó una ponderación en base a la cantidad de tiempo que se reportó el valor medido, esto quiere decir que cada experimento tiene un valor de gas holdup asignado. A continuación, en la **Figura 82** se muestra una comparación entre los valores de gas holdup obtenidos en sistema bifásico (grafico izquierdo) y en sistema trifásico (grafico derecho), notar que estos valores de gas holdup están en función de la concentración de espumante a una velocidad superficial de gas constante (J_g igual 0,55 cm/s).

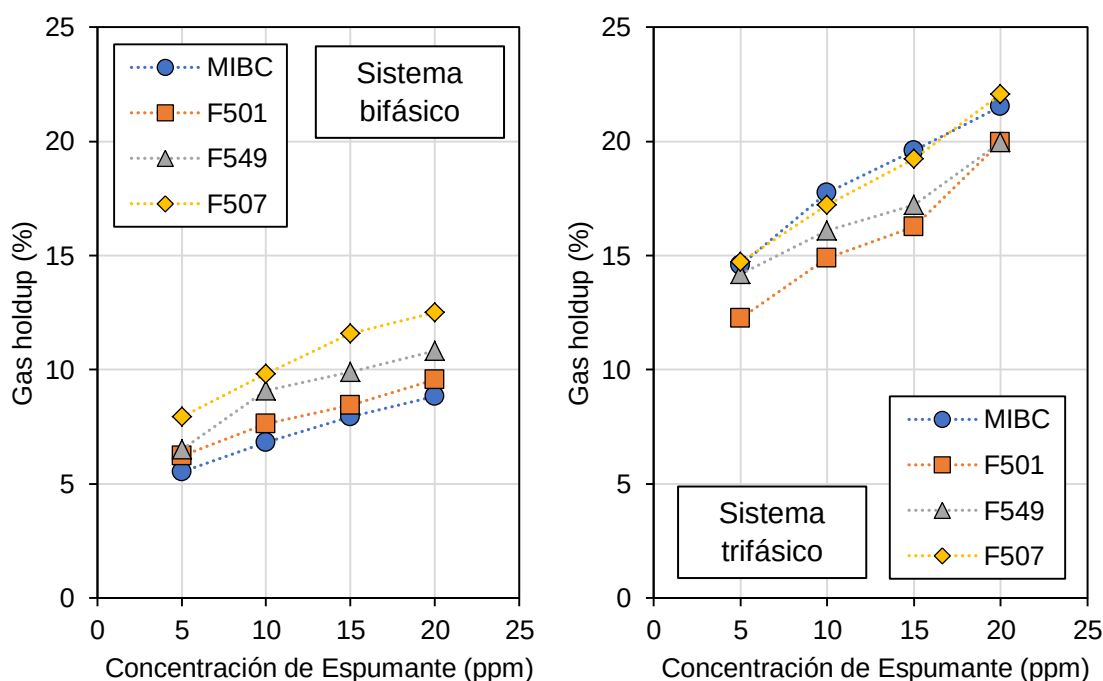


Figura 82. Comparativa entre mediciones de gas holdup realizadas en sistema bifásico (grafico izquierdo) y sistema trifásico (grafico derecho).

Se puede observar una diferencia significativa entre el sistema bifásico y trifásico, notar que existe un comportamiento ascendente de gas holdup a medida que la

concentración de espumante aumenta (este efecto se mantiene en ambos sistemas). Por otra parte, algunos espumantes cambian su capacidad de generar mayores valores de gas holdup al trabajarlos en sistema trifásico, observar que el orden ascendente de generación de gas holdup en sistema bifásico de los espumantes utilizados es MIBC – F501 – F549 y F507, mientras que en sistema trifásico el orden ascendente es F501 – F549 – F507 y MIBC. De cierta forma existe una interacción mayor entre algunos espumantes y el sólido, específicamente en este caso el MIBC. Desde ya se puede extraer que el sistema de medición donde se realizan las pruebas no es indiferente.

El efecto que tienen los sólidos sobre las burbujas se podría apuntar como:

- Interfieren en la velocidad de ascenso de las burbujas.
- Burbujas que logran formar un agregado son más pesadas por ende su ascenso es más lento.
- Los sólidos estabilizan la burbuja aumentando el efecto anticoalescente de estos
- Los sólidos de cierta forma anclan las moléculas volátiles haciendo que el reactivo esté disponible en el reactor por una mayor cantidad de tiempo.

A continuación, en la **Figura 83** se encuentran graficados los histogramas que contienen los datos de mediciones de gas holdup obtenidos a partir de las cinéticas realizadas en sistema bifásico (grafico izquierdo) y sistema trifásico (grafico derecho).

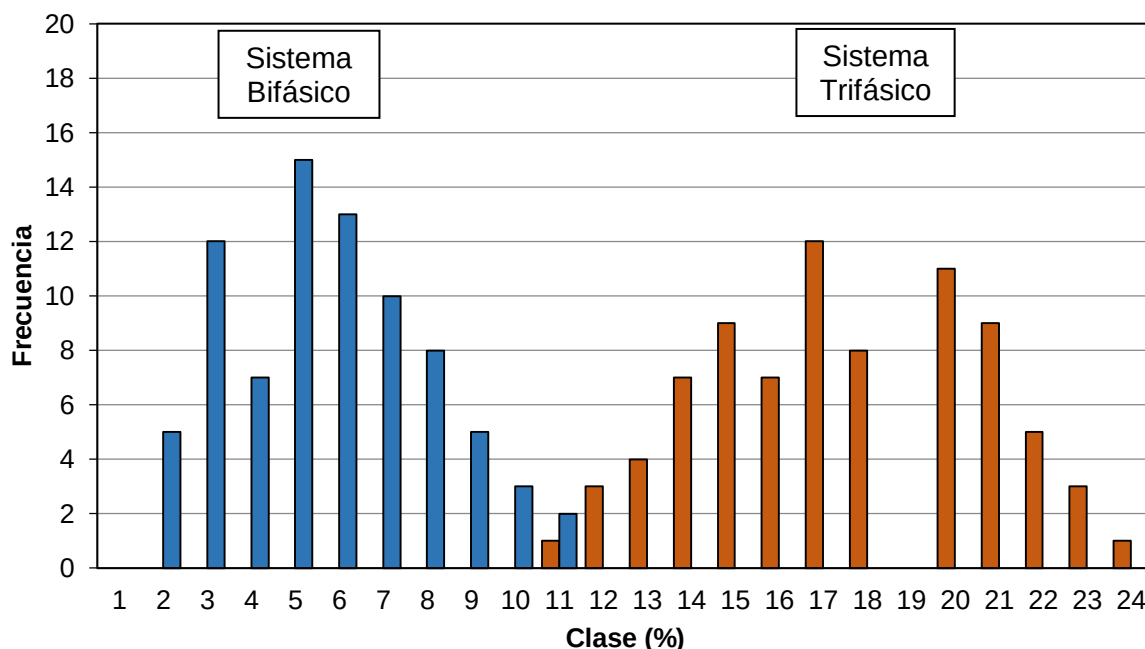


Figura 83. Histogramas de gas holdup (%) obtenidos a partir de cinéticas de flotación bifásica (izquierda) y trifásica (derecha).

Se observa una clara diferencia entre ambos histogramas al ver los rangos de gas holdup de cada sistema, desde ya el sistema bifásico abarca desde un 1,5% hasta 10,3%, mientras que para el sistema trifásico va desde un 10,3% hasta un 23,3%. Con respecto a la forma de los histogramas se podría evidenciar una distribución más bien normal para el sistema bifásico mientras que para el sistema trifásico se ve una leve asimetría hacia la izquierda. Por último, agregar que el promedio para el histograma de la izquierda es de 5,25% mientras que el de la derecha 17,09%, de esta forma se corrobora lo mencionado anteriormente en donde da cuenta de que existen diferencias significativas entre medir el gas holdup entre un sistema u otro.

Con respecto a los diámetros de burbujas estos igual se ven afectados por el sistema en donde se midió el gas holdup. A continuación, en la **Figura 84** se presentan los diámetros de burbuja estimados en sistema bifásico (grafico izquierdo) y en sistema trifásico (grafico derecho) los cuales se encuentran graficados en función de la concentración de espumante, para cada uno de ellos (MIBC, F501, F549 y F507).

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

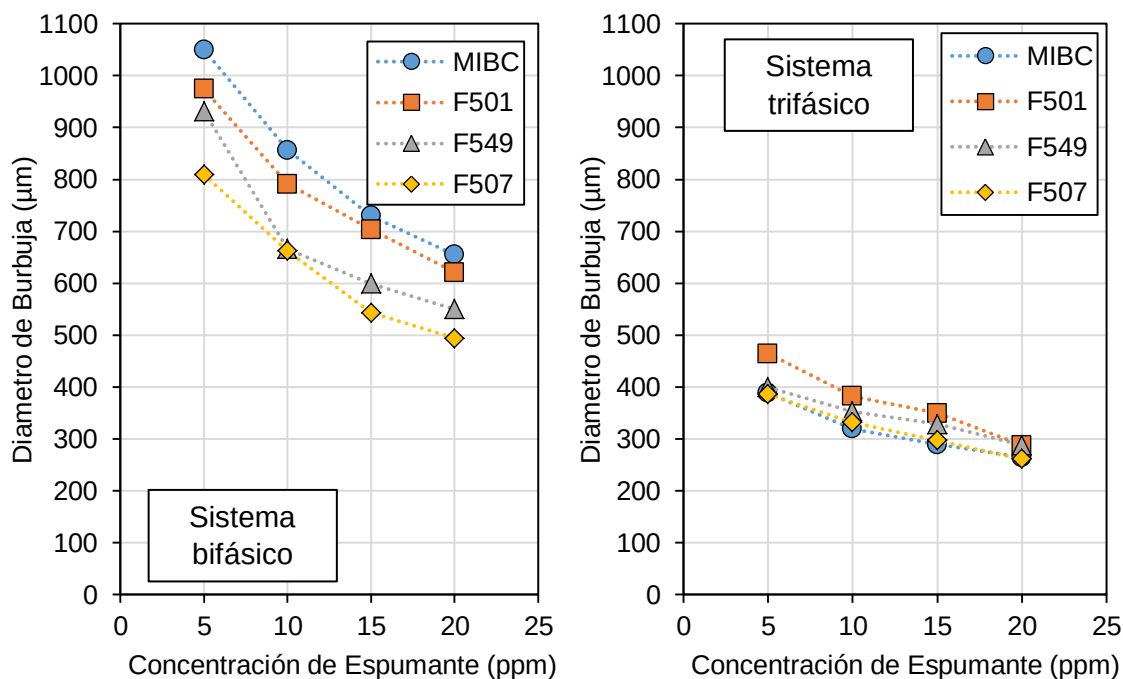


Figura 84. Diámetro de burbuja (μm) en función de la concentración de espumante (ppm) para distintos tipos (MIBC-F501-F549-F507) en sistema bifásico (grafico izquierdo) y sistema trifásico (grafico derecho).

Se logra notar una diferencia significativa entre estimar el diámetro de burbuja en sistema bifásico y trifásico, en este último se logran diámetros más pequeños que en sistema bifásico, atribuido al efecto que producen los sólidos pues estos estabilizan las burbujas retardando aún más la coalescencia. Con el aumento de la concentración de espumante en el sistema, se reduce la tasa de coalescencia preservando la recurrencia de burbujas pequeñas en el sistema (se observa la misma tendencia en ambos sistemas).

Se espera que el aumento del gas holdup a causa del aumento de la concentración de espumante, tenga un efecto en la cantidad de agua que se transfiere hacia el concentrado. En la **Figura 85** se muestra la recuperación agua acumulada (%) en función del gas holdup ponderado (%) para diferentes tipos de espumante a diferentes concentraciones. Notar que cada uno de estos puntos corresponde a una prueba de flotación realizada, es decir por ejemplo para el caso del MIBC los cuatro puntos azules representan las pruebas realizadas con 5, 10, 15 y 20 ppm.

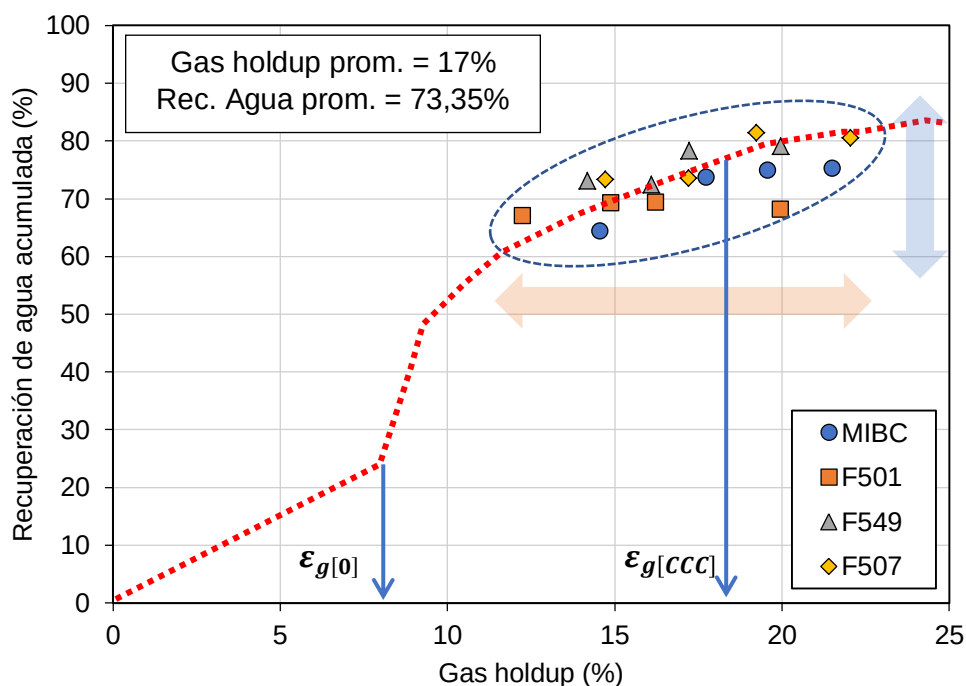


Figura 85. Recuperación de agua acumulada (%) versus el gas holdup (%) para los experimentos realizados en sistema trifásico con diferentes espumantes y distintas concentraciones.

Es posible apreciar una tendencia global, que al aumentar el gas holdup la recuperación de agua acumulada aumenta levemente abarcando desde un 65% hasta un 85% aproximadamente. Por otra parte, cada espumante presenta una curva característica cuando estos se analizan por separado y en general todos presentan una relación que va en aumento. En promedio los espumantes que generan una mayor recuperación de agua vienen dados por el F507 y el F549, seguido por MIBC y finalmente F501, dando cuenta de que los poliglicoles tienen la capacidad de generar capas más gruesas de agua que los alcoholes debido a su tamaño molecular. De esto se podría inferir que un mayor gas holdup es consecuencia de burbujas más pequeñas, por lo tanto, existirá una mayor área superficial disponible la que se traduce en una mayor transferencia de agua hacia el concentrado. En términos prácticos, la **Figura 85** indica que la recuperación de agua acumulada (considerando todos los espumantes) es 73,35% la cual tiene un valor de gas holdup asociado de 17,35%.

Un mayor aumento en la transferencia de agua no siempre es beneficioso puesto que a partir de esto la recuperación mediante arrastre hidráulico (Entrainment) se manifiesta de manera más potente. Por lo mencionado anteriormente se hace necesario observar

el efecto entre la recuperación másica y el gas holdup ponderado. En la **Figura 86** se observa graficada la recuperación másica acumulada en función del gas holdup ponderado para todas las pruebas realizadas a diferentes espumante (MIBC, F501, F549 y F507) a las distintas concentraciones utilizadas (5, 10, 15 y 20 ppm).

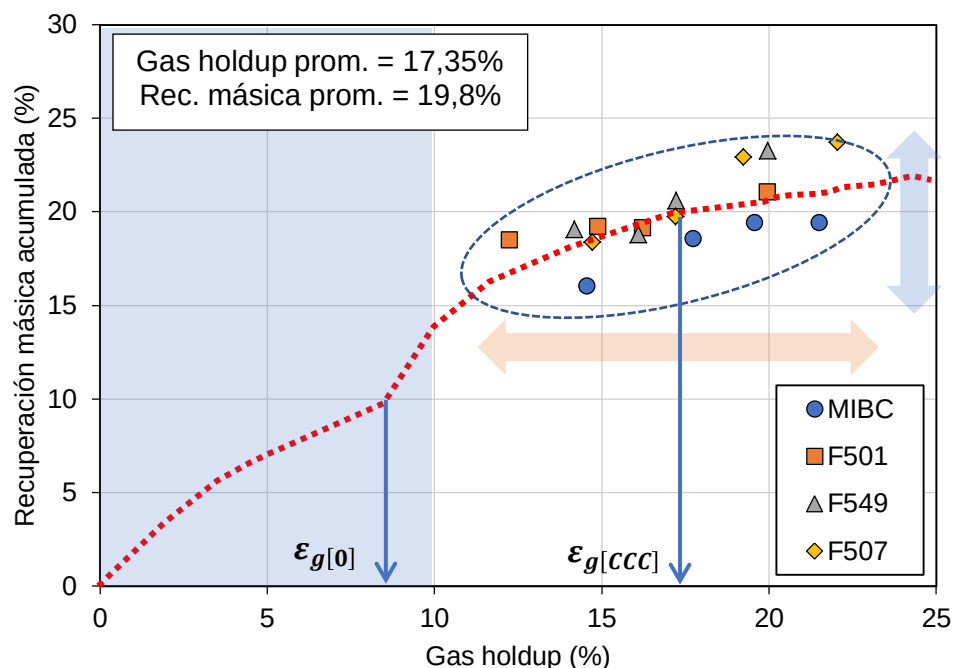


Figura 86. Recuperación másica acumulada (%) versus el gas holdup (%) para los experimentos realizados en sistema trifásico con diferentes espumantes a distintas concentraciones.

Al observar la relación entre la recuperación másica y el gas holdup se puede ver una tendencia que va en aumento. Un mayor gas holdup como se observó en la **Figura 85** lleva consigo un aumento en la transferencia de agua hacia el concentrado debido a los mecanismos de recuperación de las partículas (i.e., flotación verdadera y arrastre hidráulico). Cabe también destacar, que la recuperación másica promedio observada desde el conjunto total de resultados es 19,8% la cual tiene asociado el valor promedio de gas holdup (17,35%).

En base a lo comentado se hace importante analizar el gráfico entre la recuperación másica y la recuperación de agua, este tipo de relación es usualmente usada para establecer el grado de arrastre hidráulico que se genera en sistemas de flotación batch [25]. Notar que la información graficada en la **Figura 87** corresponde a todos los

espumantes evaluados (MIBC, F501, F549 y F507) y para todas las concentraciones utilizadas (5, 10, 15 y 20 ppm).

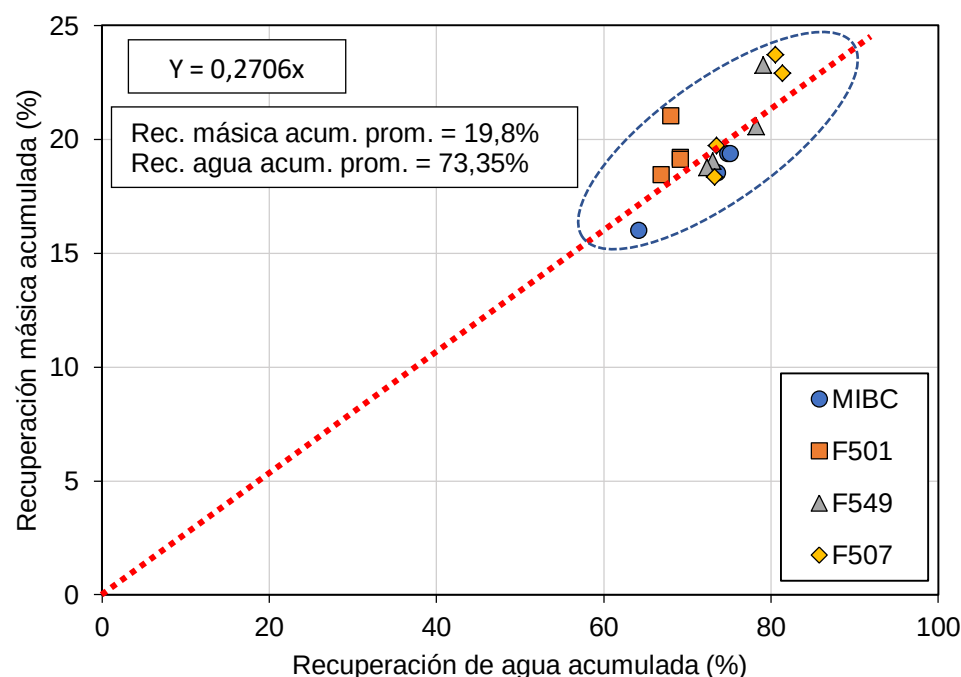


Figura 87. Recuperación másica acumulada (%) en función de la recuperación de agua acumulada (%) para los experimentos realizados en sistema trifásico con diferentes espumantes a distintas concentraciones.

Se observa una dependencia lineal entre la recuperación másica acumulada y la recuperación de agua acumulada, lo que es bastante lógico puesto que una mayor transferencia de agua hacia el concentrado se traduce en una mayor transferencia de masa hacia el concentrado (i.e., true flotation y entrainment). Se observa que cada uno de estos espumantes utilizados son capaces de generar diferentes niveles de transferencia de agua hacia el concentrado. No obstante, un análisis integrado de todos los espumantes revela un valor promedio de recuperación másica de 19,8% la cual requiere un valor promedio de agua de 73,35%.

Como se mencionó anteriormente, la transferencia de agua hacia el concentrado podría tener un efecto significativo en la recuperación metalúrgica de Cu, y todo esto ocasionado por el tipo y concentración de espumantes que se estén utilizando. En seguida en la **Figura 88** se muestra graficada la recuperación metalúrgica acumulada por cada test realizado en función del gas holdup (variable directamente afectada por los agentes surfactantes).

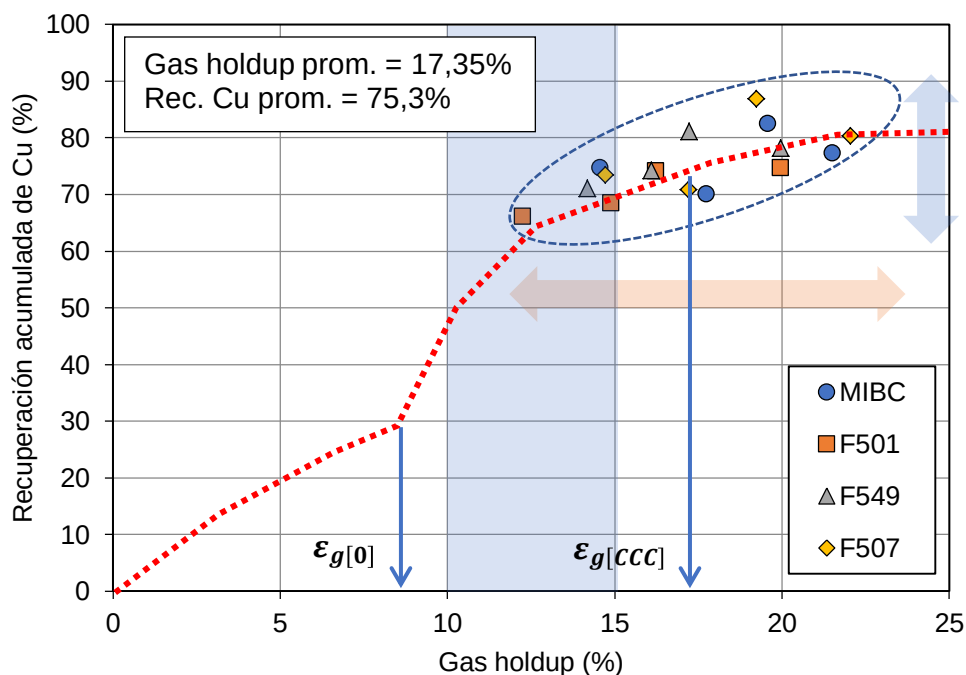


Figura 88. Recuperación acumulada de Cu en función del gas holdup obtenido de todas las pruebas realizadas con distintos espumantes a diferentes concentraciones.

Se observa que la recuperación metalúrgica de cobre aumenta a medida que el gas holdup aumenta. En otras palabras, un mayor número de burbujas permanece en la pulpa lo que aumenta la probabilidad de las partículas hidrofóbicas de ser flotadas. Al mismo tiempo, dependiendo de la naturaleza del espumante y de la cantidad de agua que se transfiera al concentrado, existe una fracción de material que se recupera por arrastre hidráulico. La **Figura 88** indica que el valor promedio de la recuperación de cobre para todas las condiciones evaluadas resultó ser de 75,3% (a un ϵ_g de 17,35%), esto da cuenta del desempeño de separación asociado a la cantidad de aire disponible para llevar a cabo el proceso de flotación.

De acuerdo a lo antes mencionado, es importante analizar la ley acumulada del concentrado en función del gas holdup para complementar la integración metalúrgica con el proceso de inyección de aire. En la **Figura 89** se muestra la ley de Cu acumulada en función del gas holdup, para las pruebas realizadas con los diferentes espumantes a distintas concentraciones.

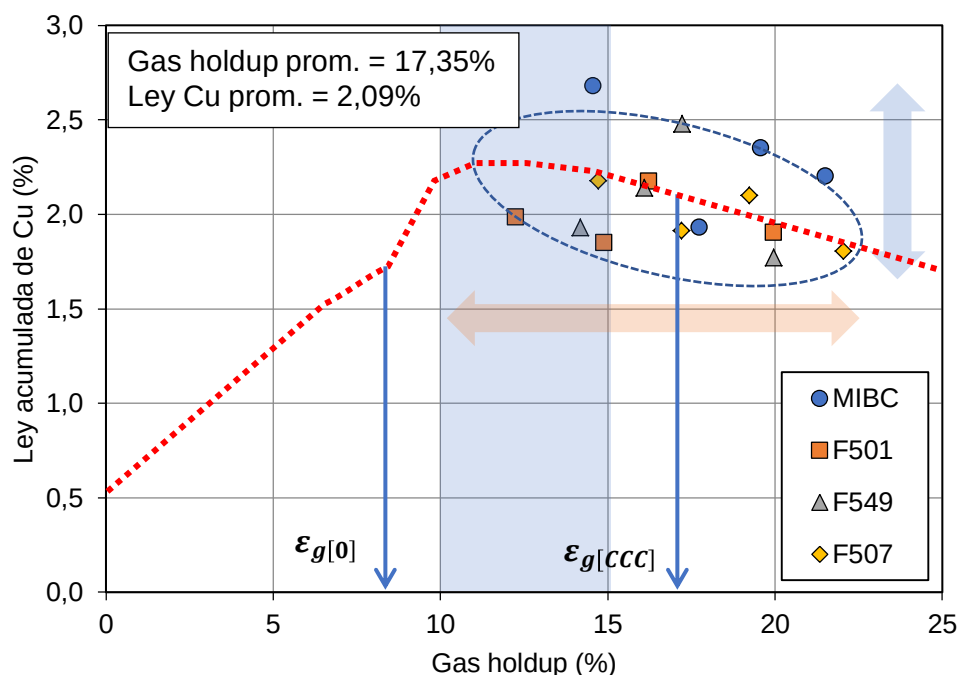


Figura 89. Ley acumulada de Cu en función del gas holdup obtenido de todas las pruebas realizadas a diferentes concentraciones y con distintos espumantes.

En la **Figura 89** se muestra un leve descenso de la ley acumulada cuando se obtienen mayores valores de gas holdup, esta baja se atribuye a la recuperación no selectiva consecuencia del aumento de la transferencia de agua hacia el concentrado, la cual es capaz de arrastrar partículas sin inercia que no necesariamente contienen valor. La línea punteada naranja corresponde a una curva especulativa sobre el comportamiento de la ley en función del gas holdup, la cual muestra que es óptima al valor de 12,5%. En promedio la ley acumulada de cobre considerando todos los experimentos realizados resultó ser de 2,09%, asociado a una concentración de aire en la pulpa del 17,35%. No obstante, la curva especulativa indica que un valor óptimo de ley se encontraría alrededor de 2,25% de Cu lo que equivale a un enriquecimiento de 4,25 veces. Desde un punto de vista metalúrgico, la curva de recuperación versus razón de enriquecimiento permite establecer el punto transaccional entre recuperación y enriquecimiento. Este punto es comúnmente conocido como “Trade-Off”, i.e., valor de la mejor recuperación alcanzable a la mejor razón de enriquecimiento posible. La **Figura 90** muestra la recuperación metalúrgica de Cu en función de la razón de enriquecimiento para los tipos de espumantes evaluados a diferentes concentraciones.

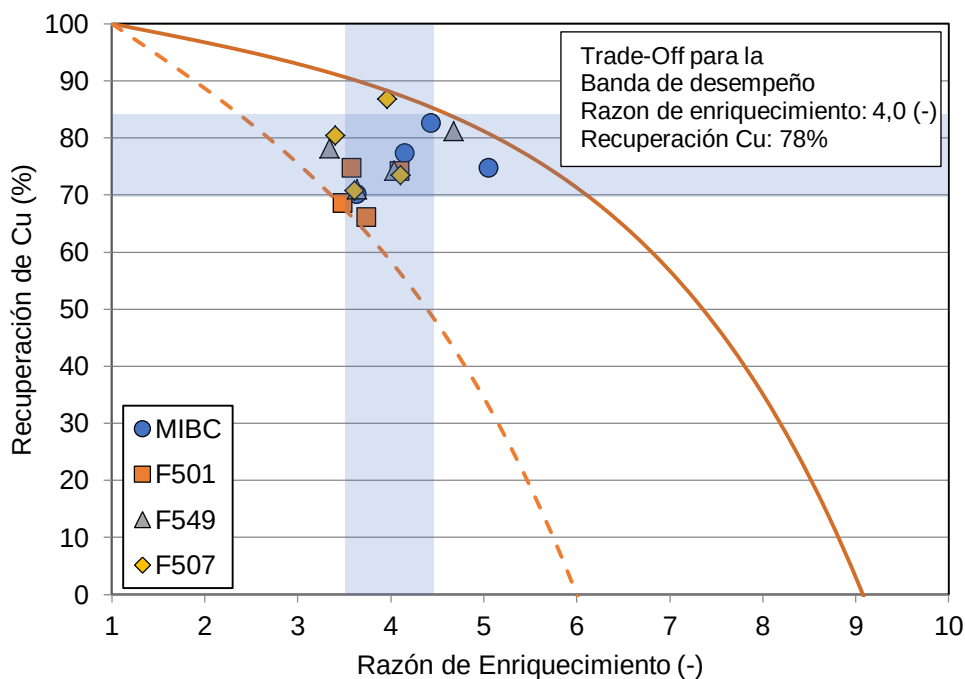


Figura 90. Recuperación de Cu (%) versus razón de enriquecimiento (-) para los tipos de espumante utilizados a diferentes concentraciones.

Se observa en esta figura que los resultados experimentales obtenidos se encuentran en una banda de desempeño que se delimita por las curvas inferior y superior. Al mismo tiempo se destaca la zona del Trade-Off la cual indica una recuperación del 78% de Cu enriqueciendo la alimentación original aproximadamente 4,0 veces. Vale destacar que el punto óptimo de desempeño metalúrgico recién analizado se originó a una concentración de aire de 17,35% (gas holdup).

Con el fin de dar cuenta de la contribución de la flotación verdadera y el arrastre hidráulico en base a los resultados recopilados, es posible estimar el grado de entrainment según el método de Warren [25]. Si se grafica la recuperación másica acumulada en función de la recuperación del agua acumulada. Al ajustar una recta a las variables antes mencionadas, permite estimar el grado de entrainment el cual viene representado por la pendiente (**ver ejemplo en sección 2.3.1.1**), mientras que la flotación verdadera sería representada por el intercepto. En la **Tabla 35** se muestran los valores de pendiente e intercepto obtenidos al aplicar el modelo de Warren [25].

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 35. Parámetros obtenidos al aplicar el modelo de Warren [25] para todos los tests realizados en sistema trifásico para diferentes espumantes a distintas concentraciones.

[] / Espumante	Pendiente (Grado ENT)	Intercepto (True Flotation)
5 ppm MIBC	0,197	3,39
5 ppm F501	0,227	3,08
5 ppm F549	0,199	4,26
5 ppm F507	0,161	6,75
10 ppm MIBC	0,213	4,07
10 ppm F501	0,216	4,15
10 ppm F549	0,171	6,07
10 ppm F507	0,178	6,69
15 ppm MIBC	0,200	5,11
15 ppm F501	0,189	5,52
15 ppm F549	0,173	7,17
15 ppm F507	0,188	8,00
20 ppm MIBC	0,189	5,11
20 ppm F501	0,193	7,43
20 ppm F549	0,173	10,19
20 ppm F507	0,174	10,18

En la **Figura 91** se encuentran graficados los valores asociados al entrainment (pendiente ajustada mediante modelo de Warren [25] en función del gas holdup para observar posibles dependencias.

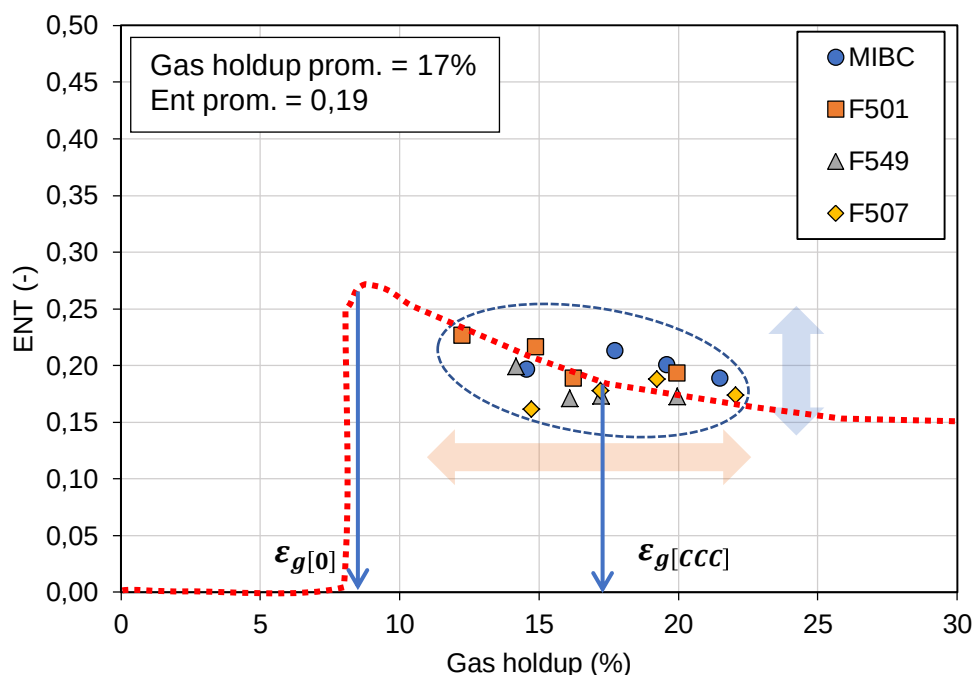


Figura 91. Grado de entrainment (-) para pruebas realizadas con espumantes (MIBC, F501, F549 y F507) a diferentes concentraciones (5, 10, 15 y 20 ppm) en función del gas holdup (%).

Se observa un leve descenso en el factor de entrainment a medida que el gas holdup es mayor, esto es consecuencia del tamaño de las burbujas puesto que cuando el gas holdup es menor, el tamaño de estas son mayores logrando a su vez mayores velocidades de ascenso provocando un arrastre hidráulico más significativo sobre el concentrado. Se ha modelado especulativamente una curva, la cual da cuenta del comportamiento del factor de entrainment en función del gas holdup. Notar que la curva asciende (ENT) aproximadamente en un valor de gas holdup del 8%, este valor representa la concentración de aire en la zona de colección cuando no se utiliza espumante en el sistema. De manera seguida la curva segmentada aumenta hasta alcanzar un máximo para posteriormente permanecer constante a medida que los valores de gas holdup son mayores, lo cual está atribuido a la concentración crítica de coalescencia la cual está representada por un valor de gas holdup aproximado de un 17%.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente el intercepto representa la masa recuperada por flotación verdadera. En la **Figura 92** se encuentran los valores obtenidos de masa recuperada por flotación verdadera (%) en función del gas holdup.

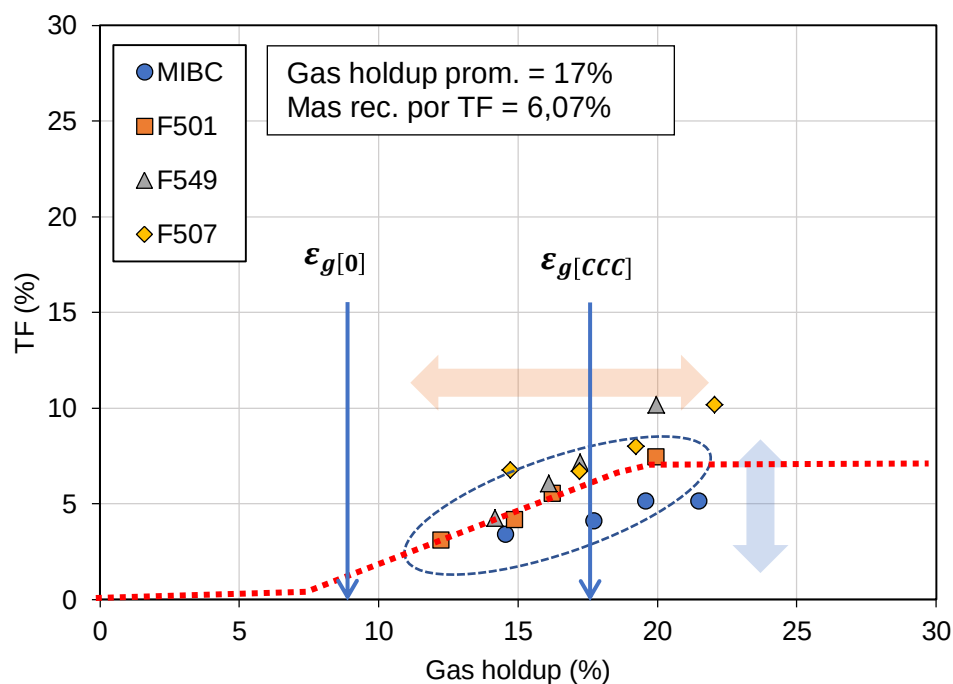


Figura 92. Masa recuperada por flotación verdadera (%) para pruebas realizadas con espumantes (MIBC, F501, F549 y F507) a diferentes concentraciones (5, 10, 15 y 20 ppm) en función del gas holdup (%).

Se evidencia una clara relación directamente proporcional entre la masa recuperada por flotación verdadera (%) y el gas holdup hasta que después alcanza un óptimo aproximadamente en 20%. En línea punteada se muestra una curva especulativa del comportamiento de la flotación verdadera en función del gas holdup, notar que parte aproximadamente de un valor de gas holdup de 8%, valor que se atribuye a cuando la flotación se realiza sin espumante, posteriormente la curva aumenta de forma lineal hasta alcanzar un óptimo y permanecer constante a causa de que se alcanza la concentración crítica de coalescencia (gas holdup = 17%). Se reporta un valor promedio de 6,07 % de masa recuperada mediante flotación verdadera considerando todos los experimentos a un gas holdup de 17% aprox.

La zona lineal que va entre 8 y 17% se atribuye al hecho de que la concentración de espumante ha ido en aumento en el sistema, provocando a su vez un mayor número de burbujas más finas las cuales aumentan la probabilidad de formar un agregado y de esta forma ser recuperadas por flotación verdadera.

Es posible encontrar la contribución del entrainment y de la flotación verdadera sobre la recuperación metalúrgica de Cu total, utilizando los gráficos de recuperación

metalúrgica en función de la recuperación másica (**ver ejemplo en capítulo 7**) y de esta forma poder observar si es que existe alguna incidencia entre el tipo y la concentración de espumante utilizado. A continuación, en la **Tabla 36** y

Tabla 37 se encuentran los valores calculados de la contribución por arrastre hidráulico y flotación verdadera respecto a la recuperación total de Cu.

Tabla 36. Fracción de la recuperación por flotación verdadera (TF) sobre la recuperación metalúrgica total.

TF/total				
	MIBC	F501	F549	F507
5	47,9	42,9	42,1	63,5
10	40,4	39,9	51,3	50,1
15	52,1	54,3	70,7	53,0
20	36,4	49,4	54,3	49,8

Tabla 37. Fracción de la recuperación por arrastre hidráulico (ENT) sobre la recuperación metalúrgica total.

ENT/total				
	MIBC	F501	F549	F507
5	52,1	57,1	57,9	36,5
10	59,6	60,1	48,7	49,9
15	47,9	45,7	29,3	47,0
20	63,6	50,6	45,7	50,2

En la **Figura 93** se muestran las contribuciones de la flotación verdadera en función del gas holdup, cada uno de estos puntos graficados representa una prueba de flotación realizada.

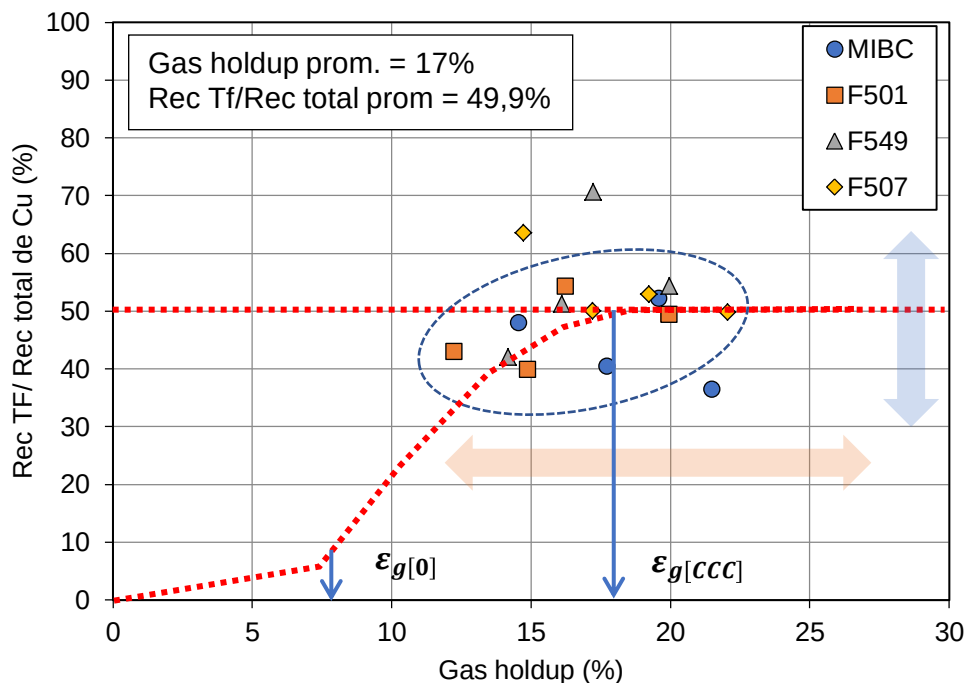


Figura 93. Contribución de la flotación verdadera (TF) sobre la recuperación total de Cu, en función del gas holdup para los 16 experimentos realizados a diferentes espumantes y a distintas concentraciones.

Se logra evidenciar una leve tendencia al ascenso en los puntos graficados en la **Figura 93**. Se grafica una curva especulativa (línea roja punteada) del comportamiento de la razón entre la recuperación por flotación verdadera y la recuperación total de Cu, notar que la curva parte desde cero y luego aumenta hasta alcanzar un óptimo aproximadamente al 50% de razón, lo que equivale aproximadamente a un 17% de gas holdup (valor asociado al CCC). Como promedio, los puntos bordean el 49% de contribución de flotación verdadera respecto a la recuperación metalúrgica total.

De la misma forma en la **Figura 94** se muestran graficados los aportes del entrainment (%) en la recuperación metalúrgica total, recordar que cada uno de estos puntos representa un test metalúrgico realizado con los cuatro espumantes utilizados (MIBC, F501, F549, y F507) a diferentes concentraciones (5, 10, 15 y 20 ppm).

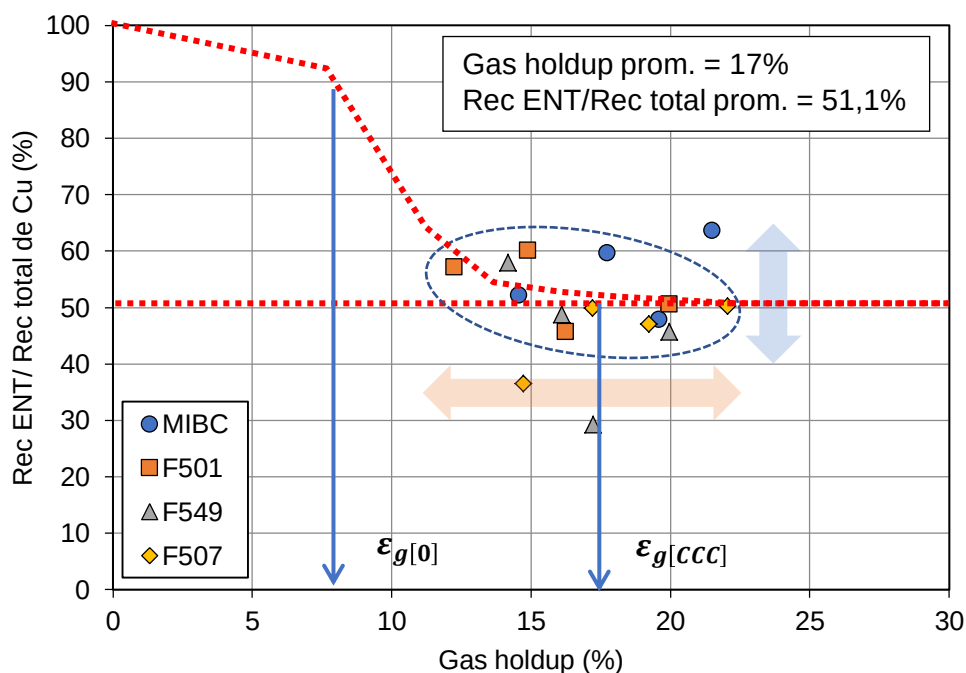


Figura 94. Contribución del arrastre hidráulico (ENT) sobre la recuperación total de Cu, en función del gas holdup para los 16 experimentos realizados a diferentes espumantes y a distintas concentraciones.

En la **Figura 94**, ya que es el complemento de la **Figura 93**, se evidencia una leve tendencia al descenso a medida que el gas holdup aumenta. La curva desciende desde el 100% hasta alcanzar un mínimo en una razón (R_{ENT}/R_{total}) cercana al 51% y luego permanece constante por el hecho de alcanzar la concentración crítica de coalescencia (al 17% de holdup aprox.). En promedio se registra un 51% de aporte realizado por el arrastre hidráulico en la recuperación total metalúrgica. A la luz de lo datos se evidencia que la contribución del arrastre hidráulico y la flotación verdadera tienden a un valor asintótico cercano al 50%.

La constante cinética es uno de los parámetros afectado por la métrica del aire, a continuación en la **Figura 95** se muestran graficadas las constantes cinéticas de Cu (1/min), obtenidas a partir del ajuste del modelo de Klimpel para todos los test de flotación batch realizados a diferentes concentraciones con los distintos espumantes utilizados. También se ha incluido en línea punteada roja una curva especulativa sobre el comportamiento de la cinética en función del gas holdup.

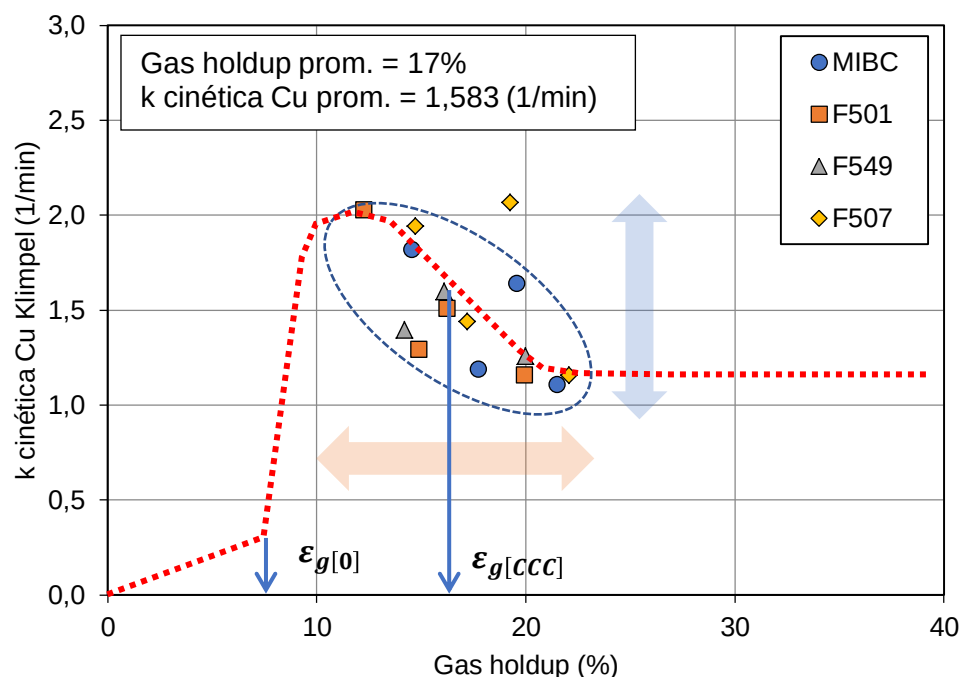


Figura 95. Constante cinética de Cu (1/min) calculada con el modelo de Klimpel en función del gas holdup, obtenido de todas las pruebas realizadas a diferentes concentraciones y con distintos espumantes.

Cabe destacar que la constante cinética es un parámetro que incluye diferentes aspectos del proceso de flotación. Estos son la distribución del tamaño del mineral a separar por flotación, el grado de liberación (asociaciones), el grado de hidrofobicidad (colectores) de la superficie de las partículas a flotar, la distribución de tamaño de burbuja y la estabilidad de estas (espumantes), y por último la proporción óptima tamaño de partícula a tamaño de burbuja (1:10).

Se evidencia que después de alcanzar un valor óptimo en la constante cinética, esta desciende a medida que aumenta la concentración de aire en el sistema. Se cree que esto se debe el sistema se aleja de la proporción óptima de tamaño de partícula a tamaño de burbuja. Adicionalmente, se observa que el aumento de la constante cinética comienza en el punto donde se generan burbujas en el sistema sin espumante (8% gas holdup). De la misma forma, en el otro extremo de gas holdup se identifica el valor de este a la concentración crítica de coalescencia (CCC). Especulativamente hablando, se asume que el valor de tamaño de burbuja en la situación sin espumante esta alrededor 2500 a 3000 μm , y se espera un valor de tamaño de burbuja asociado al gas holdup CCC de aproximadamente 1000 μm . Lo interesante de este análisis es

poder establecer una métrica del aire que se vincula directamente con el parámetro cinético k (1/min). Cabe destacar que las burbujas generadas en el rango de espumante CCC presentan una velocidad de ascenso menor que una de mayor tamaño por lo que la transferencia de burbujas mineralizadas hacia el concentrado ocurre de una forma más lenta. Considerando todas las pruebas metalúrgicas realizadas, se reporta una constante cinética de Cu promedio de 1,58 (1/min) a un gas holdup promedio de 17%.

La selectividad es otro punto importante para analizar pues permite observar si es que existen diferencias e incidencias de la concentración de aire en la zona de colección. En la **Figura 96** se encuentra graficado el índice de separabilidad entre Cu y Fe, obtenido a partir de curvas de separación (ver sección 2.3.1.2 para ver procedimiento) en función del gas holdup para los experimentos realizados con diferentes espumantes y a distintas concentraciones.

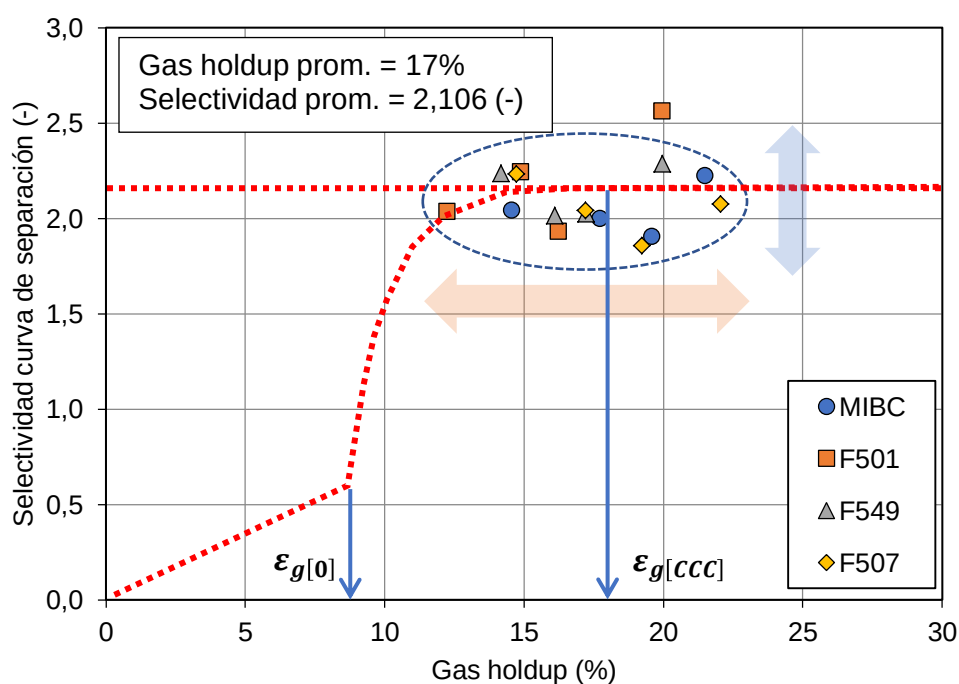


Figura 96. Selectividad de Cu/Fe (a partir de las curvas de separación) en función del gas holdup, obtenido de todas las pruebas realizadas a diferentes concentraciones y con distintos espumantes.

La selectividad se refiere a la capacidad que tiene una burbuja de discriminar entre una partícula que contiene Cu por sobre una partícula que contiene Fe. La **Figura 96** resume todos los tests realizados los cuales engloban la hidrofobicidad del mineral que

se está separando, la liberación de este mismo y la burbuja que logra formar el agregado en forma selectiva. En otras palabras, este agregado también debe cumplir con la robustez necesaria para sobrevivir la transferencia desde la zona de pulpa (ambiente turbulento) hasta la canaleta de concentrado pasando por la zona de espuma.

En la **Figura 96** se ha trazado una curva especulativa (línea roja punteada), notar que esta parte desde 0% gas holdup y después aumenta proporcionalmente hasta aproximadamente 8% de gas holdup, en donde se produce un cambio de pendiente (valor de gas holdup cuando no hay espumante en el sistema). El índice de separabilidad continúa aumentando hasta un valor de 2,1 (-) para después permanecer constante, puesto que se ha alcanzado la concentración crítica de coalescencia (aproximadamente a un valor de 17% gas holdup), es decir donde la cantidad de espumante adicional en el sistema no tiene un efecto significativo sobre la tasa de coalescencia la que impacta el tamaño de las burbujas. La separabilidad se ve fuertemente afectada por el tamaño de burbuja, es decir, cuando las burbujas son más grandes, estas escapan más rápidamente de la celda, no permitiéndose un tiempo de residencia óptimo para formar el agregado que permite separar las partículas que contienen Cu de las que tienen Fe de una manera selectiva.

Se observaron 14 aspectos de la metalurgia en función de la métrica del aire (gas holdup) para analizar el comportamiento de estas. A continuación, en la **Tabla 38** se muestran de forma resumida las principales observaciones y aprendizajes obtenidos del análisis detallado realizado anteriormente.

Tabla 38. Resumen de análisis realizado con la información de laboratorio que se obtuvo.

Relación	Tipo	Observación	Aprendizaje
1 (Figura 84)	Diámetro de burbuja versus [Espumante] bifásico	A medida que la [Espumante] aumenta, diámetros de burbujas menores prevalecen una mayor cantidad de tiempo en el sistema. Van desde un valor de 1200 μm (sin espumante) hasta unos 600 μm (a 20 ppm de espumante).	La cantidad de espumante disminuye la tensión superficial en el sistema haciendo que las burbujas no coalezcan tan

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

			rápidamente.
2 (Figura 84)	Diámetro de burbuja versus [Espumante] trifásico	A medida que la [Espumante] aumenta, diámetros de burbujas menores prevalecen una mayor cantidad de tiempo. Van desde un valor de 600 μm (sin espumante) hasta unos 300 μm (a 20 ppm de espumante).	La cantidad de espumante hace que las burbujas no colaezcan tan rápidamente. Por otro lado, los sólidos permiten que la coalescencia se retarde aún más y también la velocidad d ascenso de estas se hace más lenta.
3 (Figura 85)	Recuperación de agua versus ε_g	A mayores valores de gas holdup mayor es la recuperación de agua. Se reporta un valor de 25% de recuperación de agua cuan se está en $\varepsilon_{g[0]}$. Cuando se alcanza $\varepsilon_{g[ccc]}$ la recuperación de agua es de un 73%.	A mayores valores de gas holdup, mayor es el número de burbujas pequeñas que residen en el volumen de la pulpa, por lo tanto, se traduce en una mayor área superficial total de agua, la que finalmente es transferida al concentrado.
4 (Figura 86)	Recuperación másica versus ε_g	A mayores valores de gas holdup, la recuperación másica es mayor. Cuando no hay espumante en el sistema se muestra un valor de 10% de recuperación másica. A un valor de $\varepsilon_{g[ccc]}$, la recuperación másica alcanza un 20%.	A mayor gas holdup, mayor número de burbujas pequeñas en el sistema. Por lo tanto, existe mayor probabilidad de formar agregados que transporten partículas hacia el concentrado.
5 (Figura 87)	Recuperación másica versus recuperación	Se observa una relación directamente proporcional. A mayor	A medida que el diámetro de burbuja

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

	de agua	recuperación de agua, mayor recuperación másica.	se mantiene en un rango pequeño, el mecanismo de recuperación másico se divide más claramente (i.e., contribuciones de True flotation y entrainment).
6 (Figura 88)	Recuperación de Cu versus ε_g	Se evidencia una mayor recuperación de Cu a medida que el gas holdup es mayor. Cuando $\varepsilon_{g[0]}$ tiene un valor asociado de 30% de recuperación de Cu. Cuando se alcanza un valor igual a $\varepsilon_{g[ccc]}$, la recuperación de Cu es de un 74%.	Un mayor número de burbujas en la proporción tamaño de partícula-burbuja óptima permite aumentar la formación de agregados que se transfieren al concentrado.
7 (Figura 89)	Ley de Cu versus ε_g	La ley de Cu disminuye cuando el gas holdup es mayor. Sin espumante en el sistema se reporta un valor de 1,7% en ley de Cu. Cuando se alcanza $\varepsilon_{g[ccc]}$, la ley de Cu reportada es de 2,1%.	La recuperación total tiene una contribución no selectiva que diluye la ley del concentrado. Se cree que una mayor transferencia de agua aumenta el aporte por arrastre hidráulico.
8 (Figura 90)	Recuperación de Cu versus razón de enriquecimiento	Se observa una banda de desempeño metalúrgico. Se visualiza un Trade-Off ubicado a una recuperación de Cu del 78% aproximadamente con una razón de enriquecimiento asociada de 4 veces.	Este diagrama permite determinar las condiciones de borde de la separación llevada a cabo con todos estos espumantes. Por ejemplo, aumentar el enriquecimiento al

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

			doble desde la condición Trade-Off manteniendo la recuperación requeriría una etapa de tratamiento mecánico adicional.
9 (Figura 91)	Grado de ENT versus ε_g	Se evidencia un descenso de los valores de ENT (-) cuando se tienen valores de gas holdup mayores. Cuando no hay espumante en el sistema el valor de entrainment asociado es 0,27 (-). A un $\varepsilon_{g[CCC]}$, se tiene un valor de ENT de 0,17 (-).	A mayores diámetros de burbuja, mayor es la velocidad de ascenso de las burbujas, produciendo un mayor arrastre hidráulico hacia el concentrado.
10 (Figura 92)	True Flotation versus ε_g	True Flotation aumenta a medida que el gas holdup es mayor. Cuando la concentración de espumante en el sistema es cero, se observa un valor de 10% asociado al TF. Cuando se alcanza el $\varepsilon_{g[CCC]}$, el TF alcanza a ser un 8%.	Un mayor número de burbujas que residan en la zona de pulpa, aumenta la probabilidad de formar agregados y de esta forma permite que la recuperación por flotación verdadera sea mayor.
11 (Figura 93)	$\frac{\text{Recuperación TF}-\text{Cu}}{\text{Recuperación Total}-\text{Cu}}$ versus ε_g	La razón entre TF y la recuperación total aumenta en función del gas holdup hasta estabilizarse en aproximadamente 50% después de alcanzar $\varepsilon_{g[CCC]}$.	A concentraciones mayores a la de CCC, el 50% de la recuperación de Cu ocurre por True Flotation.
12 (Figura 94)	$\frac{\text{Recuperación ENT}-\text{Cu}}{\text{Recuperación Total}-\text{Cu}}$ versus ε_g	La razón entre ENT y la recuperación total disminuye en función del gas holdup hasta estabilizarse en aproximadamente 50% después de	De manera similar al punto anterior, el 50% de la recuperación de Cu ocurre por arrastre

		alcanzar $\varepsilon_{g[CCC]}$.	hidráulico después de alcanzar la concentración crítica de coalescencia (CCC).
13 (Figura 95)	Constante cinética de Cu (k) versus ε_g	A mayores valores de gas holdup, la constante cinética de Cu disminuye. Cuando la concentración de espumante en el sistema es nula, la constante cinética reporta un valor de 0,3 (1/min). $\varepsilon_{g[CCC]}$, tiene asociada una constante cinética de 1,5 (1/min).	Burbujas más pequeñas ascienden más lentamente desde la pulpa hacia el concentrado. Impactando directamente la velocidad con que se transfieren las partículas hacia la canaleta de concentrado.
14 (Figura 96)	Selectividad Cu/Fe versus ε_g	La selectividad aumenta para mayores valores de gas holdup. A concentraciones de espumante igual a cero, la selectividad Cu/Fe es de 0,6. Cuando se alcanza $\varepsilon_{g[CCC]}$, la selectividad aumenta a 2,1.	Cando las burbujas son de mayor tamaño no hay suficiente tiempo para formar agregados, no permitiéndose separar de forma selectiva las partículas que contienen valor de las que no.

La información contenida en la **Tabla 38** permitió establecer las condiciones de borde de la separación metalúrgica del mineral en cuestión. Esto se realizó haciendo una consideración detallada de los aspectos importantes asociados a la métrica del aire en el proceso de flotación. Con el propósito de hacer una integración del aprendizaje obtenido de la experimentación realizada en este proyecto de memoria, a continuación se propone usar un modelo semi-empírico que relacione la concentración de aire con la

concentración de espumante en el ambiente de flotación batch estudiado. Por lo tanto, se presenta la descripción analítica del modelo.

El autor de este trabajo reviso críticamente la literatura y esta no revela alguna relación formal de la concentración de aire con la concentración de espumante. Consecuentemente, los resultados experimentales de este trabajo más la interacción activa con expertos del área (Vera 2020 [58]) permitió identificar un modelo que proporciona la relación que existe entre gas holdup y la concentración de espumante delimitada por las condiciones de borde (i.e., gas holdup a concentración cero, $\varepsilon_{g[0]}$, de espumante y gas holdup a la concentración CCC, $\varepsilon_{g[CCC]}$, de espumante).

Por lo tanto, para culminar esta sección se utilizará el modelo antes mencionado [58] el cual relaciona la concentración de aire en función del espumante de acuerdo a la **Ecuación 68**:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{[0]} + \varepsilon_{[CCC]} * (1 - \exp^{-f*[Espumante]}) \quad \text{Ecuación 68}$$

En dónde:

ε_g : Gas holdup obtenido a x concentración de espumante.

$\varepsilon_{[0]}$: Gas holdup asociado a una nula concentración de espumante.

$\varepsilon_{[CCC]}$: Gas holdup asociado a la concentración crítica de coalescencia (CCC).

f : Parámetro asociada a la concentración

$[Espumante]$: Concentración de espumante en ppm.

El potencial que tiene este modelo es el de poder encontrar los valores de gas holdup cuando no hay presencia de espumante, el gas holdup asociado a la concentración crítica de coalescencia y también encontrar el mismo parámetro CCC. La concentración crítica de coalescencia (CCC) corresponde a la concentración espumante límite en la cual después de este valor el espumante no tiene una incidencia significativa sobre la tasa de coalescencia, lo que impacta el diámetro de burbuja. Durante años la única

forma de encontrar este valor ha sido realizando mediciones directas (pero sesgadas⁸) de diámetros de burbujas y graficarlos en función de la concentración de espumante. En la **Figura 97** se muestra un diagrama comparativo que ilustra las diferencias entre muestrear con el método propuesto en esta memoria (figura de la izquierda) y el método convencional (figura de la derecha).

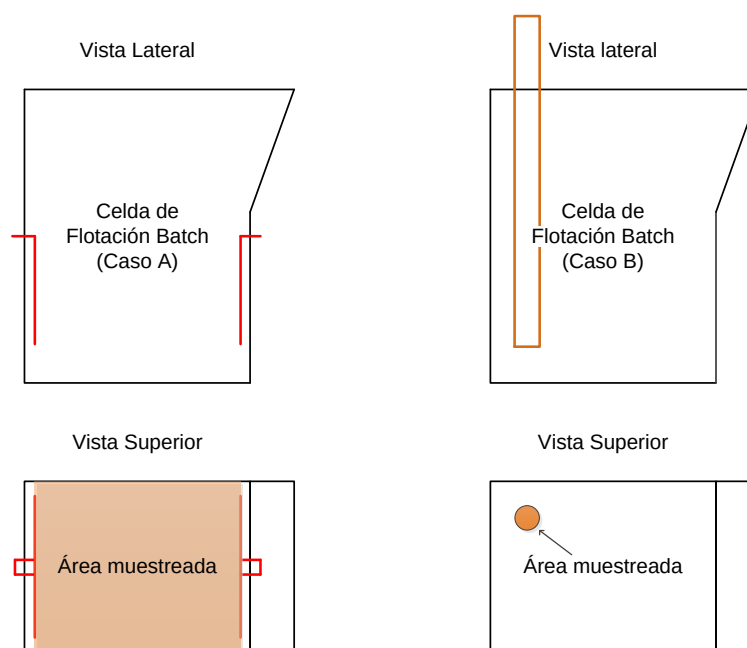


Figura 97. Comparación entre las áreas muestreadas a partir del método propuesto en esta memoria (Caso A, imagen izquierda) y el método convencional (Caso B, imagen derecha).

Se logra evidenciar que el método propuesto en este proyecto, el cual consiste en medir la conductividad eléctrica, para estimar el diámetro de burbuja indirectamente a partir del gas holdup, utiliza más del 70% del área (imagen izquierda) para realizar tal estimación, mientras que los métodos convencionales que se utilizan para estimar diámetro de burbuja toman muestras de un área menor al 13% del área total, lo cual induce a sesgo por considerarse una muestra puntual.

A continuación en la **Figura 98**, **Figura 99**, **Figura 100** y **Figura 101** se muestran los valores de gas holdup medidos y modelados graficados en función de la concentración de espumante en sistema bifásico y trifásico para los espumantes utilizados en este estudio (MIBC, F501, F549 y F507).

⁸ Se considera sesgada este tipo de mediciones porque consiste en muestrear en forma puntual burbujas de una celda de volumen considerable de flotación. En otras palabras, esta estimación es poco representativa.

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

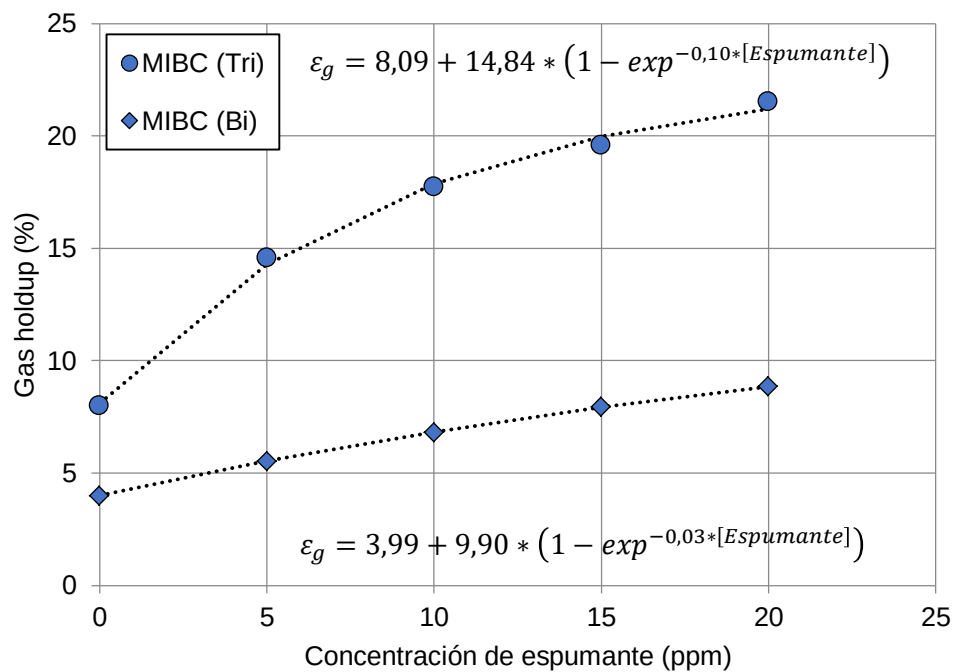


Figura 98. Gas holdup (%) experimental y modelado en función de la concentración de MIBC para sistema bifásico (rombo) y sistema trifásico (círculos).

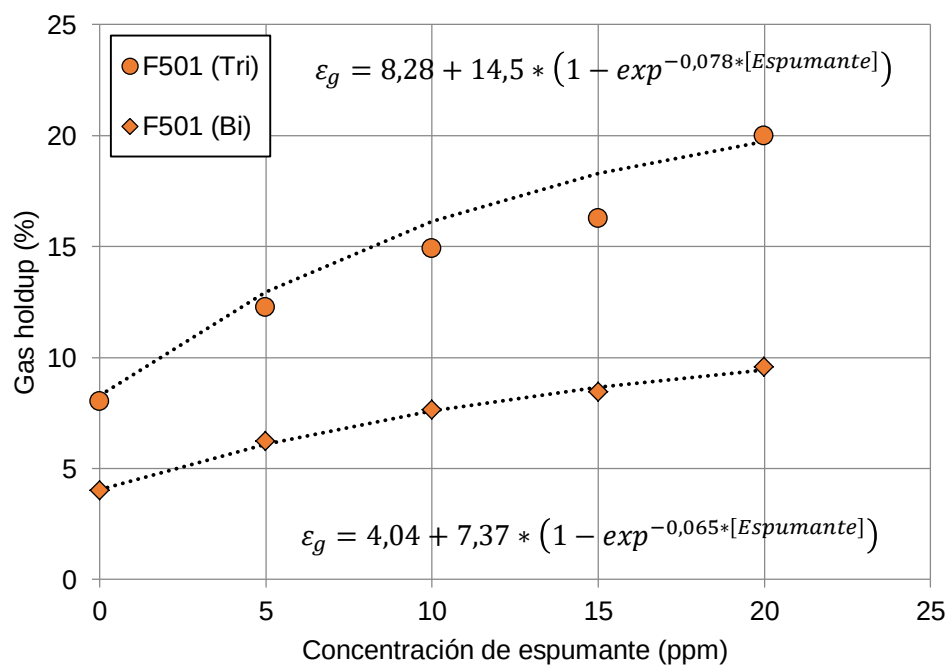


Figura 99. Gas holdup (%) experimental y modelado en función de la concentración de F501 para sistema bifásico (rombo) y sistema trifásico (círculos).

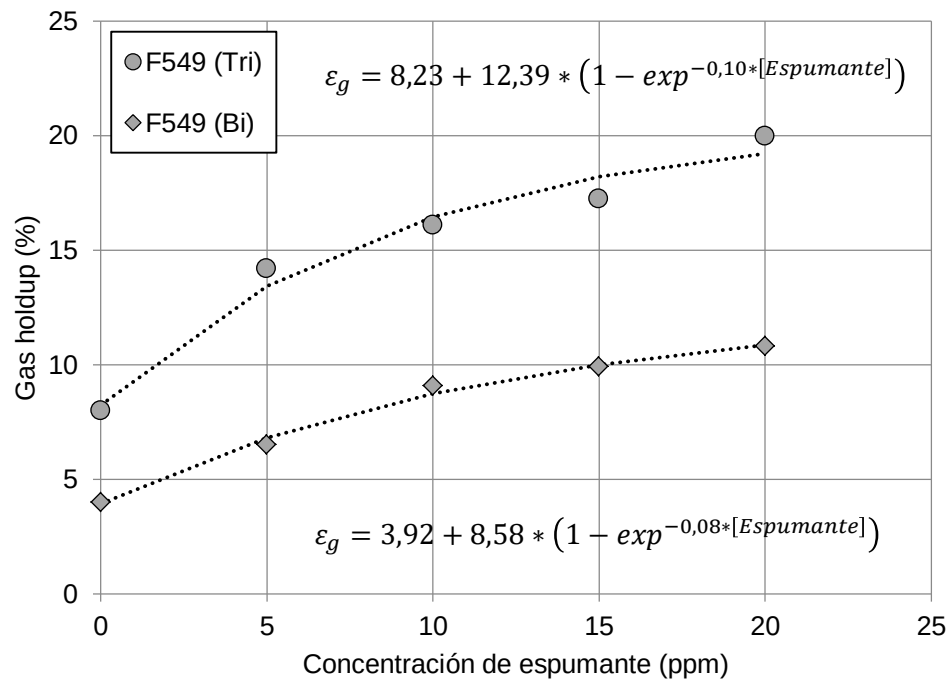


Figura 100. Gas holdup (%) experimental y modelado en función de la concentración de F549 para sistema bifásico (rombo) y sistema trifásico (círculos).

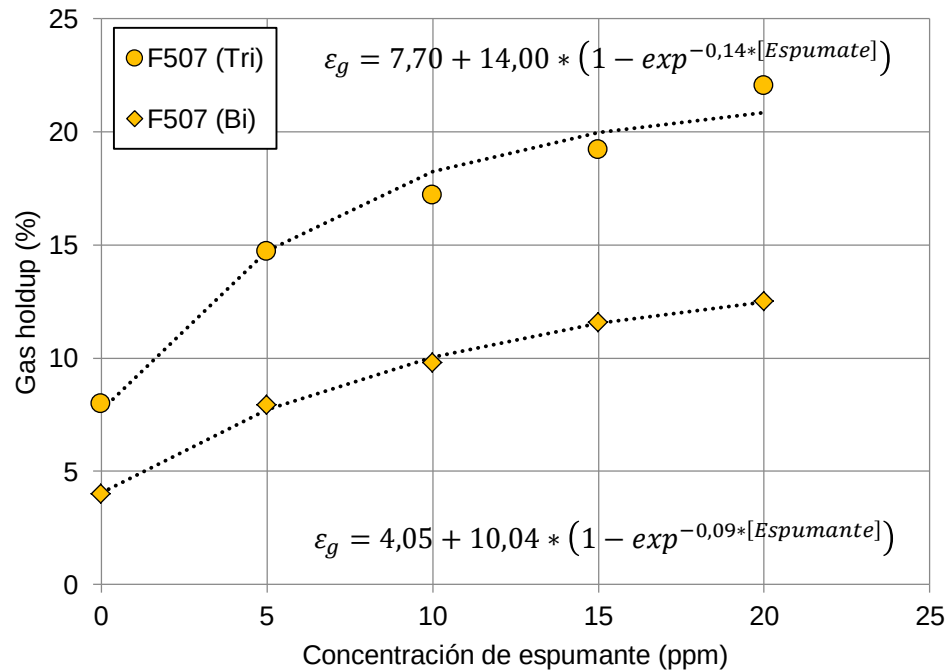


Figura 101. Gas holdup (%) experimental y modelado en función de la concentración de F507 para sistema bifásico (rombo) y sistema trifásico (círculos).

Se observa en todos los gráficos la diferencia entre medir el gas holdup entre un sistema u otro (valores más bajos asociados al sistema bifásico que en sistema trifásico). Notar que las curvas de los 4 espumantes asociadas al sistema bifásico inician desde aproximadamente en un 4% de gas holdup, este valor estimado es indicativo del no uso espumante en el sistema, por otro lado, cuando se trabaja en sistema trifásico el valor del gas holdup cuando no hay espumante corresponde a casi el doble (8% aproximadamente).

En la **Tabla 39** y **Tabla 40** se muestran los parámetros obtenidos después de aplicar el modelo propuesto para las pruebas realizadas con los distintos tipos de espumantes en sistema bifásico y trifásico respectivamente. Adicionalmente, se incluye el cálculo de la concentración crítica de coalescencia a partir de los parámetros extraídos de la información experimental con el modelo (**Ecuación 69**). Esta se estima de la siguiente forma:

$$[CCC] = - \frac{\ln \left(1 - \left(\frac{\varepsilon_{g[0]}}{\varepsilon_{g[CCC]}} \right) \right)}{f} \quad \text{Ecuación 69}$$

Tabla 39. Parámetros del modelo aplicado (Ecuación 68) para las pruebas realizadas en sistema bifásico.

Sistema Bifásico				
	$\varepsilon_{g[0]}$ (%)	$\varepsilon_{g[CCC]}$ (%)	f (1/ppm)	[CCC] (ppm)
MIBC	4,00	9,91	0,03	15,3
F501	4,05	7,38	0,07	12,1
F549	3,92	8,59	0,08	7,4
F507	4,05	10,05	0,09	5,6

Tabla 40. Parámetros del modelo aplicado (Ecuación 68) para las pruebas realizadas en sistema trifásico.

Sistema Trifásico				
	$\varepsilon_{g[0]}$ (%)	$\varepsilon_{g[CCC]}$ (%)	f (1/ppm)	[CCC] (ppm)
MIBC	8,09	14,84	0,11	7,3
F501	8,28	14,50	0,08	10,8
F549	8,23	12,39	0,11	10,0
F507	7,70	14,00	0,14	5,7

La **Figura 102** presenta una comparación de los valores de concentración crítica de coalescencia (CCC) obtenidos para los diferentes espumantes estudiados en un ambiente bifásico y trifásico respectivamente.

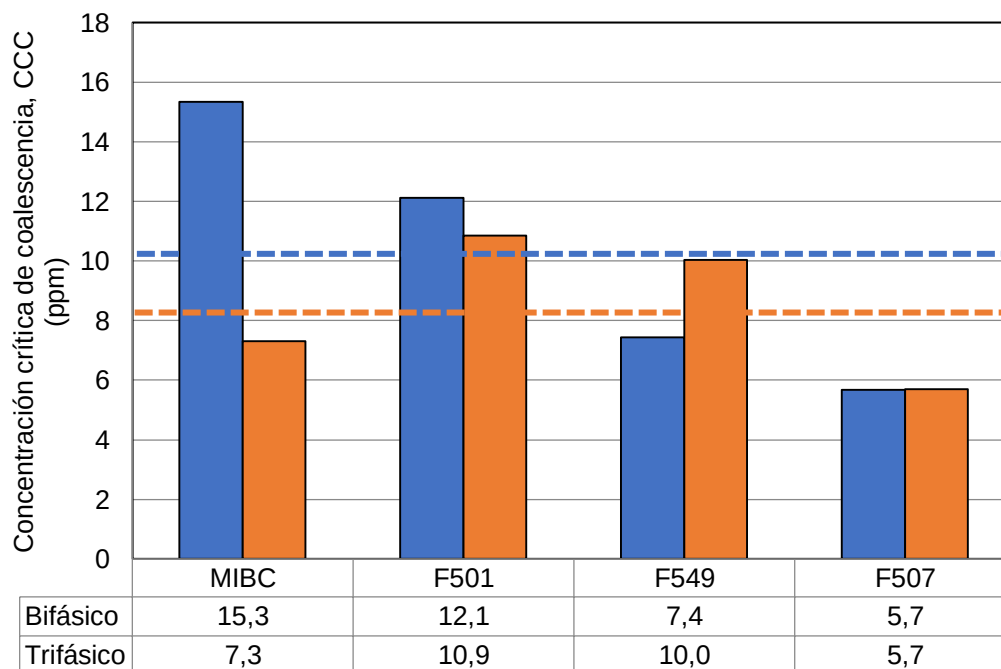


Figura 102. Concentración crítica de coalescencia obtenida a partir de los parámetros de modelación con los distintos espumantes utilizados para sistema bifásico y trifásico (elaboración propia).

Se observa que, para el caso bifásico, la concentración crítica de coalescencia disminuye a medida que el poder del espumante aumenta. MIBC y F501 (alcoholes) evidencian mayores valores de CCC que los poliglicoles (F549 y F507). No se aprecia una tendencia clara para las concentraciones estimadas a partir del sistema trifásico, sin embargo, los promedios de estas concentraciones fueron más bajos en sistema trifásico (8,5 ppm) comprado con el sistema bifásico (10,1 ppm). Esto da cuenta del efecto que tienen los sólidos sobre la tasa de coalescencia (i.e., la disminuye).

Para el sistema bifásico como se mencionó anteriormente el valor de gas holdup asociado a pruebas cuando no hay espumante corresponde a un 4% aproximadamente, mientras que en sistema trifásico este valor se duplica (8% de gas holdup). El valor de gas holdup asociado cuando se alcanza la concentración crítica de coalescencia en sistema bifásico es aproximadamente 9% mientras que en sistema trifásico corresponde a 14%. Se evidencia el efecto de los sólidos en el valor de gas

holdup obtenido los cuales hacen que las burbujas residan mayor tiempo en la pulpa como se observa en la **Figura 102**.

De acuerdo con los objetivos de este proyecto, se logró desarrollar una metodología de medición de gas holdup y establecer relaciones entre la métrica del aire y la metalurgia. Los resultados obtenidos permitieron visualizar la importancia de la medición de concentración de aire en la zona de pulpa, la cual se presta muy bien para la caracterización de espumantes en el sistema de flotación de una forma representativa y robusta.

Habiendo llevado a cabo la totalidad de la experimentación de este proyecto de memoria y analizado los resultados experimentales obtenidos, en el capítulo siguiente se resumen y capturan las principales conclusiones extraídas de este estudio y además se incluyen recomendaciones en relación con aspectos de esta área de investigación no considerados explícitamente en el presente trabajo.

5. CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

A partir de los experimentos realizados a lo largo del desarrollo de este proyecto de memoria se concluye lo siguiente:

- i. Fue posible adaptar una celda flotación batch la cual permitió estimar el gas holdup a partir de la conductividad eléctrica.
- ii. En cuanto a la precisión de las repeticiones con MIBC y F501 con la relación a la métrica del aire, se observó una variabilidad pequeña, atribuida principalmente a como se operó el test de flotación (alejado de la condición batch debido a que en ocasiones el volumen de la celda no se mantuvo constante).
- iii. Al comparar un método directo de estimación de diámetro de burbujas (The UCT bubble size) con el propuesto en este proyecto, se determinó que el método de medición directo reporta un mayor error que el método indirecto propuesto (25% y 14% respectivamente).
- iv. Se observó que los espumantes tienen una capacidad de retardar la tasa de coalescencia. En orden descendente de poder anti coalescente se determinó que $F507 > F549 > F501$ y MIBC. Este orden es indicativo de la naturaleza del actuar químico de los componentes de los espumantes, i.e., los poliglicoles poseen un mayor peso molecular generando una capa de agua más gruesa, la que potencia el efecto de retardar la tasa de coalescencia aún más.
- v. Los poliglicoles retardaron de forma más efectiva la tasa de coalescencia lo que se tradujo en una mayor concentración de aire.
- vi. Cuando se comparan las mediciones en sistema bifásico y trifásico se concluyó que los valores de gas holdup resultaron ser mayores cuando se trabajó en este último sistema. En otras palabras, la presencia de sólidos tiene un efecto en el tiempo de residencia de las burbujas presentes en la zona de pulpa.

Con respecto a la metalurgia y como esta se relaciona con la métrica del aire se concluyó lo siguiente:

- i. Mayores valores de gas holdup son asociados a un mayor número de burbujas en el sistema, y estas a su vez se traducen en una mayor área superficial se

sabe que es agua lo que rodea una burbuja, por lo tanto, logrando una mayor transferencia de agua hacia el concentrado.

- ii. Una mayor recuperación másica se obtuvo al aumentar la concentración de aire (gas holdup). Esto fue consecuencia de un mayor número de burbujas en el sistema, aumentando las probabilidades de la formación de agregados los que se trasladaron al concentrado.
- iii. Con respecto a la recuperación metalúrgica, esta también se vio influenciada por el gas holdup (i.e., a mayores concentraciones de aire, mayor fue la recuperación de Cu). La recuperación de Cu a una concentración cero de espumante fue de un 30%. Cuando se obtuvo un gas holdup asociado a la concentración crítica de coalescencia, la recuperación obtenida fue de un 74% aproximadamente.
- iv. La ley de Cu en función del gas holdup aumentó con el aumento del gas holdup hasta un valor óptimo (la cual disminuyó al continuar aumentando el ε_g). Esta conducta se debió a la contribución por arrastre hidráulico a la recuperación total.
- v. Se concluyó que la contribución de la flotación verdadera respecto a la recuperación total aumenta a mayores valores de gas holdup, yendo desde un valor aproximado de 10% ($\varepsilon_{g[0]}$) hasta alcanzar un valor de 50% ($\varepsilon_{g[ccc]}$). Se especula que a valores mayores a la concentración crítica de coalescencia, la contribución por entrainment debería tomar más importancia.
- vi. La constante cinética de flotación de Cu envuelve diferentes aspectos del proceso de flotación, viz., grado de liberación del mineral, grado de hidrofobización de la partícula, proporción óptima tamaño partícula-burbuja, aspecto fisicoquímico del sistema, entre otras. Consecuentemente, la concentración óptima de gas holdup no necesariamente se encuentra al valor de gas holdup asociado a la concentración crítica de coalescencia.
- vii. Con respecto a la selectividad de Cu frente a Fe, se vio que esta variable aumenta para mayores valores de concentración de aire, hasta alcanzar un valor estable aproximadamente en 2,1 (-). Este comportamiento se debe al hecho de que mayores diámetros de burbujas poseen velocidades de ascenso más altas, lo que induce a que no existe un tiempo suficiente para formar agregados los

cuales son los que permiten separar de forma selectiva partículas que tienen Cu de las que no.

- viii. Finalmente se modeló la relación que existe entre la concentración de aire y la concentración de espumante. Esto permitió establecer las condiciones de borde para concentración de aire para el sistema de flotación. Adicionalmente, la modelación generó los valores de la concentración crítica de coalescencia para los diferentes espumantes estudiados en base a la medida representativa de conductividad eléctrica realizada en la celda de flotación batch de laboratorio.
- ix. En base a todo lo anteriormente descrito, la hipótesis planteada para este estudio se corrobora.

5.2. Recomendaciones

Esta sección incluye sugerencias con relación a aspectos de esta área de investigación no cubiertos en el presente proyecto de memoria. En la opinión de este autor, las siguientes recomendaciones son de gran importancia abordarlas para desarrollos futuros:

- i. Mejorar la robustez y sofisticación del instrumento de medición de gas holdup, para asegurar que los valores medidos sean reproducibles y exactos.
- ii. Estudiar en mayor profundidad el efecto de la densidad de pulpa (% sólidos) en la estimación de gas holdup por medio de la conductividad eléctrica.
- iii. Analizar el efecto del tamaño de partícula (distribución de tamaño) sobre el gas holdup medido en sistema trifásico en celdas de flotación batch.
- iv. Observar el impacto que tienen distintas mezclas de espumantes sobre la concentración de aire en la zona de colección.
- v. Evaluar el efecto de la adición de agua de reposición con espumante.
- vi. Escalar la medición de conductividad eléctrica para estimar la concentración de aire en operación continua.
- vii. Trabajar a mayores concentraciones de espumantes para poder estimar los valores de CCC.
- viii. Validar modelo propuesto. Relacionar parámetros del modelo con variables operacionales.

6. REFERENCIAS

- [1] P. Moyo, «Characterization of frothers by water carrying rate,» McGill University, Montreal, 2005.
- [2] S. Bulatovic, Handbook of Flotation Reagents, Amsterdam: Elsevier Ltda., 2007.
- [3] B. Wills y J. Finch, Wills' mineral processing technology, Elsevier, 2015.
- [4] Y. Orozco, «Estudio del efecto del tipo y concentración de espumante en la selectividad del proceso de flotación a escala laboratorio,» Univerisdad de Chile, Santiago, 2012.
- [5] F. Azgomi, «Characterizing frothers by their bubble size control properties,» McGill , Montreal, 2006.
- [6] A. Nguyen y G. Evans, «Attachment interaction between air bubbles and particles in froth flotation,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, nº 28, pp. 381-385, 2004.
- [7] M. Fuerstenau, J. Miller y M. Kuhn, Chemistry of Flotation, New York: Soc of Mining Engineers of AIME, 1985.
- [8] C. Segovia, «Evaluación técnica económica de la incorporación de un espumante alternativo para optimizar la flotación primaria,» UCN, Antofagasta, 2013.
- [9] S. Castro, «Flotación: Fundamentos y Aplicaciones,» UDEC, Concepción .
- [10] H. Nurul y Z. b. Zakaria, «Computational approach for a pair of bubble coalescence process,» *International Journal of Heat and Fluid Flow*, nº 32, pp. 755-761, 2011.
- [11] J. Jiao y H. Young, «Influence of acoustic pressure and bubble sizes on the coalescence of two contacting bubbles in an acoustic field,» *Ultrasonics Sonochemistry*, nº 22, pp. 70-77, 2015.
- [12] P. Ghosh, Colloid and Interface science, New Delhi: PHI Learning, 2009.
- [13] A. Bell y J. Pritchard, «The Marangoni Effect and Liquid/Liquid Coalescence,» *Nature*, vol. 191, p. 488, 1961.
- [14] R. Probstein, Physicochemical Hydrodynamics, 1989.
- [15] J. Finch, J. Nasset y C. Acuña, «Role of frother on bubble production and behaviour in flotation,» *Minerals Engineering*, 2008.
- [16] T. Sanada, M. Watanabe y T. Fukano, «Effects of viscosity on coalescence of a

- bubble upon impact,» *Chemical Engineering Science*, nº 60, pp. 5372-5384, 2005.
- [17] CYTEC, Mining Chemicals HANDBOOK, 2002.
- [18] F. Melo y J. S. Laskowski, «Fundamental properties of flotation frothers,» *Minerals Engineering*, nº 19, pp. 766-773, 2006.
- [19] J. Finch, S. Gelinas y P. Moyo, «Frother-related research at McGill University,» *Minerals Engineering*, nº 19, pp. 726-733, 2006.
- [20] P. Smith y L. Warren, «Entrainment of Particles into Flotation Froths,» *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, vol. 5, pp. 123-145, 1989.
- [21] V. Ross, «Determination of the Contributions by True Flotation and Entrainment During the Flotation Process,» South Africa, 1989.
- [22] K. Rodel, «Proof of boundary surface water and its effect on colloidal-chemical,» pp. 141-148, 1981.
- [23] L. Wang, Y. Peng, K. Runge y D. Bradshaw, «A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors,» *Minerals Engineering*, nº 70, pp. 77-91, 2015.
- [24] W. Trahar, «A Rational Interpretation of the Role of Particle Size in Flotation,» *International Journal of Mineral Processing*, nº 8, pp. 289-327, 1981.
- [25] L. Warren, «Determination of the Contributions of True Flotation and Entrainment in Batch Flotation Tests,» *International Journal of Mineral Processing*, nº 14, pp. 33-44, 1985.
- [26] O. Savassi, D. Alexander, J. Franzidis y E. Manlapig, «An Empirical Model for Entrainment in Industrial Flotation Plants,» *Minerals Engineering*, vol. 11, nº 3, pp. 243-256, 1998.
- [27] I. M. Garrido, «EFECTO DE REACTIVOS QUÍMICOS EN LA FLOTACIÓN DE PIRITA EN PRESENCIA DE Cu^{2+} ,» USM, Valparaíso, 2018.
- [28] M. Vera, J.-P. Franzidis y E. V. Manlapig, «Estimation of froth zone recovery in flotation cells,» *JKMRC*, pp. 259-263, 2001.
- [29] J. Finch y G. Dobby, Column Flotation, California: Pergamon Press, 1990.
- [30] J. Finch y G. Dobby, «Column Flotation: A selected review. Part 1,» *International Journal of Mineral Processing*, nº 33, pp. 343-354, 1991.
- [31] J. Hernandez-Aguilar, C. Gomez y J. Finch, «A technique for the direct measurement of bubble size distributions in industrial flotation cells,» de *Proceedings 34 Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Ottawa,

2002.

- [32] B. Gorain, J. Franzidis y E. Manlapig, «Effect of bubble surface area flux on flotation performance,» *Minerals Engineering*, vol. 10, nº 4, pp. 367-379, 1997.
- [33] D. Alexander, K. Runge, J. Franzidis y E. Manlapig, «The application of multi-component floatability models to full-scale flotation circuits,» de *7th Mill Operators Conference (MOC)*, Kalgoorlie, WA, 2000.
- [34] J. Finch, J. Xiao, C. Hardie y C. Gomez, «Gas Dispersion Properties: Bubble Surface Area Flux and Gas Holdup,» *Minerals Engineering*, vol. 13, nº 4, pp. 365-372, 2000.
- [35] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Londres: Oxford, 1873.
- [36] F. Cortés-López, «Design of a Gas Holdup Sensor for Flotation Diagnosis,» McGill University, Montreal, 1998.
- [37] H. Jin, S. Yang, M. Wang y R. Williams, «Measurement of gas holdup profiles in a gas liquid cocurrent bubble column,» *Flow Measurement and Instrumentation*, nº 18, pp. 191-196, 2007.
- [38] Z. Gong, A. Zhao, L.-S. Zhai y Y.-Y. Re, «Ultrasonic method for measuring the gas holdup of gas-liquid bubbly flow,» *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 33, nº 4, pp. 1170-1180, 2016.
- [39] R. Grau, J. Laskowski y K. Heiskanen, «Effect of frothers on bubble size,» *Mineral Processing*, nº 76, pp. 225-233, 2005.
- [40] S. Banisi, J. Finch y A. Laplante, «Effect of solid particles on gas holdup in flotation columns - ii. Investigation of mechanisms of gas holdup reduction in presence of solids,» *Chemical Engineering Science*, vol. 50, nº 14, pp. 2335-2342, 1995.
- [41] F. Azgomi, C. Gomez y J. Finch, «Characterizing Frothers Using Gas Hold-up,» *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 46, nº 3, pp. 237-242, 2007.
- [42] K. Malysa, «Surface elasticity and frothability of n-octanol and n-octanoic acid solutions,» *Colloids and Surfaces*, nº 3, pp. 329-338, 1981.
- [43] K. Malysa, K. Lukenheimer, R. Miller y C. Hempt, «Surface elasticity and dynamic stability of wet foams,» *Colloids and Surfaces*, nº 16, pp. 9-20, 1985.
- [44] M. Xu, J. Finch y A. Uribe-Salas, «Maximum gas and bubble surface rates in flotation columns,» *Mineral Processing*, nº 32, pp. 233-250, 1991.
- [45] E. Iglesias, J. Anderrez, A. Forgiarini y J.-L. S. , «A new method to estimate the stability of short-life foams,» *Colloids and Surfaces*, nº 98, pp. 167-174, 1995.

- [46] B. Comley, P. Harris, D. Bradshaw y M. Harris, «Frother characterisation using dynamic surface tension measurement,» *Mineral Processing*, nº 64, pp. 81-100, 2002.
- [47] J. Tucker, D. Deglon, J. Franzidis, M. Harris y C. O'connor, «An evaluation of direct method of bubble size distribution measurement in a laboratory batch flotation cell,» *Minerals Engineering*, vol. 7, nº 5/6, pp. 667-680, 1994.
- [48] J. R. Hernandez Aguilar, «An imaging technique for sizing bubbles in flotation systems,» McGill University, Montreal, 2004.
- [49] Y.-l. Gu, Q.-m. Feng y L.-m. Ou, «A new method of testing frother performance,» *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, nº 23, pp. 2776-2780, 2013.
- [50] A. Gupta y D. Yan, *Mineral Processing Design and Operations*, Perth: Elsevier, 2015.
- [51] P. Mavros y K. Matis, «Flotation Kinetics,» de *Innovations in Flotation Technology*, Springer, Dordrecht, 1992, pp. 183-210.
- [52] O. Levenspiel, *Ingeniería de la reacciones químicas*, Barcelona: Reverté, 1986.
- [53] J. Y. B-, «Flotación de minerales,» UTFSM, Valparaíso, 2005.
- [54] S. Narasinhham y C. Jordache, *The importance of data reconciliation and gross error detection*, 2000.
- [55] R. Durazo, *Propagación del error*, México : UABC facultad de ciencias marinas, 2016.
- [56] D. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, México: Limusa, 2004.
- [57] L. Vinnett, J. Yianatos y M. Alvarez, «Gas dispersion measurements in mechanical flotation cells: Industrial experience in Chilean concentrators,» *Minerals Engineering*, vol. 57, pp. 12-15, 2014.
- [58] M. Vera, *Modelo propuesto a partir de comunicación privada*, Valparaíso, 2020.
- [59] E. Sada, H. Kumazawa y C. Lee, «Influences of Suspended Fine Particles on Gas Holdup and Mass Transfer Characteristics in a Slurry Bubble Column,» Department of Chemical Engineering, Kyoto, 1986.
- [60] D. Peterson, R. Tankin y S. Bankoff, «Bubble Behavior in a Three-Phase Fluidized Bed,» *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 13, nº 4, pp. 477-491, 1987.

7. APÉNDICES

Set de experimentos

Tabla 41. Set de flotaciones batch desarrolladas en el laboratorio.

FLOT. N°	pH Celda	Molino			Acondicionamiento
		Colector 1	Moly	Colector 2	Espumante
1	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	MIBC; 5 ppm 19 µl
2	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	F-501; 5 ppm 16 µl
3	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	F-549; 5 ppm 15 µl
4	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	F-507; 5 ppm 14 µl
5	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	MIBC; 10 ppm 37 µl
6	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	F-501; 10 ppm 33 µl
7	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	F-549; 10 ppm 29 µl
8	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	F-507; 10 ppm 29 µl
9	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	MIBC; 15 ppm 56 µl
10	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	F-501; 15 ppm 49 µl
11	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	F-549; 15 ppm 44 µl
12	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	F-507; 15ppm 43 µl
13	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 µl	Diesel; 20 g/t 27 µl	AP-6404; 10 g/t 10,4 µl	MIBC; 20 ppm 74 µl
14	9,5	AP-9950; 15 g/t	Diesel; 20 g/t	AP-6404; 10 g/t	F-501; 20 ppm

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

		19 μ l	27 μ l	10,4 μ l	65 μ l
15	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 μ l	Diesel; 20 g/t 27 μ l	AP-6404; 10 g/t 10,4 μ l	F-549; 20 ppm 58,8 μ l
16	9,5	AP-9950; 15 g/t 19 μ l	Diesel; 20 g/t 27 μ l	AP-6404; 10 g/t 10,4 μ l	F-507; 20 ppm 58 μ l

Tablas de datos de pruebas realizadas

Tabla 42. Medición de conductividad a distintos J_g sin espumante.

Flujo [l/min]	J_g [cm/s]	Conductividad [mS]	ε_g [%]	Desv. Estándar
0	0,00	3,34	0,00	0,00
2	0,16	3,27	1,51	0,10
4	0,32	3,22	2,56	0,12
6	0,49	3,16	3,72	0,10
8	0,65	3,12	4,62	0,12
10	0,81	3,09	5,25	0,12

Tabla 43. Datos $\varepsilon_g - J_g$ para distintas concentraciones de MIBC.

Concentración de espumante [ppm]	J_g [cm/s]	ε_g [%]	Desv. Estándar
5	0,00	0,00	0,00
	0,16	2,91	0,39
	0,32	4,33	0,19
	0,49	5,39	0,13
	0,65	6,46	0,16
	0,81	7,23	0,20
10	0,00	0,00	0,00
	0,16	3,66	0,11
	0,32	5,43	0,18
	0,49	6,68	0,39
	0,65	8,15	0,39
	0,81	9,22	0,52
15	0,00	0,00	0,00
	0,16	4,57	0,18
	0,32	6,59	0,05
	0,49	8,36	0,14
	0,65	9,58	0,17
	0,81	10,74	0,20
20	0,00	0,00	0,00
	0,16	5,19	0,11

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

	0,32	7,29	0,10
	0,49	8,88	0,30
	0,65	10,37	0,13
	0,81	11,38	0,15

Tabla 44. Datos $\varepsilon_g - J_g$ para distintas concentraciones de F501.

Concentración de espumante [ppm]	J_g [cm/s]	ε_g [%]	Desv. Estándar
5	0,00	0,00	0,00
	0,16	3,48	0,29
	0,32	5,23	0,14
	0,49	6,34	0,20
	0,65	7,16	0,20
	0,81	8,14	0,06
10	0,00	0,00	0,00
	0,16	4,64	0,22
	0,32	6,58	0,22
	0,49	7,78	0,22
	0,65	8,87	0,13
	0,81	9,82	0,12
15	0,00	0,00	0,00
	0,16	4,97	0,34
	0,32	7,00	0,19
	0,49	8,40	0,07
	0,65	9,59	0,27
	0,81	10,72	0,27
20	0,00	0,00	0,00
	0,16	5,33	0,02
	0,32	7,43	0,16
	0,49	8,81	0,07
	0,65	10,13	0,09
	0,81	11,17	0,04

Tabla 45. Datos $\varepsilon_g - J_g$ para distintas concentraciones de F549.

Concentración de espumante [ppm]	J_g [cm/s]	ε_g [%]	Desv. Estándar
5	0,00	0,00	0,00
	0,16	3,32	0,18
	0,32	5,28	0,28
	0,49	6,50	0,29
	0,65	7,74	0,38
	0,81	9,18	0,09

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

10	0,00	0,00	0,00
	0,16	5,06	0,02
	0,32	7,33	0,10
	0,49	8,71	0,10
	0,65	10,25	0,14
	0,81	11,33	0,10
15	0,00	0,00	0,00
	0,16	5,62	0,13
	0,32	7,79	0,10
	0,49	9,73	0,14
	0,65	11,43	0,11
	0,81	12,33	0,24
20	0,00	0,00	0,00
	0,16	5,65	0,13
	0,32	8,21	0,11
	0,49	10,21	0,12
	0,65	11,64	0,07
	0,81	12,88	0,06

Tabla 46. Datos $\varepsilon_g - J_g$ para distintas concentraciones de F507.

Concentración de espumante [ppm]	J_g [cm/s]	ε_g [%]	Desv. Estándar
5	0,00	0,00	0,00
	0,16	4,25	0,33
	0,32	6,10	0,15
	0,49	7,28	0,23
	0,65	8,69	0,22
	0,81	9,61	0,20
10	0,00	0,00	0,00
	0,16	5,31	0,09
	0,32	7,61	0,08
	0,49	9,24	0,06
	0,65	10,97	0,07
	0,81	12,14	0,05
15	0,00	0,00	0,00
	0,16	5,62	0,04
	0,32	8,07	0,03
	0,49	10,16	0,18
	0,65	11,72	0,21
	0,81	13,08	0,08
20	0,00	0,00	0,00
	0,16	6,25	0,07
	0,32	9,08	0,07

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

	0,49	11,22	0,16
	0,65	13,12	0,15
	0,81	14,33	0,13

Tabla 47. Cinética de flotación para MIBC a 5 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	80,85	7,03	4,23	4,23	56,10	6,83	6,83	26,67
2-4	17,41	8,54	2,58	3,94	63,47	6,94	6,85	32,51
4-6	8,62	9,29	1,64	3,75	65,79	5,24	6,72	34,69
6-8	15,88	10,67	1,27	3,43	69,09	4,73	6,46	38,33
8-12	40,89	14,23	0,83	2,78	74,67	2,80	5,55	43,86
Relave	986,36		0,16	0,53		1,18	1,80	

Tabla 48. Cinética de flotación para F501 a 5 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	92,51	8,04	3,38	3,38	51,30	6,06	6,06	27,08
2-4	17,68	9,58	2,54	3,25	58,67	6,70	6,16	32,80
4-6	5,91	10,10	1,62	3,16	60,24	5,37	6,12	34,34
6-8	17,43	11,61	0,75	2,85	62,38	2,82	5,69	36,71
8-12	69,22	17,63	0,32	1,99	66,06	1,41	4,23	41,44
Relave	947,25		0,22	0,53		1,28	1,80	

Tabla 49. Cinética de flotación para F549 a 5 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	106,81	9,29	2,88	2,88	50,48	4,26	4,26	21,98
2-4	21,51	11,16	2,17	2,76	58,14	6,39	4,62	28,62
4-6	24,44	13,28	1,56	2,57	64,40	5,13	4,70	34,68
6-8	13,50	14,46	1,30	2,47	67,27	4,72	4,70	37,76
8-12	58,95	19,58	0,39	1,92	71,04	1,70	3,92	42,60
Relave	924,79		0,19	0,53		1,28	1,80	

Tabla 50. Cinética de flotación para F507 a 5 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	118,00	10,26	2,95	2,95	57,11	4,87	4,87	27,76

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

2-4	18,59	11,88	2,70	2,92	65,35	7,03	5,16	34,06
4-6	13,08	13,01	1,55	2,80	68,67	5,10	5,16	37,29
6-8	12,61	14,11	1,00	2,66	70,74	3,47	5,03	39,40
8-12	42,14	17,78	0,40	2,19	73,48	1,63	4,33	42,73
Relave	945,58		0,17	0,53		1,25	1,80	

Tabla 51. Cinética de flotación para MIBC a 10 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	99,31	8,64	2,92	2,92	47,60	3,92	3,92	18,81
2-4	24,10	10,73	2,15	2,77	56,08	6,00	4,33	25,79
4-6	34,16	13,70	1,27	2,44	63,20	4,62	4,39	33,42
6-8	23,31	15,73	1,10	2,27	67,41	4,25	4,37	38,21
8-12	43,46	19,51	0,38	1,90	70,09	3,16	4,14	44,84
Relave	925,66		0,20	0,53		1,23	1,80	

Tabla 52. Cinética de flotación para F501 a 10 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	107,06	9,31	2,70	2,70	47,43	3,97	3,97	20,53
2-4	25,25	11,51	2,18	2,60	56,47	6,10	4,38	27,98
4-6	24,80	13,66	1,52	2,43	62,65	5,24	4,51	34,26
6-8	16,36	15,08	1,02	2,30	65,39	3,92	4,46	37,36
8-12	52,86	19,68	0,36	1,84	68,50	1,60	3,79	41,44
Relave	923,68		0,21	0,53		1,31	1,80	

Tabla 53. Cinética de flotación para F549 a 10 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	117,20	10,19	2,83	2,83	54,42	4,87	4,87	27,57
2-4	20,41	11,97	2,50	2,78	62,79	6,49	5,11	33,96
4-6	16,99	13,44	1,38	2,63	66,64	4,72	5,07	37,84
6-8	16,97	14,92	1,24	2,49	70,09	4,50	5,01	41,52
8-12	37,90	18,22	0,66	2,16	74,22	2,45	4,55	46,01
Relave	940,53		0,17	0,53		1,19	1,80	

Tabla 54. Cinética de flotación para F507 a 10 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica	Ley Cu [%]	Ley Acum.	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe	Rec. Fe [%]
--------------	----------	-------------	------------	-----------	-------------	------------	--------------	-------------

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

		[%]		Cu [%]			[%]	
0-2	125,45	10,91	2,46	2,46	50,64	4,04	4,04	24,48
2-4	30,86	13,59	2,03	2,38	60,92	5,61	4,35	32,84
4-6	24,11	15,69	1,12	2,21	65,35	4,45	4,36	38,02
6-8	17,84	17,24	1,05	2,10	68,42	4,25	4,35	41,68
8-12	26,41	19,54	0,55	1,92	70,82	2,35	4,12	44,68
Relave	925,33		0,19	0,53		1,24	1,80	

Tabla 55. Cinética de flotación para MIBC a 15 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	98,84	8,59	3,75	3,75	60,80	6,48	6,48	30,94
2-4	24,67	10,74	2,06	3,41	69,12	5,51	6,29	37,50
4-6	19,90	12,47	1,27	3,11	73,26	4,14	5,99	41,48
6-8	24,49	14,60	1,01	2,81	77,32	3,87	5,68	46,06
8-12	41,27	18,19	0,77	2,40	82,53	2,97	5,14	51,98
Relave	940,84		0,11	0,53		1,06	1,80	

Tabla 56. Cinética de flotación para F501 a 15 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	97,27	8,46	3,34	3,34	53,29	6,01	6,01	28,23
2-4	35,43	11,54	1,98	2,98	64,79	4,94	5,72	36,69
4-6	15,11	12,85	1,31	2,81	68,03	4,26	5,57	39,80
6-8	14,33	14,10	1,18	2,66	70,81	4,45	5,47	42,88
8-12	40,55	17,62	0,50	2,23	74,16	2,06	4,79	46,92
Relave	947,31		0,17	0,53		1,16	1,80	

Tabla 57. Cinética de flotación para F549 a 15 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	136,71	11,89	3,71	3,71	67,58	5,14	5,14	33,94
2-4	18,76	13,52	2,75	3,60	74,46	6,51	5,30	39,84
4-6	6,91	14,12	1,26	3,50	75,62	4,48	5,27	41,34
6-8	17,50	15,64	1,10	3,26	78,17	4,30	5,18	44,98
8-12	27,64	18,05	0,81	2,94	81,17	3,20	4,91	49,25
Relave	942,47		0,15	0,65		1,11	1,80	

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 58. Cinética de flotación para F507 a 15 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	155,09	13,49	2,70	2,70	68,64	5,26	5,26	39,39
2-4	27,33	15,86	1,92	2,58	77,26	5,03	5,22	46,03
4-6	19,78	17,58	1,12	2,44	80,90	3,72	5,08	49,59
6-8	19,82	19,31	0,96	2,31	84,01	3,87	4,97	53,29
8-12	22,70	21,28	0,76	2,16	86,84	3,00	4,79	56,57
Relave	905,28		0,09	0,53		0,99	1,80	

Tabla 59. Cinética de flotación para MIBC a 20 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	124,48	10,82	2,45	2,45	50,11	3,48	3,48	20,95
2-4	27,55	13,22	2,62	2,48	61,94	5,87	3,92	28,76
4-6	28,61	15,71	1,19	2,28	67,53	4,51	4,01	35,00
6-8	30,17	18,33	0,95	2,09	72,24	3,93	4,00	40,72
8-12	37,71	21,61	0,81	1,89	77,23	3,25	3,88	46,64
Relave	901,49		0,15	0,53		1,23	1,80	

Tabla 60. Cinética de flotación para F501 a 20 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	125,73	10,93	2,40	2,40	49,55	3,35	3,35	20,36
2-4	35,47	14,02	2,12	2,34	61,86	4,57	3,62	28,19
4-6	35,10	17,07	1,17	2,13	68,62	3,89	3,67	34,78
6-8	19,10	18,73	0,96	2,03	71,63	3,71	3,67	38,21
8-12	25,69	20,97	0,73	1,89	74,69	3,00	3,60	41,93
Relave	908,90		0,17	0,53		1,32	1,80	

Tabla 61. Cinética de flotación para F549 a 20 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	182,27	15,85	1,77	1,77	52,93	2,94	2,94	25,92
2-4	28,71	18,35	2,70	1,90	65,63	5,67	3,31	33,78
4-6	29,24	20,89	1,05	1,79	70,69	3,98	3,39	39,40
6-8	20,36	22,66	0,96	1,73	73,89	3,90	3,43	43,23
8-12	29,87	25,26	0,87	1,64	78,14	3,57	3,45	48,38

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Relave	859,55		0,16	0,53		1,24	1,80	
--------	--------	--	------	------	--	------	------	--

Tabla 62. Cinética de flotación para F507 a 20 ppm.

Tiempo [min]	Masa [g]	Rec. Másica [%]	Ley Cu [%]	Ley Acum. Cu [%]	Rec. Cu [%]	Ley Fe [%]	Ley Acum. Fe [%]	Rec. Fe [%]
0-2	170,96	14,87	1,91	1,91	53,68	3,19	3,19	26,31
2-4	29,82	17,46	2,16	1,95	64,23	5,32	3,50	33,98
4-6	36,70	20,65	1,40	1,86	72,64	4,51	3,66	41,97
6-8	23,95	22,73	0,89	1,77	76,13	3,90	3,68	46,48
8-12	28,61	25,22	0,91	1,69	80,38	3,86	3,70	51,81
Relave	859,96		0,14	0,53		1,16	1,80	

Tabla 63. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de MIBC a 5 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	19,6	12,83	276,34
2-4	27,6	12,68	279,43
4-6	37,2	13,83	320,44
6-8	45,5	14,69	361,90
8-12	64,3	16,73	370,63

Tabla 64. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F501 a 5 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	21,4	12,11	292,59
2-4	28,7	10,31	343,65
4-6	35,4	11,00	402,68
6-8	43,3	11,70	454,58
8-12	67,0	14,23	435,91

Tabla 65. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F549 a 5 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	24,7	12,94	273,87
2-4	33,5	11,97	296,06
4-6	42,9	13,50	328,18
6-8	50,8	13,78	385,81
8-12	73,1	16,48	376,39

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 66. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F507 a 5 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	24,4	14,42	245,70
2-4	31,9	13,18	268,94
4-6	40,7	13,73	322,66
6-8	47,8	14,29	372,14
8-12	73,3	16,39	378,34

Tabla 67. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de MIBC a 10 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	22,9	15,17	233,68
2-4	32,1	16,28	217,72
4-6	43,3	16,84	263,09
6-8	54,6	17,97	295,86
8-12	73,7	20,12	308,29

Tabla 68. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F501 a 10 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	24,2	14,48	244,80
2-4	32,7	13,66	259,52
4-6	41,9	13,79	321,19
6-8	49,5	14,07	377,94
8-12	69,3	16,70	371,42

Tabla 69. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F549 a 10 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	24,8	14,90	237,84
2-4	33,0	14,76	240,10
4-6	43,2	15,75	281,32
6-8	52,8	16,32	325,84
8-12	72,4	17,46	355,23

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 70. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F507 a 10 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	26,4	16,70	212,24
2-4	37,5	16,84	210,47
4-6	49,0	16,98	260,91
6-8	58,9	17,12	310,52
8-12	73,5	17,83	347,92

Tabla 71. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de MIBC a 15 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	19,1	16,57	213,89
2-4	30,9	17,13	206,92
4-6	42,8	19,53	226,83
6-8	53,9	20,39	260,70
8-12	74,9	21,99	282,08

Tabla 72. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F501 a 15 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	19,5	15,15	233,92
2-4	30,7	15,42	229,79
4-6	41,7	15,15	292,40
6-8	53,4	15,97	332,90
8-12	69,3	17,90	346,45

Tabla 73. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F549 a 15 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	30,6	14,93	237,46
2-4	39,2	15,38	230,37
4-6	50,7	16,46	269,09
6-8	61,8	17,71	300,18
8-12	78,3	19,45	318,91

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 74. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F507 a 15 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	32,5	19,01	186,44
2-4	42,1	19,01	186,44
4-6	55,0	17,91	247,40
6-8	66,6	19,01	279,66
8-12	81,4	20,25	306,31

Tabla 75. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de MIBC a 20 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	23,3	20,24	206,27
2-4	32,3	20,62	202,38
4-6	42,7	21,28	245,22
6-8	53,1	21,80	287,18
8-12	75,3	22,59	323,32

Tabla 76. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F501 a 20 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	24,4	19,88	209,93
2-4	33,8	19,75	211,31
4-6	45,7	20,79	250,94
6-8	55,8	20,40	306,89
8-12	68,1	19,50	374,68

Tabla 77. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F549 a 20 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	31,7	20,57	202,89
2-4	37,8	19,55	213,54
4-6	46,6	19,93	261,79
6-8	59,2	20,19	310,15
8-12	79,1	19,80	368,87

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

Tabla 78. Datos de recuperación de agua, de gas holdup y diámetro de burbuja para cinética de flotación de F507 a 20 ppm.

Tiempo [min]	Rec. Agua [%]	ε_g [%]	Db [μm]
0-2	33,7	22,44	186,00
2-4	41,8	21,80	191,47
4-6	53,0	22,44	232,50
6-8	63,0	23,34	268,19
8-12	80,6	21,16	345,17

Tabla de errores relativos de variables

Tabla 79. Valores de desviaciones estándar relativas, DER (%). para las repeticiones realizadas con MIBC.

	Desviación estándar relativa (%)					
Tiempo (min)	Rec. de Cu (%)	Rec. de Fe (%)	Ley de Cu (%)	Ley de Fe (%)	Gas holdup (%)	Recuperación de agua (%)
2	2,33	6,56	10,10	5,84	3,84	9,97
4	7,70	2,79	8,95	4,53	4,96	2,92
6	21,09	17,02	2,52	2,01	3,15	15,23
8	9,58	9,82	3,12	5,39	1,89	8,73
12	0,89	3,24	1,61	4,52	0,90	1,23

Tabla 80. Valores de desviaciones estándar relativas, DER (%). Para las repeticiones realizadas con F501 .

	Desviación estándar relativa (%)					
Tiempo (min)	Recuperación de Cu (%)	Recuperación de Fe (%)	Ley de Cu (%)	Ley de Fe (%)	Gas holdup (%)	Recuperación de agua (%)
2	2,06	5,38	4,87	10,58	0,90	6,71
4	2,52	5,25	5,90	7,01	5,50	0,59
6	11,05	6,73	12,31	6,65	6,09	1,72
8	17,79	11,24	12,11	4,66	2,61	4,14
12	1,46	5,46	2,25	6,77	3,28	1,34

Ejemplo de cálculos

Cálculo de recuperación verdadera y por arrastre hidráulico.

Asumiendo que gráficamente se obtiene un valor de flotación verdadera de 10%, por lo tanto, ese porcentaje estaría representando la masa recuperada por TF.

Al entrar con este porcentaje a la **Figura 103** e interceptándolo con la curva se obtiene una recuperación metalúrgica aproximada de 64%. Por lo tanto, el 64 % de la recuperación metalúrgica está representado por flotación verdadera.

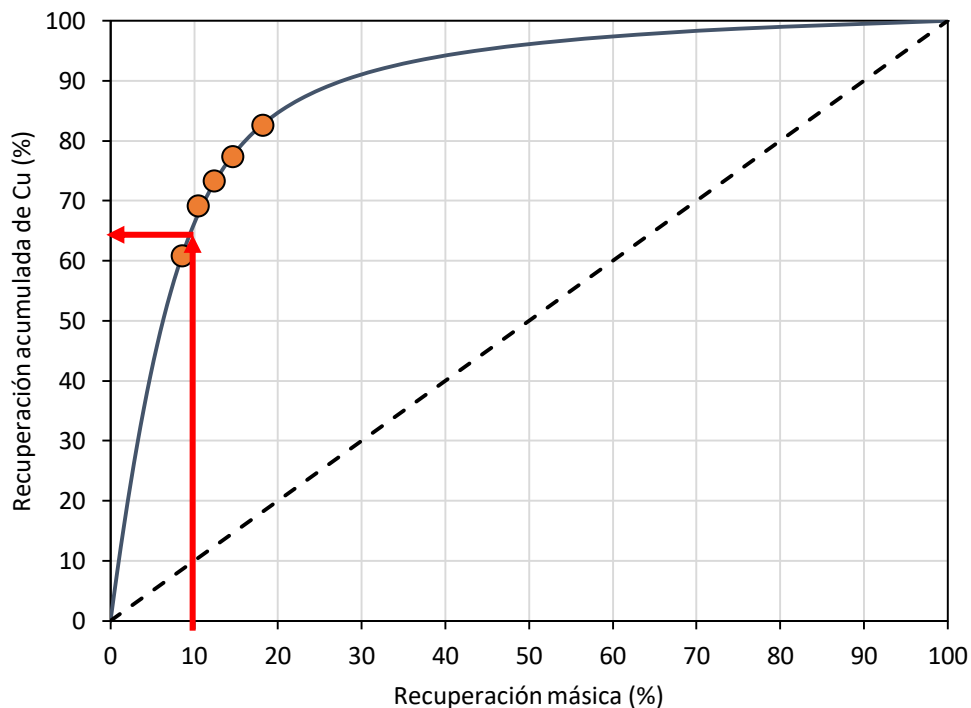


Figura 103. Gráfico de recuperación acumulada de Cu en función de la recuperación másica (i.e., Curva de separación).

La diferencia entre la recuperación de Cu obtenida por flotación verdadera y la recuperación máxima obtenida en el proceso, vendría dada por la recuperación de Cu obtenida por arrastre hidráulico.

Entonces si la recuperación total es del 82%, la recuperación representada por arrastre es 18%.

Figuras (diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante)

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

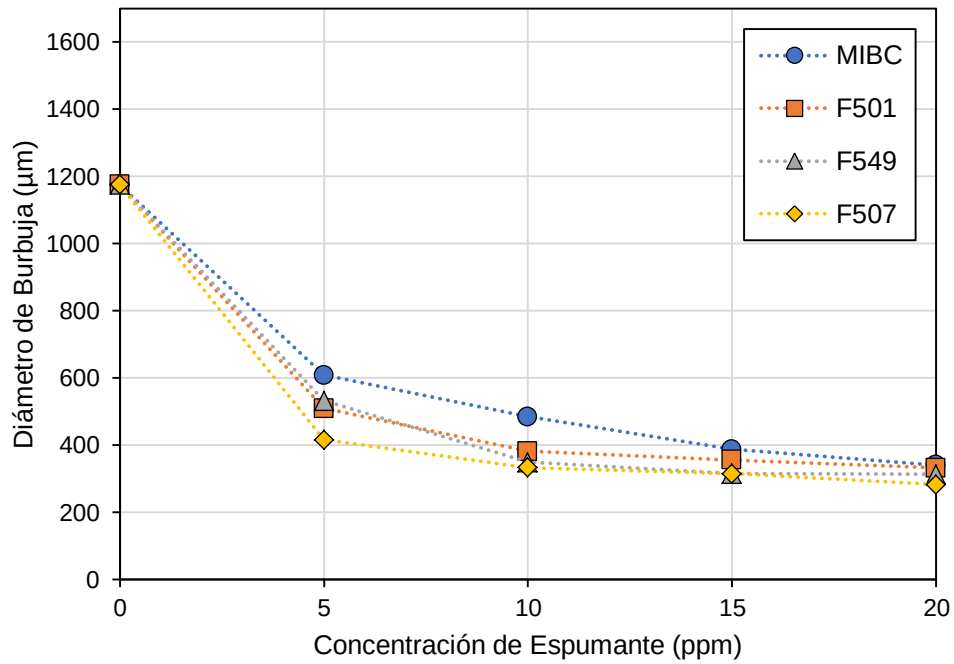


Figura 104. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fijo (2 [L/min]).

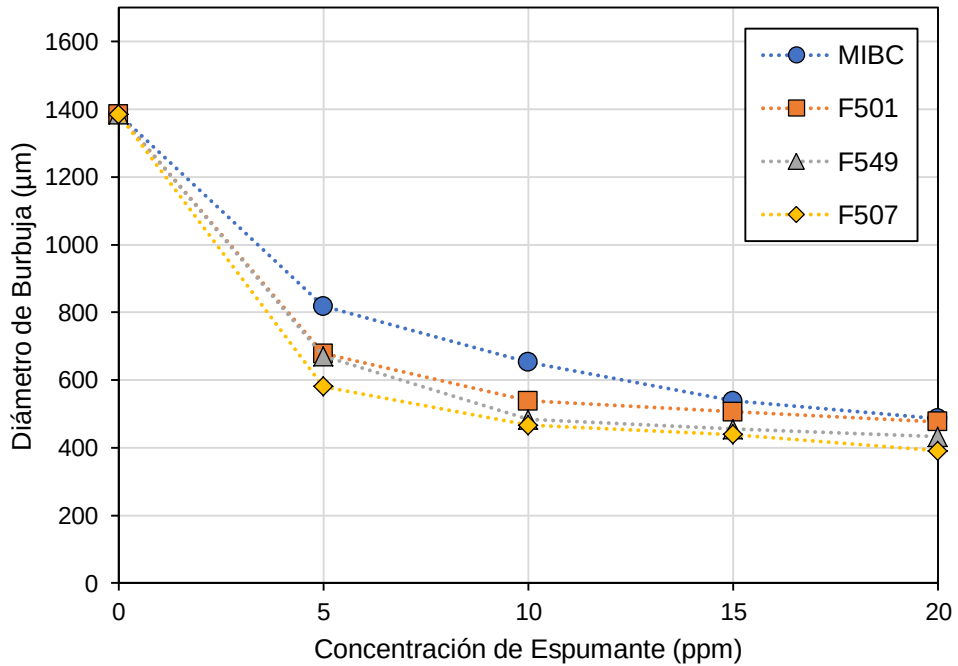


Figura 105. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fija (4 [L/min]).

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

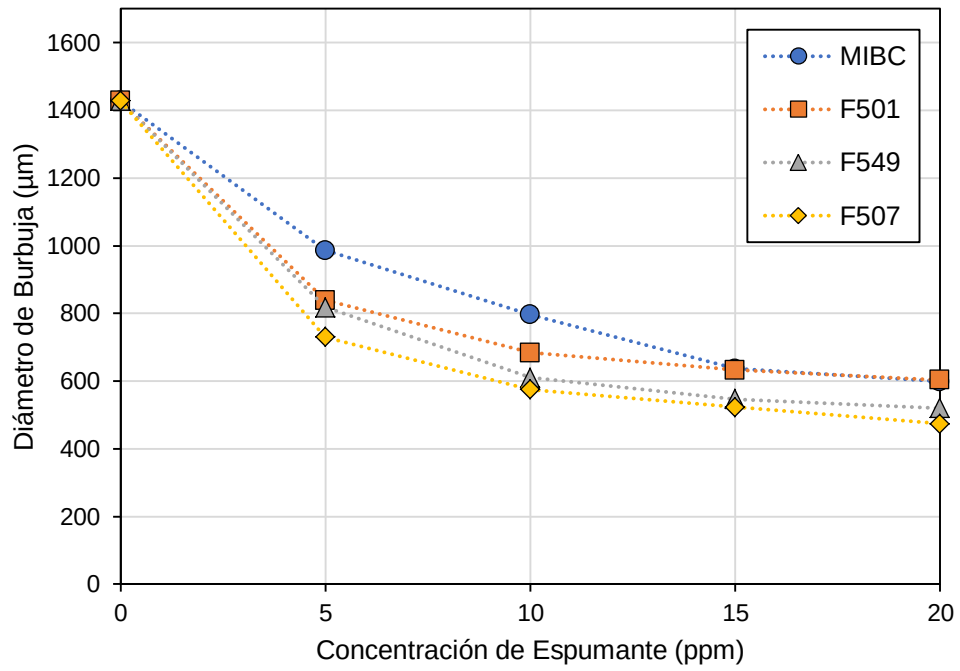


Figura 106. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fija (6 [L/min]).

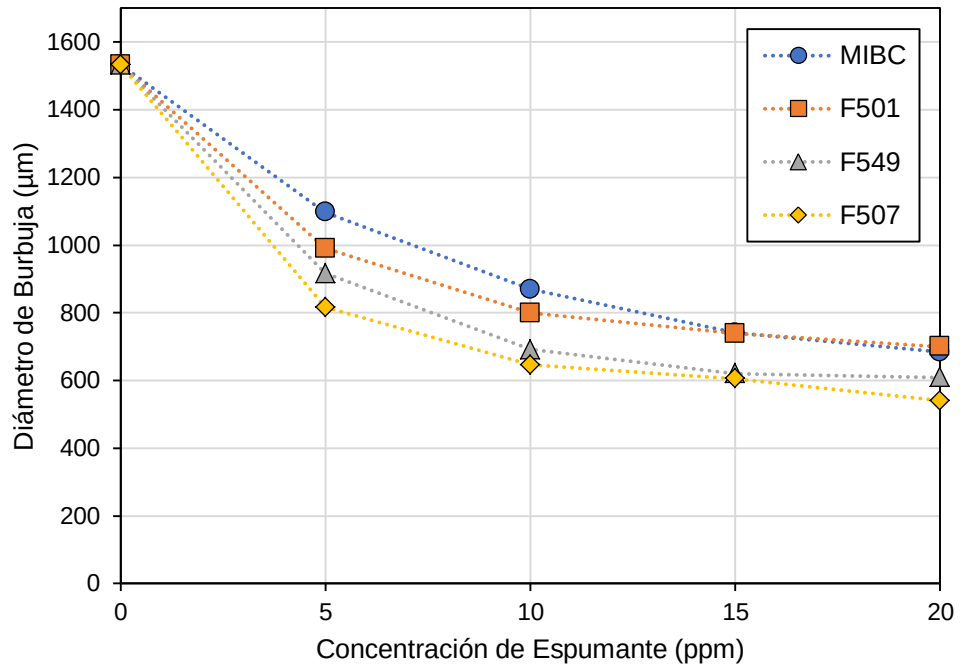


Figura 107. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fija (8 [L/min]).

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESPUMANTES EN CELDAS DE FLOTACIÓN

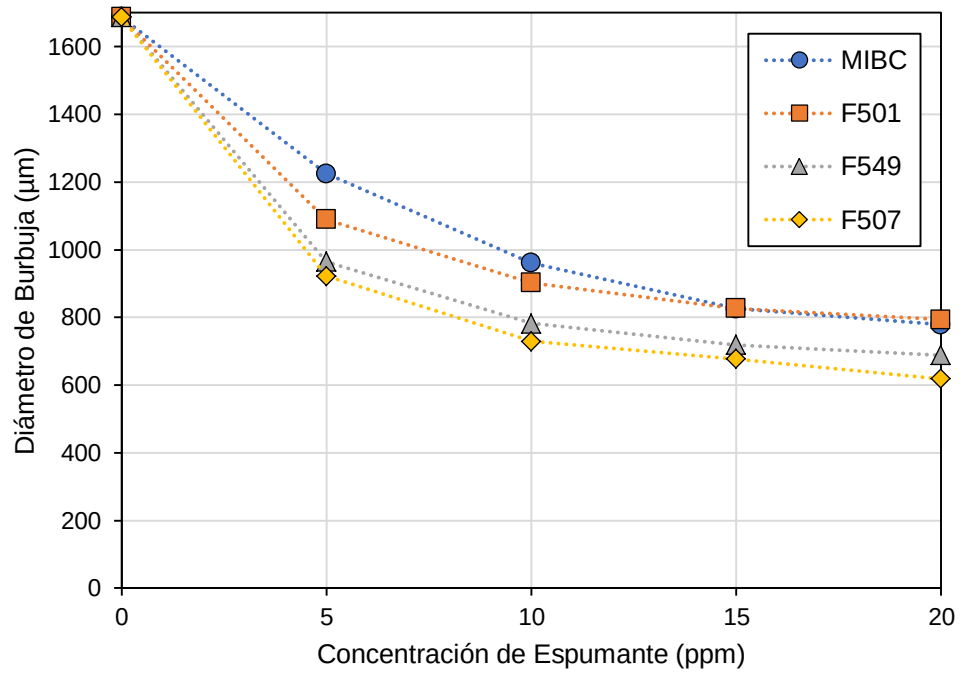


Figura 108. Diámetro de burbuja en función de la concentración de espumante a inyección de aire fija (10 [L/min]).