

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y AMBIENTAL

VALPARAISO – CHILE



Caracterización de la Hidrodinámica del Enjambre de Burbujas en Ductos Confinados para Aplicaciones en Flotación de Minerales

CONSTANZA ODETTE MELLA BURDILES

Memoria de Titulación para Optar al Título de Ingeniero Civil Químico

Profesor Guía

CLAUDIO ACUÑA PEREZ

Profesor Co-referente

MARCO VERA

Valparaíso, 2017

RESUMEN

En el proceso de flotación de minerales se usan tradicionalmente celdas de flotación mecánicas, y columnas de flotación en las etapas de limpieza. Entre los años 1980 y 2000, se innovó en el diseño de las máquinas de flotación con la implementación de celdas neumáticas de flujo descendente (i.e., downcomer), principalmente celdas tipo Jameson, Imhoflot™, y Ekoflot. Sin embargo, en la literatura técnica existe limitada evidencia experimental sobre las distribuciones de tamaño de burbuja generadas en equipos del tipo flujo descendente. En este contexto, el presente trabajo de memoria propone caracterizar experimentalmente la hidrodinámica del enjambre de burbujas en un dispositivo de laboratorio de flujo descendente equipado con cinematografía de alta velocidad, con el objetivo de evaluar la hipótesis referente a que es posible clasificar por tamaño las burbujas generadas al interior del downcomer debido al entorno hidrodinámico que proporciona este tipo de tecnología.

Las pruebas experimentales se desarrollaron en un sistema aire-agua utilizando un dispositivo especialmente diseñado en la UTFSM de flujo descendente (*laboratorio – 2.5 [L]*). La implementación de cinematografía de alta velocidad en el dispositivo y el desarrollo del algoritmo Bubble Analysis de Farías-Mella® permitió determinar las distribuciones de tamaño de burbuja (*BSD*), hold-up de aire (ϵ_g) y flujo superficial de área de burbuja (S_b). Para evaluar la clasificación del equipo de laboratorio, se utilizaron espumantes del tipo alcohol alifático (MIBC) y poliglicol (OrePrep® F-507) a concentraciones de 0 – 0.05 – 0.5 [*mmol/L*], respectivamente; dos niveles flujos de alimentación descendente de líquido de 50 y 100 [*mL/s*], dos tipos de inyectores correspondiente a un difusor de alúmina permeable y un capilar de acero inoxidable de 400 [μm] de diámetro, y tres posiciones de muestreo a lo largo del downcomer (*Top – Middle – Bottom*). Adicionalmente, para describir el comportamiento del enjambre de burbujas en ductos confinados se empleó el análisis de Drift Flux.

Los resultados obtenidos revelaron que el dispositivo de flujo descendente actúa como un clasificador de tamaño de burbujas dependiendo de la distancia al punto de inyección, gracias al entorno hidrodinámico que proporciona este tipo de tecnología. Lo anterior, se basa en el equilibrio de velocidades superficiales de líquido y gas en el downcomer. En relación al tipo de surfactante, cuando se utilizó OrePrep® F-507 se le confirió a la burbuja una mayor estabilidad,

rigidez y resistencia a la ruptura, y, en consecuencia, se reportó una menor formación de burbujas pequeñas. Frente a un aumento de la concentración de espumante, la distribución de tamaño de burbuja se estabilizó debido a la función del tensoactivo de evitar y/o retardar la coalescencia. Con respecto al flujo de alimentación de líquido, cuando se incrementó de 50 a 100 [mL/s] se indujo a una ruptura mayor de las burbujas de gran tamaño asistida por el fenómeno de coalescencia, junto con presentarse un desplazamiento de las curvas de distribución de tamaño de burbuja hacia la derecha, reportándose así mayores tamaños de burbujas para las posiciones de muestreo *Top – Middle – Bottom*, en comparación a la condición de operación de 50 [mL/s]. Los resultados obtenidos para los dos tipos de inyectores utilizados, muestran una distribución inversa en relación al volumen de aire alimentado al interior del equipo, donde más del 40% del volumen de aire fue estimado en la parte inferior del dispositivo de flujo descendente cuando se empleó el difusor de alúmina permeable. Por el contrario, el capilar mostró que más del 80% del volumen de aire alimentado fue atribuido a la parte superior del equipo.

Al mismo tiempo, se estableció una metodología para la estimación del diámetro de burbuja empleando el análisis de Drift Flux, y se validó a través de información disponible en la literatura para columnas de flotación operando en forma contracorriente. El análisis de esta información arrojó un error menor al 12% en la estimación, proponiéndose de esta forma que las ecuaciones implicadas en el análisis de Drift Flux integren el efecto de la hidrodinámica del equipo de flotación, el efecto del tipo y concentración del surfactante en el coeficiente de roce y la exploración de nuevas funciones para el parámetro m .

Para finalizar, las contribuciones de esta investigación de memoria correspondieron al desarrollo de un algoritmo de procesamiento de imágenes mejorado, junto con el desarrollo de un algoritmo para la determinación del tamaño de burbuja empleando el análisis de Drift Flux. Como resultado del análisis de los parámetros hidrodinámicos obtenidos para el dispositivo de flujo descendente, se recomendó la introducción de un nuevo sistema de flotación llamado “sleeve”, el cual consistiría en un downcomer con un difusor adosado a la parte inferior, que gracias al control de los flujos de alimentación de líquido y gas podría diseñar distribuciones de tamaño de burbujas específicas para una aplicación dada.

ABSTRACT

In the mineral flotation process mechanical flotation cells are traditionally used, and flotation columns in the cleaning stages. Between the years 1980 and 2000, the design of flotation machines was innovated with the implementation of pneumatic downflow cells (i.e., downcomer), mainly Jameson, Imhoflot™, and Ekoflot cells. However, in the technical literature there is limited experimental evidence about the bubble size distributions generated by downflow type equipment. In this context, the present thesis work proposes to characterize experimentally the hydrodynamics of the bubbles swarm in a downflow laboratory device equipped with high-speed cinematography, with the objective of evaluating the hypothesis relating to that it is possible to classify by size the bubbles generated inside of the downcomer due to hydrodynamic environment that provides this type of technology.

Experimental tests were developed in an air-water system using a downflow device specially designed by UTFSM (*laboratory* – 2.5 [L]). The implementation of high-speed cinematography on the device and the development of the Bubble Analysis Algorithm by Farías-Mella® allowed to determine the bubble size distribution (*BSD*), gas hold-up (ϵ_g) and bubble surface area flux (S_b). To evaluate the classification of laboratory equipment, aliphatic alcohol (MIBC) and polyglycol (OrePrep® F-507) frothers were used at concentrations of 0 – 0.05 – 0.5 [mmol/L], respectively; two levels of downward liquid feed flows of 50 and 100 [mL/s], two types of injectors corresponding to a permeable alumina diffuser and a stainless steel capillary of 400 [μ m] in diameter, and three sampling positions as length of the downcomer (*Top* – *Middle* – *Bottom*). Additionally, Drift Flux Analysis was used to describe the behavior of the bubble swarm in confined ducts.

The results obtained revealed that the downflow device acts as a bubble size classifier depending on the distance to the injection point, this is due to the hydrodynamic environment that provides this type of technology. The above, is based on the balance of superficial velocities of liquid and gas in the downcomer. In relation to the type of surfactant, when OrePrep® F-507 was used, the bubble was given greater stability, rigidity and resistance to rupture, and, consequently, less formation of small bubbles was reported. Against an increase

in the frother concentration, the bubble size distribution was stabilized due to the function of the surfactant to avoid and/or retard coalescence. Regarding to the liquid feed flow, when it was increased from 50 to 100 [mL/s], a greater breakage of large bubbles assisted by the phenomenon of coalescence was induced, along with presenting a displacement of the bubble size distribution curves to the right, and thus, larger bubble sizes are reported for *Top – Middle – Bottom* sampling positions in comparison to the operation condition of 50 [mL/s]. The results obtained for the two types of injectors used show an inverse distribution in relation to the volume of air fed into the equipment, where more than 40% of the volume of air was estimated in the lower part of the downflow device when it was used the permeable alumina diffuser. On the contrary, the capillary showed that more than 80% of the volume of air fed was attributed to the upper part of the equipment.

At the same time, a methodology was established for the estimation of the bubble diameter using the Drift Flux Analysis, and it was validated through information available in the literature for countercurrent flotation columns. The analysis of this information threw less than 12% error in the estimation, proposing in this way that the equations involved in the Drift Flux Analysis integrate the effect of the hydrodynamics of the flotation equipment, the effect of the type and concentration of the surfactant on the coefficient of friction and the exploration of new functions for the parameter m .

Finally, the contributions of this thesis work corresponded to the development of an improved image processing algorithm, along with the development of an algorithm for the determination of bubble size using the Drift Flux Analysis. As a result of the analysis of the hydrodynamic parameters obtained for the downflow device, it was recommended the introduction of a new flotation system called "sleeve", which would consist of a downcomer with a diffuser attached to the bottom, that by to the control of the liquid and gas feed flows could design specific bubble size distributions for a given application.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	5
1.1	Antecedentes Generales	5
1.2	Descripción de la Problemática	7
1.3	Objetivos del Trabajo de Memoria	8
1.3.1	Objetivo General.....	8
1.3.2	Objetivos Específicos	9
1.4	Organización del Trabajo de Memoria	9
2	REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA	11
2.1	Parámetros de Dispersión de Gas	11
2.1.1	Velocidad superficial de gas (Jg , [cm/s]).....	12
2.1.2	Hold-up de gas (ϵg , [%]).....	15
2.1.3	Distribución de Tamaño de Burbuja (BSD, [mm])	38
2.1.4	Flujo Superficial de Área de Burbuja (Sb , [$s - 1$]).....	39
2.1.5	Rangos de Operación.....	40
2.2	Reactivos de Flotación.....	41
2.2.1	Colector	41
2.2.2	Espumante	44
2.3	Equipos de Flotación.....	64
2.3.1	Celdas Mecánicas o Convencionales.....	65
2.3.2	Celdas Neumáticas	66
3	HIDRODINÁMICA EN TUBOS CONFINADOS.....	72
3.1	Análisis Drift Flux	72
3.2	Descripción de la Rutina Iterativa.....	84
4	DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE LABORATORIO Y PRUEBAS EXPERIMENTALES	89
4.1	Detalle de la Unidad de Laboratorio e Instrumentación	89
4.2	Metodología Experimental.....	94
4.2.1	Algoritmo de Procesamiento de Imágenes	101
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	110

5.1	Parámetros Hidrodinámicos en Dispositivo de Flujo Descendente	110
5.2	Análisis Drift Flux	127
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
6.1	Conclusiones	133
6.2	Recomendaciones	135
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
8	ANEXOS	147
8.1	Análisis de sensibilidad unidimensional para el flujo volumétrico de líquido $Ql[m^3/s]$	147
8.2	Relación entre la concentración de gas, velocidad superficial de gas y tamaño de burbuja	150
8.3	Datos experimentales del efecto del tipo y concentración del espumante sobre la tensión superficial	151
8.4	Efecto de la dosificación de espumante en la curva hold-up y velocidad superficial de gas.	152
8.5	Procedimiento gráfico para la estimación de la CCC	152
8.6	Efecto de la dosificación y naturaleza química del espumante sobre el diámetro de burbuja	153
8.7	Impacto de la dosificación de MIBC en la reducción de área	154
8.8	Impacto de la dosificación y naturaleza química de los espumantes en la reducción de área superficial de burbuja disponible para flotación	156
8.9	Impacto de la dosificación y proporción de la mezcla de espumantes del tipo Pentanol y MIBC sobre el diámetro de burbuja.....	158
8.10	Impacto de la dosificación y proporción de la mezcla de espumantes del tipo Pentanol y MIBC sobre el área superficial de burbuja disponible para flotación	159
8.11	Modelación de la tasa de transporte de agua	161
8.12	Efecto de la velocidad superficial de gas y líquido sobre la velocidad de deslizamiento	164
8.13	Análisis de sensibilidad del diámetro de la burbuja sobre la velocidad terminal estimada por ecuación de Stokes y Masliyah	165
8.14	Código del algoritmo Drift Flux Rutine de Mella®	166
8.15	Código del algoritmo Bubble Analysis de Farías-Mella®.....	168
8.16	Resultados de Hold-up 2D y S_b del algoritmo Bubble Analysis de Farías-Mella®. 182	

8.17	Data experimental para la evaluación de la rutina iterativa en columna de flotación contracorriente	183
8.18	Data experimental para la evaluación de la rutina iterativa en dispositivo de flujo descendente	184

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

Actualmente, la mayoría de los minerales sulfurados extraídos deben someterse a etapas de reducción de tamaño (chancado y molienda) para conseguir la liberación de las distintas fases minerales [1]. Las partículas obtenidas en la etapa de conminución, son clasificadas de acuerdo al tamaño que presentan y dirigidas hacia un proceso de concentración de minerales.

El principal método de concentración, mediante el cual se trata el 90% de los minerales más relevantes a nivel mundial (Plomo, Cobre y Zinc), consiste en la flotación [2]. El proceso de flotación explota las diferencias entre las propiedades físico-químicas de los diversos minerales presentes, lo que permite la obtención selectiva de partículas de mineral valioso a partir de una suspensión que presenta minerales estériles (ganga) y/o minerales sin valor comercial. Generalmente, las partículas de mineral valioso son del tipo hidrofóbicas. Gracias a esta propiedad es posible que dichas partículas se adhieran a las burbujas presentes en el sistema de flotación, dando lugar al agregado partícula – burbuja [3], como se representa en la Figura 1.1. Posteriormente, el agregado partícula – burbuja es transportado hacia la superficie de la pulpa, formándose una espuma estable. Como resultado final, la espuma es removida y los minerales valiosos son recuperados [4].

El producto valioso obtenido mediante el proceso de flotación se somete a etapas de separación sólido-líquido (espesamiento y filtración), para finalmente obtener un producto de valor comercial competente con las necesidades del mercado.

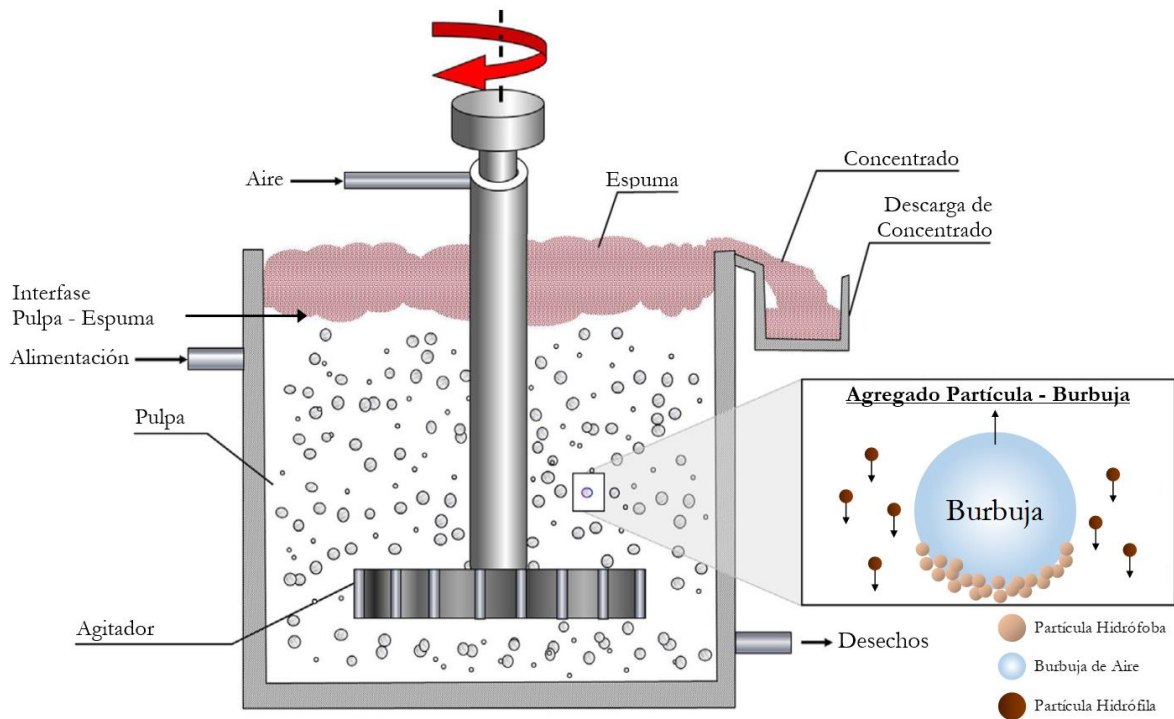


Figura 1.1 Diagrama del proceso de flotación y esquema del agregado partícula – burbuja, adaptado de Wills *et al.*, 2015 [3].

En la totalidad de las etapas comprendidas en el procesamiento de minerales, orientadas a la obtención del máximo beneficio a partir de explotación de un mineral de interés, las consideraciones económicas de cada eslabón se tornan fundamentales [5]. Bajo este escenario y debido a la relevancia del proceso de flotación como método de concentración, se hace imperioso el desarrollo de nuevos equipos y tecnologías en dicha área, junto con el estudio y caracterización de la operación de las máquinas de flotación, con el fin de desarrollar estrategias de control y diagnóstico que logren mejorar el desempeño metalúrgico de las unidades, además de incrementar la eficiencia del proceso y disminuir los costos de operación.

Por lo anterior, se plantea la necesidad de investigar sobre el comportamiento hidrodinámico que presentan las celdas de flotación, en particular, las celdas del tipo flujo descendente.

1.2 Descripción de la Problemática

Entre los años 1980 y 2000, tal como se muestra en la Figura 1.2, se innovó en el diseño de las máquinas de flotación con la implementación de celdas neumáticas de flujo descendente, principalmente con celdas tipo Jameson¹, Imhoflot^{TM 2} (Diseños G-Cell y V-Cell) y Ekoflot³, las cuales se caracterizan por permitir el ingreso de gas y pulpa al interior de un tubo descendente, con tal de promover el contacto íntimo entre las partículas y burbujas. Sin embargo, en la literatura existe limitada evidencia experimental sobre las distribuciones de tamaño de burbuja generadas en equipos del tipo flujo descendente [6]. En este contexto, el presente trabajo de memoria propone *caracterizar experimentalmente la hidrodinámica del enjambre de burbujas en un dispositivo de laboratorio de flujo descendente equipado con cinematografía de alta velocidad*, lo que permitirá determinar de los parámetros de dispersión de gas para un sistema bifásico aire – agua.

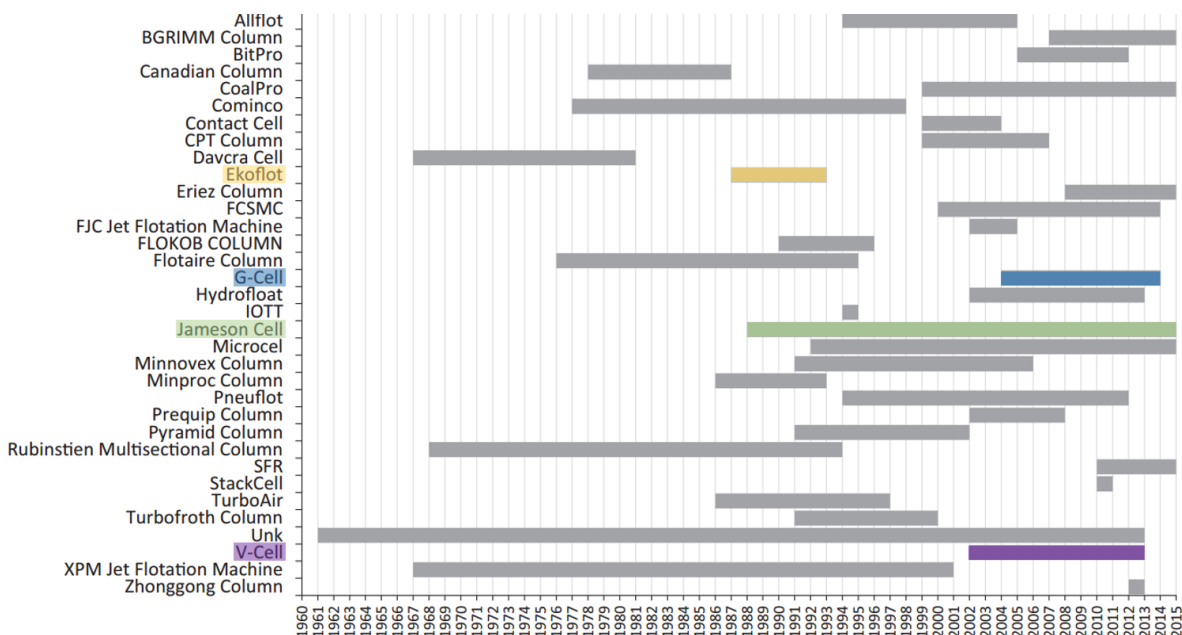


Figura 1.2 Línea de tiempo de los diversos tipos de columna de flotación instalados entre 1961 y 2016, adaptado de Harbort *et al.*, 2017 [7].

¹ <http://www.jamesoncell.com/EN/OperatingPrinciples/Pages/OperatingPrinciples.aspx>

² <http://www.maelgwyn.com/technology/pneumatic-flotation-imhoflot/>

³ <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383730305800134>

De lo expuesto anteriormente se propone la siguiente hipótesis:

Es posible clasificar por tamaño las burbujas generadas al interior de un dispositivo de flujo descendente (i.e., downcomer es la expresión en inglés para el dispositivo de flujo descendente) debido al ambiente hidrodinámico que proporciona este tipo de tecnología.

Lo anterior, se basa en el equilibrio de velocidades superficiales de líquido y gas, lo cual podría tener un impacto significativo, sobre la eficiencia de separación, así como proveer de los aspectos fenomenológicos en el diseño o mejora de las actuales unidades de flotación.

La hipótesis propuesta determinó la estructura, enfoque y desarrollo del presente trabajo. Además, se identificaron objetivos, tanto generales como específicos, con el propósito de corroborar o refutar la hipótesis.

1.3 Objetivos del Trabajo de Memoria

A continuación, se presentan los objetivos abordados en el presente trabajo de memoria. Estos objetivos se establecieron con la intención de crear las condiciones necesarias para evaluar la hipótesis.

1.3.1 Objetivo General

Caracterizar la hidrodinámica del enjambre de burbujas en ductos confinados para aplicaciones en flotación de minerales.

Donde el objetivo general considera la evaluación de la métrica de inyección de aire mediante la determinación de la velocidad superficial de gas (J_g , [cm/s]), velocidad superficial de líquido (J_L , [cm/s]), hold-up de gas (ε_g , [%]), tamaño de burbuja (d_b , [mm], para un dispositivo de flujo descendente. Cabe destacar, que los conceptos anteriormente señalados se describen en la Sección 2.1.

Habiendo identificado el objetivo de general, estamos en condiciones de apuntar hacia los objetivos específicos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Implementar un dispositivo de laboratorio de flujo descendente equipado con cinematografía de alta velocidad que permita la medición de la distribución de tamaño de burbuja en una cámara descendente.
- Establecer una metodología para la estimación del diámetro de burbuja empleando el análisis de Drift Flux [8] aplicable a celdas neumáticas.
- Analizar la distribución de tamaño de burbujas de un dispositivo de flujo descendente de laboratorio en función de los aspectos hidrodinámicos del enjambre de burbujas generado en sistemas confinados.

1.4 Organización del Trabajo de Memoria

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el inciso anterior, el desarrollo del trabajo de memoria se compone de ocho capítulos, los cuales se describen a continuación.

Capítulo I: Se exhiben los antecedentes generales en el contexto de la flotación de minerales y la importancia que presenta el estudio de la hidrodinámica en equipos de flotación. Además, se describe la problemática y objetivos que abarca el presente trabajo de memoria.

Capítulo II: Se presenta una revisión crítica de la literatura en relación a la hipótesis planteada, abordando principalmente temáticas referentes a los parámetros de dispersión de gas, reactivos y equipos que se utilizan en el proceso de flotación.

Capítulo III: Se describen los principales aspectos del análisis de Drift Flux. Se propone una rutina iterativa para la determinación del tamaño de burbuja empleando el análisis de Drift Flux y se evalúa su aplicación en celdas neumáticas utilizando el algoritmo Drift Flux Routine de Mella®.

Capítulo IV: Se describe la unidad de laboratorio, metodología experimental y pruebas experimentales. Además, se presenta el algoritmo de procesamiento de imágenes llamado Bubble Analysis de Farías-Mella®, el cual se desarrolló en el contexto de esta memoria.

Capítulo V: Se presentan los resultados del estudio y una discusión detallada de estos en el contexto de la hipótesis planteada.

Capítulo VI: Se presenta las conclusiones y las recomendaciones sugeridas para trabajos futuros.

Capítulo VII: Se detallan las referencias bibliográficas que se emplearon en este trabajo.

Capítulo VIII: Se presentan cálculos, demostraciones, tablas de referencia y gráficos para proporcionar información de apoyo para el cuerpo del trabajo de memoria.

CAPÍTULO II

REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA

Para tener un mejor entendimiento de la caracterización hidrodinámica de los equipos flotación, es necesario recapitular ciertos conceptos claves que servirán como base y principios de esta investigación. A continuación, se analizan antecedentes bibliográficos desde una perspectiva reflexiva con el fin de identificar los principales parámetros que determinarán las características de las burbujas generadas en un sistema de flotación, en particular, de flujo descendente.

2.1 Parámetros de Dispersión de Gas

Para caracterizar la hidrodinámica del enjambre de burbujas en ductos confinados, haciendo referencia a la hipótesis del presente trabajo de memoria, es necesario entender que la métrica de inyección de aire es la fuerza motriz del proceso de flotación y la característica hidrodinámica principal que gobierna el desempeño metalúrgico [9].

La dispersión de gas al interior de los equipos de flotación juega un rol fundamental durante la colección y separación de las partículas de mineral valioso desde la ganga, junto con el transporte del agregado partícula-burbuja hacia la zona de espuma (Ver Figura 1.1) [10]. Debido a esto, las características de dispersión de gas que presentan las máquinas de flotación se encuentran directamente relacionadas con la eficiencia, recuperación y selectividad de dicho proceso [11].

En este contexto, los principales parámetros empleados para caracterizar la dispersión de gas en equipos de flotación corresponden a: velocidad superficial de gas (J_g , [cm/s]), hold-up de gas (ε_g , *i. e.*, *concentración de gas*, [%]) y distribución de tamaño de burbuja (BSD , [mm]). En su conjunto, estos parámetros pueden relacionarse para estimar el flujo superficial de área de burbuja (S_b , [s^{-1}]). La descripción de estos parámetros se presenta a continuación.

2.1.1 Velocidad superficial de gas (J_g , [cm/s])

Corresponde a la relación entre el flujo volumétrico de gas (Q_g , [cm^3/s]) y el área de la sección transversal del equipo de flotación (A_c , [cm^2]), tal como se presenta en la Ecuación (5.1). Este parámetro se encuentra vinculado directamente con la cinética de flotación⁴, lo cual repercute sobre la recuperación del mineral, el área superficial que presentan las burbujas y la descarga de espuma en dicho equipo [12].

$$J_g = \frac{Q_g [cm^3/s]}{A_c [cm^2]}, [cm/s] \quad (2.1)$$

Un aumento excesivo del flujo de gas podría causar un incremento en el arrastre de partículas indeseadas hacia la espuma, reduciendo la estabilidad de la interfase pulpa-espuma (ver Figura 1.1), o causar inundación, es decir, operar bajo una condición donde toda la celda se llena de espuma como una sola fase estable, y desaparece la fase de pulpa [11] [13].

En esta sección, es conveniente aclarar y comparar las opciones de cálculo de velocidad superficial de gas para un dispositivo de flujo descendente, debido a su dependencia con el área de la sección transversal escogida. El área de sección transversal apropiada corresponde al área normal a la dirección del flujo de la espuma, excluyendo la zona ocupada por el/los downcomer(s) [13]. A modo de ejemplo, si contamos con una celda Jameson, donde A_d corresponde al área de la sección transversal del downcomer y A_t al área de la sección transversal del tanque de separación, ambas con unidades de [cm^2], como se observa en la Figura 2.1, determinar la velocidad superficial de gas en relación a A_d y A_t . Considerar para el cálculo la información presentada en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2.

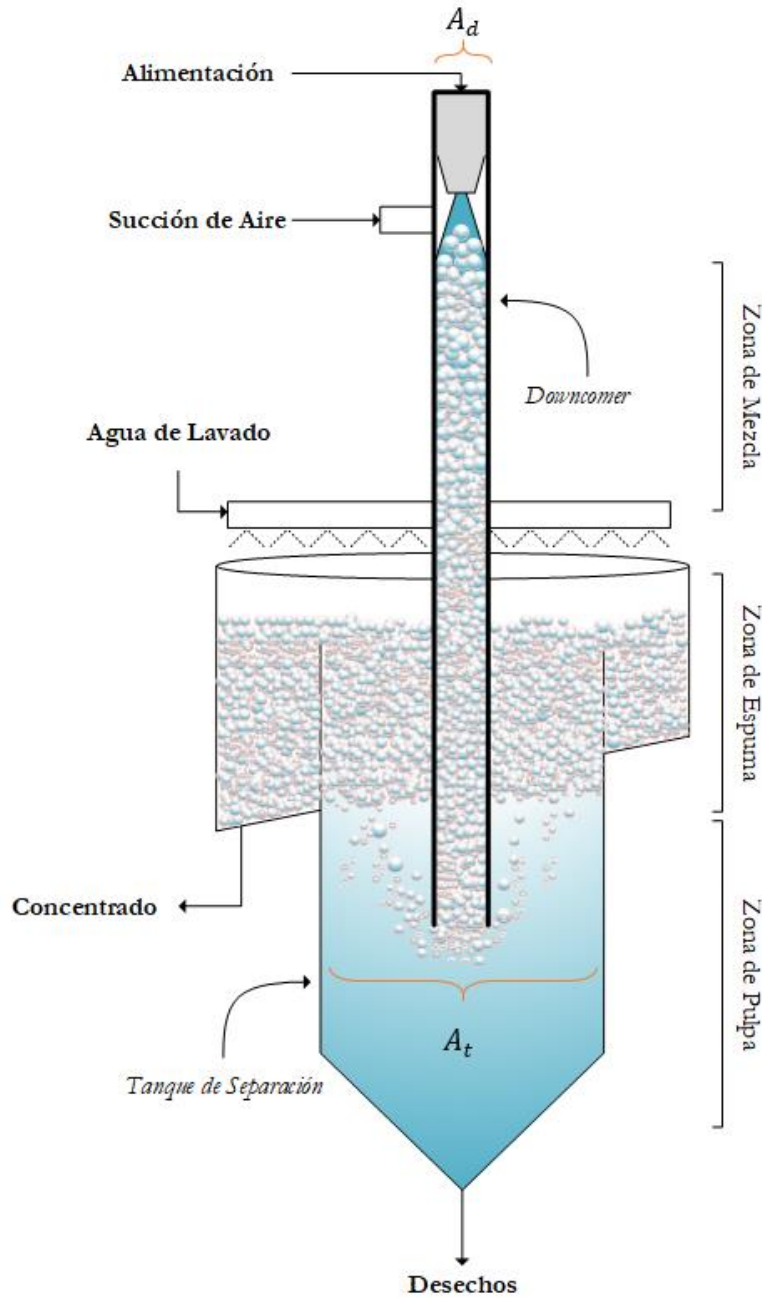
Tabla 2.1 Características de diseño celda Jameson [6].

Compartimientos	Diámetro [cm]
Downcomer	2.5
Tanque de Separación	15

⁴ La cinética de flotación para dispositivos de flujo descendente se reporta en relación a la Zona de Separación (ver ejemplo Figura 2.1, Tanque de Separación).

Tabla 2.2 Parámetros operacionales de referencia celda Jameson [6].

Parámetro	Unidad	Valor
Q_g	[L/min]	16.7

Figura 2.1 Vista esquemática de la celda Jameson, adaptado de Şahbaz *et al.*, 2012 [14].

Con el fin de calcular la velocidad superficial de gas, se describe en primera instancia la secuencia de cálculo respectiva a A_d .

Paso 1: Se calcula A_d con la información de la Tabla 2.1. Se emplea el diámetro del downcomer ($d_{downcomer}$, [cm]) para estimar el área de la sección transversal del downcomer según lo presentado en la Ecuación (2.2).

$$A_d = \frac{\pi \cdot d_{downcomer}^2}{4}, [cm^2] \quad (2.2)$$

Reemplazando los valores correspondientes en la Ecuación (2.2), se obtiene la Ecuación (2.3) como se muestra a continuación:

$$A_d = \frac{3.14 \cdot (2.5 [cm])^2}{4} = 4.91 [cm^2] \quad (2.3)$$

Paso 2: Se expresa el caudal de gas en unidades de [cm^3/s] como se muestra en la Ecuación (2.4). Además, se utiliza la información presentada en la Tabla 2.2.

$$Q_g = 16.7 \left[\frac{L}{min} \right] = \frac{16.7 \left[\frac{L}{min} \right] \cdot 1000 \left[\frac{cm^3}{L} \right]}{60 \left[\frac{s}{min} \right]} = 278.33 [cm^3/s] \quad (2.4)$$

Paso 3: Se determina la velocidad superficial de gas (J_{g, A_d} , [cm/s]) según la Ecuación (2.5).

$$J_{g, A_d} = \frac{Q_g [cm^3/s]}{A_d [cm^2]} = \frac{278.33 [cm^3/s]}{4.91 [cm^2]} = 56.73 [cm/s] \quad (2.5)$$

Luego, se procede a describir la secuencia de cálculo de la velocidad superficial de gas respectiva a A_t .

Paso 1: Se calcula A_t con la información de la Tabla 2.1. Para este caso se utiliza el diámetro del Tanque de Separación ($d_{TK\ separación}$, [cm]) en la estimación del área de la sección

transversal, excluyendo el área ocupada por el downcomer, según lo presentado en la Ecuación (2.6).

$$A_t = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{TK \text{ separación}}^2 - d_{downcomer}^2), [cm^2] \quad (2.6)$$

De la misma forma, se sustituyen los valores indicados en la Ecuación (2.6), y se obtiene la Ecuación (2.7) como se muestra a continuación:

$$A_t = \frac{3.14 \cdot [(15 [cm])^2 - (2.5 [cm])^2]}{4} = 171.72 [cm^2] \quad (2.7)$$

Paso 2: Se calcula la velocidad superficial de gas (J_{g, A_t} , [cm/s]), empleando la Ecuación (2.8).

$$J_{g, A_t} = \frac{Q_g [cm^3/s]}{A_t [cm^2]} = \frac{278.33 [cm^3/s]}{171.72 [cm^2]} = \mathbf{1.62 [cm/s]} \quad (2.8)$$

Gracias a este ejemplo, es posible evidenciar la diferencia entre los valores de velocidad superficial de gas dependiendo del área que se utilice para su estimación. Se pueden presentar diferencias hasta 35 veces entre un J_g reportado en el downcomer en comparación al reportado en el tanque de separación. Generalmente, para dispositivos de flujo descendente, como es el caso de la celda Jameson, el cálculo del J_g se refiere al área del tanque de separación.

Continuando con los parámetros que definen la métrica del aire, se revisará la cantidad de aire presente en los equipos de flotación, y en particular para los dispositivos de flujo descendente.

2.1.2 Hold-up de gas (ε_g , [%])

La concentración de gas o hold-up al interior de los equipos de flotación corresponde a la relación entre cantidad de gas contenida por unidad de volumen de pulpa, lo cual determina la cantidad de aire disponible para la flotación [15]. Este parámetro de dispersión de gas

puede afectar significativamente el tiempo de residencia de las partículas y la colección de minerales al interior de los equipos de flotación [16]. En particular, el hold-up de gas es una medida indirecta del tiempo de residencia y el tamaño de las burbujas al interior del equipo de flotación, dado que las burbujas de gran tamaño tienden a desplazarse a una velocidad mayor que las burbujas más pequeñas al interior del equipo de flotación.

La estimación de hold-up referido al downcomer ($\varepsilon_{g,d}$, [%]) puede ser abordada realizando un balance de momentum entre la superficie de entrada y la salida del downcomer (Ver Figura 2.2), considerando que la suma de las fuerzas que actúan hacia abajo sobre la mezcla burbujeante en el tubo de descenso es igual a la ganancia de momentum del flujo del sistema, como se muestra en la Ecuación (2.9).

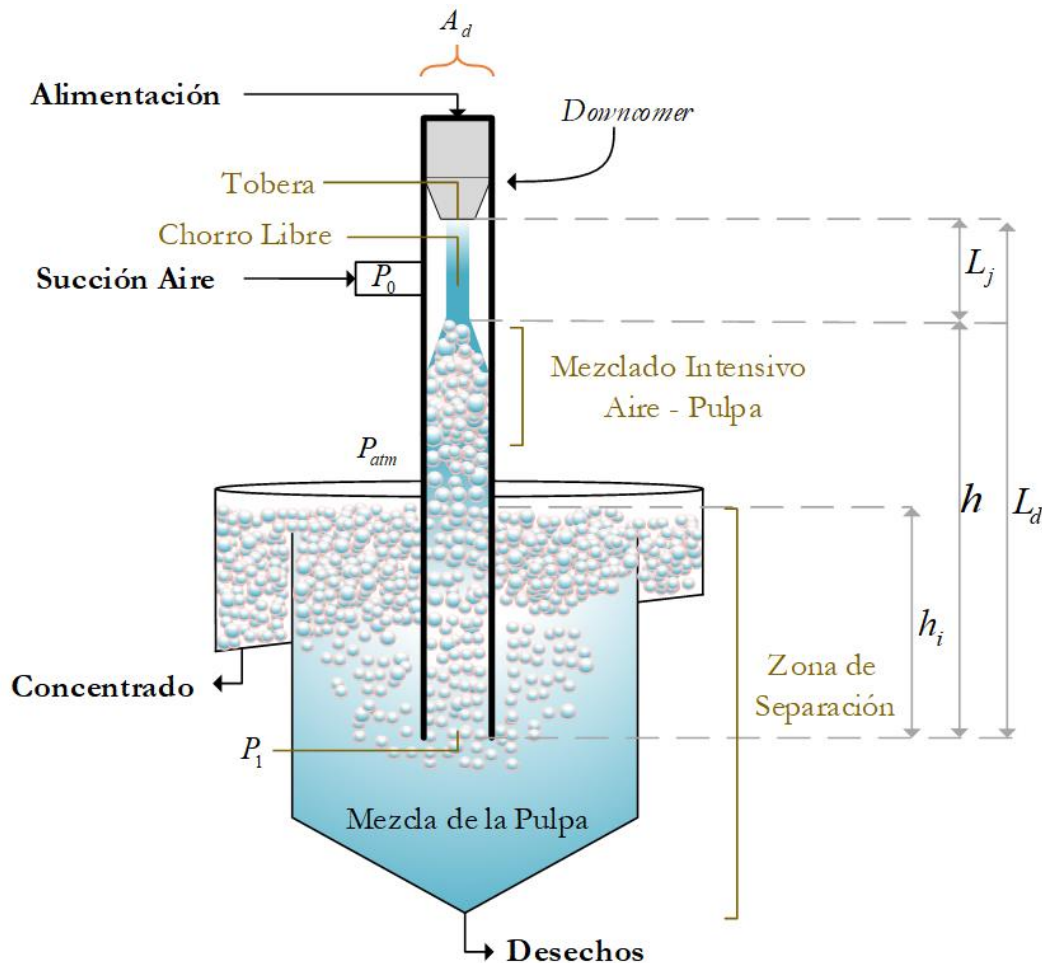


Figura 2.2 Representación de las zonas de interés en el downcomer (Celda Jameson), donde se destacan los puntos de interés P_0 , P_1 y P_{atm} para la determinación del hold-up en el downcomer, adaptado de Evans *et al.*, 1995 [13] y Glencore Technology, 2015 [17].

$$\begin{aligned} (P_0 \cdot A_d - P_1 \cdot A_d) + \rho_m \cdot g \cdot h \cdot A_d \\ = \rho_1 \cdot v_1 \cdot (Q_g + Q_l) - \rho_l \cdot v_j \cdot Q_l - \rho_g \cdot v_g \cdot Q_g \end{aligned} \quad (2.9)$$

Donde:

P_0, P_1 : Corresponde a la presión en el espacio de la cabeza y en la descarga final del downcomer, respectivamente; $[Pa]$.

A_d : Área de la sección transversal del downcomer, $[m^2]$.

ρ_m : Densidad media de la mezcla dos fases al interior del downcomer, $[kg/m^3]$.

g : Aceleración de gravedad, $[m/s^2]$.

h : Altura de la mezcla burbujeante en el downcomer, $[m]$.

ρ_1^5 : Densidad de mezcla que sale del tubo de descenso, $[kg/m^3]$.

ρ_l : Densidad del líquido, $[kg/m^3]$.

v_1 : Velocidad media de mezcla que sale del tubo de descenso, $[m/s]$.

Q_g, Q_l : Corresponde al flujo volumétrico de gas y líquido, respectivamente; $[m^3/s]$.

v_j : Velocidad media del jet, $[m/s]$.

ρ_g : Densidad del gas, $[kg/m^3]$.

v_g : Velocidad media del gas, $[m/s]$.

Despreciando los términos de la densidad del gas y notando que la densidad media de la mezcla de dos fases al interior del downcomer ($\rho_m, [kg/m^3]$) se puede relacionar con la concentración de gas, se obtiene la Ecuación (2.10).

$$\rho_m = (1 - \varepsilon_g) \cdot \rho_l, [kg/m^3] \quad (2.10)$$

⁵ La densidad ρ_1 de la mezcla que está abandonando el downcomer es diferente a la densidad ρ_m de la mezcla al interior del downcomer debido a deslizamiento entre las fases de gas y líquido [18].

Reemplazando la Ecuación (2.10) en la Ecuación (2.9) y reordenando los términos resulta la siguiente expresión:

$$P_0 = P_1 - (1 - \varepsilon_g) \cdot \rho_l \cdot g \cdot h + \rho_l \cdot J_l \cdot (J_g + J_l - v_j) \quad (2.11)$$

Es posible estimar la altura de la mezcla burbujeante en el downcomer (h , [m]) (Ver Figura 2.2), mediante la Ecuación (2.12) y (2.13) [18]:

$$h = L_d - L_j, [m] \quad (2.12)$$

$$L_j = C_1 \cdot \frac{\sigma_l}{\rho_l \cdot v_j^2} \left(\frac{Q_g}{Q_l} - C_2 \right), [m] \quad (2.13)$$

Además, se tiene que P_1 puede ser estimada usando la siguiente expresión:

$$P_1 = P_{atm} + \rho_l \cdot g \cdot h_i, [Pa] \quad (2.14)$$

Donde:

J_g y J_l : Velocidad superficial de gas y líquido, respectivamente; ambas en unidades de [m/s].

L_d : Largo del downcomer, [m].

L_j : Longitud del chorro libre, [m].

σ_l : Tensión superficial del líquido, [kg/s²].

C_1 : Constante adimensional igual a $2.36 \cdot 10^6$, [-].

C_2 : Constante empírica adimensional igual a 0.37.

P_{atm} : Presión atmosférica, [Pa].

h_i : Altura de inmersión del downcomer, equivalente a la altura vertical del líquido en la celda sobre la base del downcomer, [m].

Reemplazando las Ecuaciones (2.13) y (2.14) en la Ecuación (2.11) se obtiene:

$$P_0 = P_{atm} + \rho_l \cdot g \cdot h_i - (1 - \varepsilon_{g,d}) \cdot \rho_l \cdot g \cdot \left(L_d - \left(C_1 \cdot \frac{\sigma_l}{\rho_l \cdot v_j^2} \left(\frac{Q_g}{Q_l} - C_2 \right) \right) \right) + \rho_l \cdot J_l \cdot (J_g + J_l - v_j) \quad (2.15)$$

A continuación, mediante el principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa se plantea el cálculo de la presión en el punto 2 de muestreo (P_2 , [Pa]) en relación a la presión del punto 1 de muestreo (P_1 , [Pa]):

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\rho_l \cdot g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\rho_l \cdot g} + z_2 \quad (2.17)$$

Donde,

$$v_1 = \frac{Q_l [m^3/s]}{A_d [m^2]}, [m/s] \quad (2.18)$$

$$v_2 = \frac{Q_l [m^3/s]}{A_2 [m^2]}, [m/s] \quad (2.19)$$

Por lo tanto, es posible establecer la Ecuación (2.20), despejando P_2 , [Pa]:

$$P_2 = \rho_l \cdot g \cdot \left(\frac{(Q_l/A_d)^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\rho_l \cdot g} + z_1 - \frac{(Q_l/A_2)^2}{2 \cdot g} - z_2 \right), [Pa] \quad (2.20)$$

Por otro lado, la presión en el punto de muestro 3 (P_3 , [Pa]) puede ser determinada de la misma forma que P_1 , [Pa]; según lo indicado por la Ecuación (2.21).

$$P_3 = P_{atm} + \rho_l \cdot g \cdot h_3, [Pa] \quad (2.21)$$

Donde:

v_1 y v_2 : Velocidad del fluido en la sección considerada, [m/s].

A_2 : Área de la sección transversal del tanque de separación, [m²].

z_1 y z_2 : Altura vertical, sobre la cota de referencia para los puntos de muestro 1 y 2, [m].

P_2 : Presión en la descarga del downcomer referida al área de sección transversal del tanque de separación, [Pa].

P_3 : Presión en el punto de muestro 3, [Pa].

h_3 : Altura de la columna de agua en el punto de muestro 3, [m].

Por lo que es posible determinar hold-up referido al tanque de separación ($\varepsilon_{g,tk}$, [%]) mediante la siguiente relación:

$$\varepsilon_{g,tk} = \left(1 - \frac{P_2 - P_3}{\rho_l \cdot g \cdot L}\right) \cdot 100, [\%] \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_{g,tk} = \left(1 - \frac{\left(\rho_l \cdot g \cdot \left(\frac{(Q_l/A_d)^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\rho_l \cdot g} + z_1 - \frac{(Q_l/A_2)^2}{2 \cdot g} - z_2\right)\right) - (P_{atm} + \rho_l \cdot g \cdot h_3)}{\rho_l \cdot g \cdot L}\right) \cdot 100, [\%] \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_{g,tk} = \left(1 - \frac{\left(\rho_l \cdot g \cdot \left(\frac{(Q_l/A_d)^2}{2 \cdot g} + \frac{(P_{atm} + \rho_l \cdot g \cdot h_i)}{\rho_l \cdot g} + z_1 - \frac{(Q_l/A_2)^2}{2 \cdot g} - z_2\right)\right) - (P_{atm} + \rho_l \cdot g \cdot h_3)}{\rho_l \cdot g \cdot L}\right) \cdot 100, [\%] \quad (2.24)$$

Donde:

L : Distancia entre los sensores de presión P_2 y P_3 , [m].

Reordenando la Ecuación (2.16) en función de P_1 , se obtiene la Ecuación (5.1).

$$P_1 = P_0 + (1 - \varepsilon_{g,d}) \cdot \rho_l \cdot g \cdot \left(L_d - \left(C_1 \cdot \frac{\sigma_l}{\rho_l \cdot v_j^2} \left(\frac{Q_g}{Q_l} - C_2\right)\right)\right) + \rho_l \cdot J_l \cdot (U_g + J_l - v_j), [Pa] \quad (2.25)$$

Reemplazando P_1 de la Ecuación (5.1) en la Ecuación (2.23), se obtiene una relación entre $\varepsilon_{g,tk}$ y $\varepsilon_{g,d}$ cómo se expresa a continuación en la Ecuación (2.29).

$$\varepsilon_{g,tk} = \left(1 - \left(\frac{(Q_l/A_d)^2}{2 \cdot g \cdot L} + \frac{P_0 + (1 - \varepsilon_{g,d}) \cdot \rho_l \cdot g \cdot \left(L_d - \left(C_1 \cdot \frac{\sigma_l}{\rho_l \cdot v_j^2} \left(\frac{Q_g}{Q_l} - C_2\right)\right)\right) + \rho_l \cdot J_l \cdot (U_g + J_l - v_j)}{\rho_l \cdot g \cdot L} + \frac{z_1}{L} - \frac{(Q_l/A_2)^2}{2 \cdot g \cdot L} - \frac{z_2}{L} + \frac{P_{atm} + \rho_l \cdot g \cdot h_3}{\rho_l \cdot g \cdot L}\right) \cdot 100, [\%] \quad (2.26)$$

Ya expresada la relación entre $\varepsilon_{g,tk}$ y $\varepsilon_{g,d}$, a continuación se presenta un análisis de sensibilidad unidimensional, variando el flujo volumétrico de líquido (Q_l , [m^3/s]), con el fin de evaluar su impacto sobre el hold-up referido al downcomer (Figura 2.2) y tanque de separación (Figura 2.3), respectivamente. Para el análisis de sensibilidad presentado a continuación se utilizó la información de la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Parámetros operacionales utilizados en el análisis de sensibilidad.

Parámetro	Unidad	Valor
Flujo volumétrico de líquido, Q_l	[L/min]	6.20–30.00
Flujo volumétrico de gas, Q_g	[L/min]	16.7
Diámetro tobera, d_{tobera}	[mm]	1.6
Presión en el espacio de la cabeza, P_o	[Pa]	-20000
Distancia entre los sensores de presión P_2 y P_3 , L	[m]	0.65
Altura de inmersión del downcomer, h_i	[m]	0.88
Altura de la columna de agua en el punto de muestreo 3, h_3	[m]	0.40

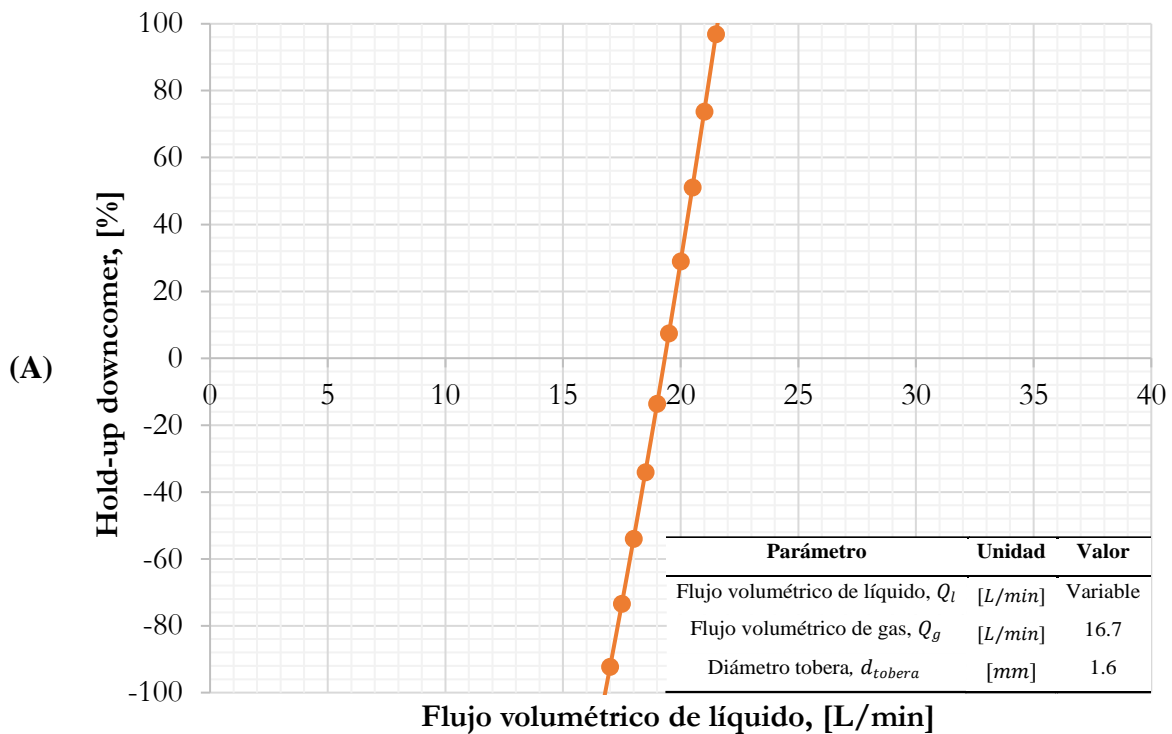
Propiedades del fluido: Densidad del líquido (ρ_l) = 1000[kg/m³] y Tensión superficial del líquido (σ_l) = 0.07275[kg/s²]. *Dimensiones del equipo:* Diámetro downcomer ($d_{downcomer}$) = 25[mm], Diámetro tanque de separación (d_{tk}) = 150[mm] y Largo del downcomer (L_d) = 2.62[m]. *Considerar:* Altura vertical, sobre la cota de referencia para punto de muestreo 1 (z_1) = Altura vertical, sobre la cota de referencia para punto de muestreo 2 (z_2), para la Ecuación (2.24).

Análisis de sensibilidad unidimensional para el flujo volumétrico de líquido Q_l [m^3/s].

En la Figura 2.4 es posible apreciar el efecto que tiene el flujo volumétrico de líquido sobre el hold-up de gas referido tanto al downcomer como el tanque de separación. El hold-up de gas referido al downcomer depende en gran medida del valor que adopte el flujo volumétrico de líquido. Para el rango de valores de $\varepsilon_{g,d}$, [%] válidos (entre 0 – 100 [%]), se identificó Q_l pertenece a un rango de 19.5 – 21.5 [m^3/s]. Este limitado rango de validez se debe a que el flujo de líquido es la fuerza motriz para el funcionamiento de los dispositivos de flujo descendente, ya que el caudal de alimentación provee de la energía necesaria para la aspiración de aire en celdas tipo Jameson, permite el cizallamiento del aire arrastrado en finas burbujas, influye directamente en el APR (i.e, air-to-pulp ratio, que significa en español

relación entre el caudal de aire y gas), juega un rol fundamental en la descarga de la mezcla burbujeante del downcomer hacia el tanque de separación, junto con su importancia en la velocidad del jet, que se contempla como la relación entre el flujo volumétrico de líquido y el diámetro de la tobera.

Valores de $\varepsilon_{g,d}$ menores a 0[%] y mayores a 100[%] representan una condición de operación físicamente imposible de ejecutar en el sistema de flotación en estudio. Cuando $\varepsilon_{g,d}$ adopta valores negativos, se da la condición de que el APR es mayor a 0.86[%]. Los detalles del cálculo implicados en el análisis de sensibilidad se presentan en la Sección **Error! Reference source not found.**



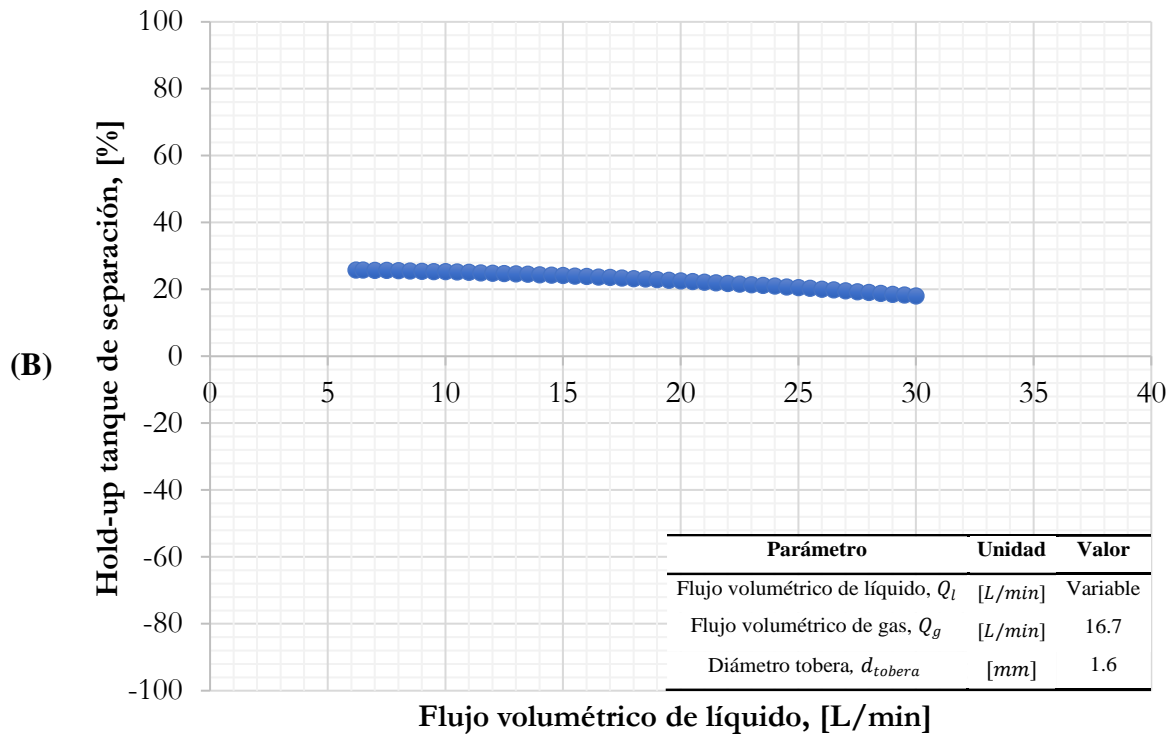


Figura 2.4 Análisis de sensibilidad del flujo volumétrico de líquido (Q_l [m³/s]) sobre el (A) hold-up de gas referido al downcomer ($\varepsilon_{g,d}$, [%]) y (B) hold-up de gas referido al tanque de separación ($\varepsilon_{g,tk}$, [%]).

Por otro lado, la concentración de gas puede medirse usando una variedad de técnicas como se enumeran a continuación:

Diferencia de Presión

Uno de los métodos más comunes para determinar el hold-up de gas consiste en la cuantificación de la diferencia de presión existente entre dos puntos comprendidos en la zona de colección al interior del equipo de flotación. En la Figura 2.5 se representa esquemáticamente el sistema de medición de hold-up por diferencia de presión y la Ecuación (2.27) permite determinar el hold-up de gas empleando dicho sistema.

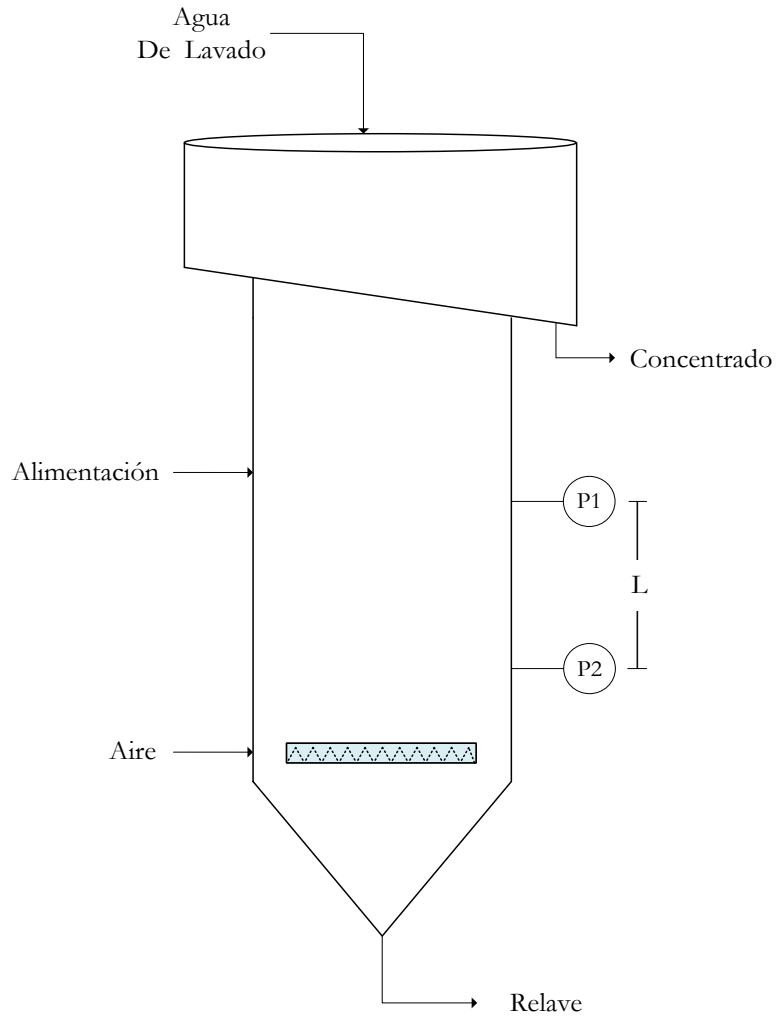


Figura 2.5 Medición de hold-up de gas por diferencia de presión en columna de flotación, adaptado de Finch *et al.*, 1990 [9].

$$\varepsilon_g = \left(1 - \frac{\Delta P}{\rho_{pulpa} \cdot g \cdot L} \right) \cdot 100, [\%] \quad (2.27)$$

Donde:

ε_g : Hold-up de gas, [%].

P_1 y P_2 : Medidores de presión, [Pa].

ΔP : Diferencia de presión entre P_1 y P_2 , [Pa].

ρ_{pulpa} : Densidad de la pulpa, [kg/m^3].

g : Aceleración de gravedad, [m/s^2].

L : Distancia entre los medidores de presión P_1 y P_2 , [m].

En general, para dispositivos de flujo descendente, el hold-up se estima por diferencia de presión, similar a la medición esquematizada en la Figura 2.5, con la salvedad de que los sensores de presión (TAG PT-103 y PT-104) se encuentran a lo largo del downcomer, como se muestra en la Figura 2.6.

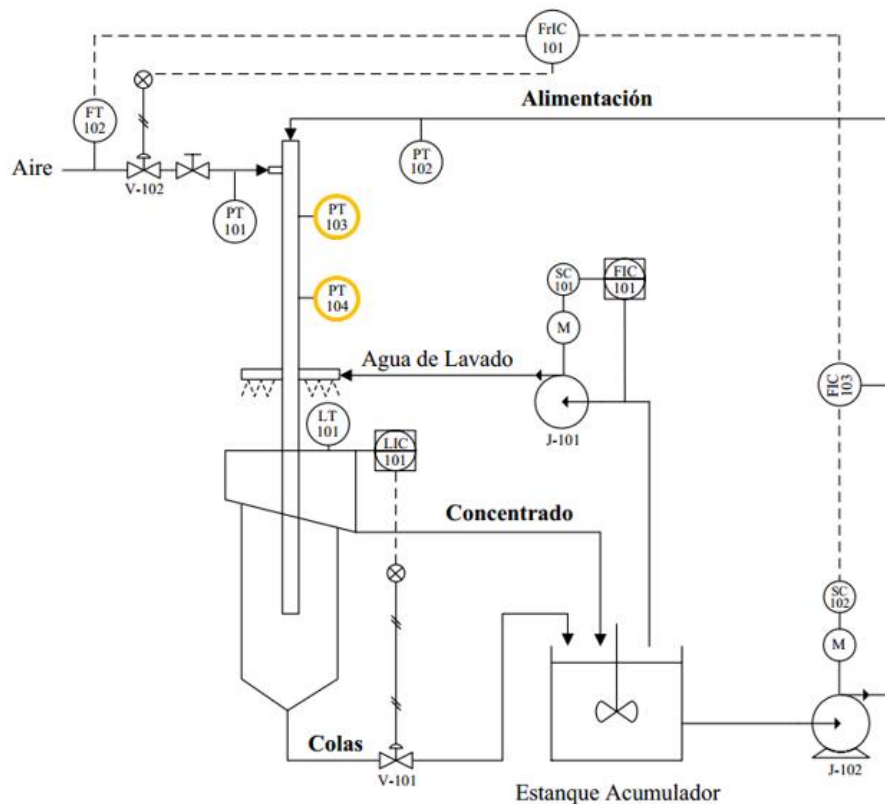


Figura 2.6 Medición de hold-up de gas por diferencia de presión en celda Jameson L-150, adaptado de Quijanes, 2015 [19].

Conductividad de la Mezcla

Otro de los métodos empleados para la determinación de la concentración de gas, se basa en el uso de un sensor de conductividad eléctrica en dispersiones gas-líquido (o gas-pulpa) [20]. El principio de funcionamiento de este sensor utiliza el modelo de Maxwell (1873) [21] descrito por la Ecuación (2.28), modelo basado en la conductividad aparente de una dispersión uniforme de objetos esféricos pequeños del mismo tamaño no conductores (i.e., burbujas de aire, para este caso en particular) en un medio conductor continuo (i.e., suspensión). El sensor se compone de dos cavidades, una celda abierta para medir la

conductividad de la suspensión aireada (κ_{slg} , [mS/cm]) y una celda tipo sifón para medir la conductividad de la suspensión des-aireada (κ_{sl} , [mS/cm]), como se presenta en Figura 2.7 [22].

$$\varepsilon_g = \left(\frac{\left(1 - \frac{\kappa_{slg} [\text{mS/cm}]}{\kappa_{sl} [\text{mS/cm}]}\right)}{\left(1 + \frac{\kappa_{slg} [\text{mS/cm}]}{2 \cdot \kappa_{sl} [\text{mS/cm}]}\right)} \right) \cdot 100, [\%] \quad (2.28)$$

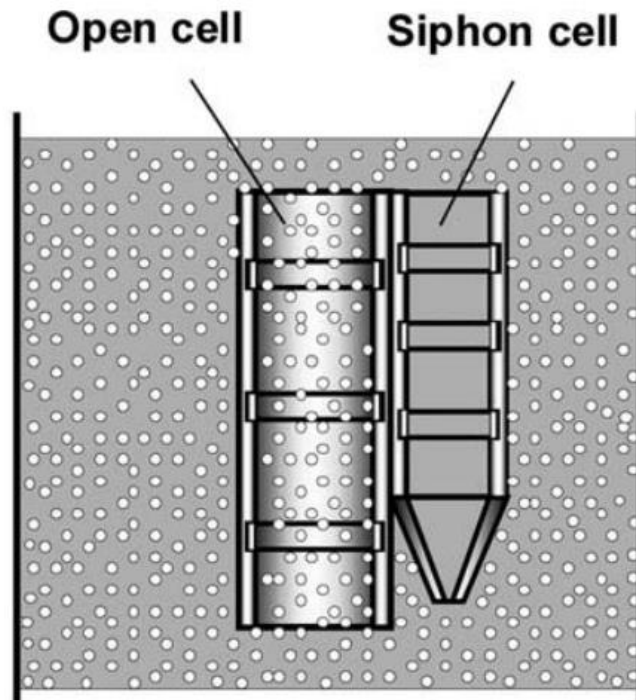


Figura 2.7 Esquema del sensor de hold-up de gas mediante conductividad eléctrica [22].

Técnica de Aislamiento

Por otro lado, Power *et al.*, 2000 [23] midió la concentración de gas en una celda de flotación mediante un tubo que se compone de dos válvulas tipo pinch, una en cada extremo del tubo, posicionadas sobre una sección de manguera flexible (Ver Figura 2.8). Este dispositivo se ubica verticalmente en la celda con las válvulas de presión abiertas y dado el paso de una suspensión aireada a través del tubo, se proceden a accionar las válvulas pinch,

comprimiendo la manguera y obteniéndose una muestra de suspensión aireada. Para determinar el hold-up de gas, se procede a comparar el volumen de la muestra de suspensión aireada (V_a , [cm^3]) con el volumen total del tubo (V_0 , [cm^3]), como se expresa en la Ecuación (2.29).

$$\varepsilon_g = \left(1 - \frac{V_a \text{ [cm}^3\text{]}}{V_0 \text{ [cm}^3\text{]}} \right) \cdot 100, [\%] \quad (2.29)$$

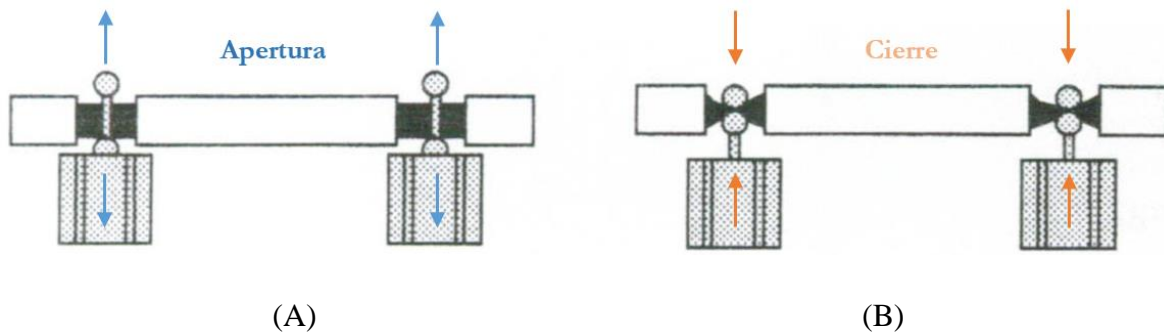


Figura 2.8 Dispositivo de medición de hold-up de gas. Operación en posición de apertura (A) y Operación en posición de cierre (B), adaptado de Power *et al.*, 2000 [23].

Hold-up 2D (ε_g^{2D} , [%])

Para el caso presente, donde se estudia el comportamiento del enjambre de burbujas mediante cinematografía de alta velocidad, el valor de hold-up se estima a partir de las imágenes obtenidas para cada test experimental, es decir, dividiendo el área total de burbujas contenidas en la imagen (A_{tb} , [mm^2]), por el área total de la imagen (A_i , [mm^2]), lo que resulta en un valor de hold-up en dos dimensiones (ε_g^{2D} , [%]) [24], como se presenta en la Ecuación (2.30).

$$\varepsilon_g^{2D} = \left(\frac{A_{tb} \text{ [mm}^2\text{]}}{A_i \text{ [mm}^2\text{]}} \right) \cdot 100, [\%] \quad (2.30)$$

$$A_{tb}^6 = \sum_{i=1}^n \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}, [mm^2] \quad (2.31)$$

$$d_i = 2 \cdot r_i [pixeles] \cdot \frac{calibration [mm]}{im_{width} [pixeles]}, [mm] \quad (2.32)$$

$$A_i^7 = calibration [mm] \cdot device_{width} [mm] \cdot \left(\frac{im_{height} [pixeles]}{im_{width} [pixeles]} \right) \quad (2.33)$$

$$device_{width} = 40 [mm] \quad (2.34)$$

$$im_{width} = 1280 [pixeles] \quad (2.35)$$

$$im_{height} = 1024 [pixeles] \quad (2.36)$$

Donde,

d_i : Diámetro de la i -ésima burbuja, $[mm]$.

n : Tamaño de la muestra, $[-]$.

r_i : Radio de la i -ésima burbuja, $[pixeles]$.

im_{width} : Ancho de la imagen en pixeles, $[pixeles]$.

im_{height} : Alto de la imagen en pixeles, $[pixeles]$.

Calibration: Calibración de la imagen, equivalencia entre pixeles en la horizontal de la imagen y unidades de longitud para la ventana de muestreo (en este caso milímetros), $[mm]$.

⁶ Para la estimación del área total de las burbujas se asume que las estas presentan una geometría de esferas perfectas.

⁷ Las fotos obtenidas por cinematografía de alta velocidad, para cada test experimental en particular, presentan un tamaño estándar de 1280x1024 pixeles.

$device_{width}$: Ancho del dispositivo de laboratorio, [mm].

Cabe destacar, que la estimación del hold-up en dos dimensiones conlleva a un error del tipo estereológico, es decir, un error originado a partir de métodos matemáticos que relacionan parámetros tridimensionales (ϵ_g^{3D} , *volumétrico*) con medidas bidimensionales (ϵ_g^{2D} , *superficie*) [25]. Debido a que la técnica de ϵ_g^{2D} se encuentra sesgada, se abordará este error desde la perspectiva estadística, empleando un exhaustivo procesamiento de imágenes para cada test experimental.

En la Tabla 2.4 se presenta un resumen y comparación, en cuanto a las ventajas y desventajas, de los métodos anteriormente presentados para la determinación de la concentración de gas al interior de los equipos de flotación.

Tabla 2.4 Comparación métodos estimación hold-up de gas.

Método	Ventajas	Desventajas
Diferencia de Presión [9]	Método convencional, estimación del hold-up simple.	Requiere una distancia bien definida entre los sensores de presión. La medición debe realizarse con el sistema de estudio en estado estacionario y se requiere de un cierto tiempo para alcanzar ese estado estacionario.
Conductividad de la Mezcla [20] [22]	Medición instantánea.	Puede presentar obstrucción en las cavidades.
Técnica de Aislamiento [23]	Dispositivo portátil y de fácil manejo. Se emplea tanto en celdas y columnas de flotación.	Requiere precisión en la determinación del volumen de la pulpa aireada.
Hold-up 2D [24] [25]	Utiliza las imágenes obtenidas por la cámara de alta velocidad.	La determinación conlleva a un error estereológico y que se trata de

No se requiere de otros dispositivos/sensores para la determinación del hold-up.

A continuación, se ejemplifica el cálculo de la concentración de gas, evaluando el efecto del tamaño de burbuja a una velocidad superficial de gas dada. Si se tiene una celda de flotación industrial del tipo mecánica de $200 [m^3]$ ($V_{cell}, [m^3]$), donde el 85% del volumen de la celda corresponde al volumen efectivo ($V_{efectivo}, [m^3]$), debido a que se excluye el volumen ocupado por el sistema de agitación de la pulpa y generación de burbujas (Ver Figura 2.9). Este equipo de flotación presenta un diámetro ($d_{cell}, [m]$) de $5.82 [m]$, una altura ($h_{cell}, [m]$) de $7.52 [m]$, y opera con una velocidad superficial de gas ($J_g, [cm/s]$) de $1.5 [cm/s]$. El volumen de control de la celda ($V_{control}, [m^3]$), corresponde al 1.5 [%] del volumen efectivo y el tamaño de burbuja presente al interior del equipo de flotación correspondió a un diámetro de burbuja de $1.0 [mm]$ para la condición (A). Se pide determinar la concentración de gas en relación a la condición (A), como se observa en la Figura 2.10 (A). Además, se pide determinar la concentración de gas y evaluar el efecto del tamaño de burbuja sobre el hold-up si las burbujas presentan un diámetro de $2.0 [mm]$ para la condición (B). Ver Figura 2.10 (B).

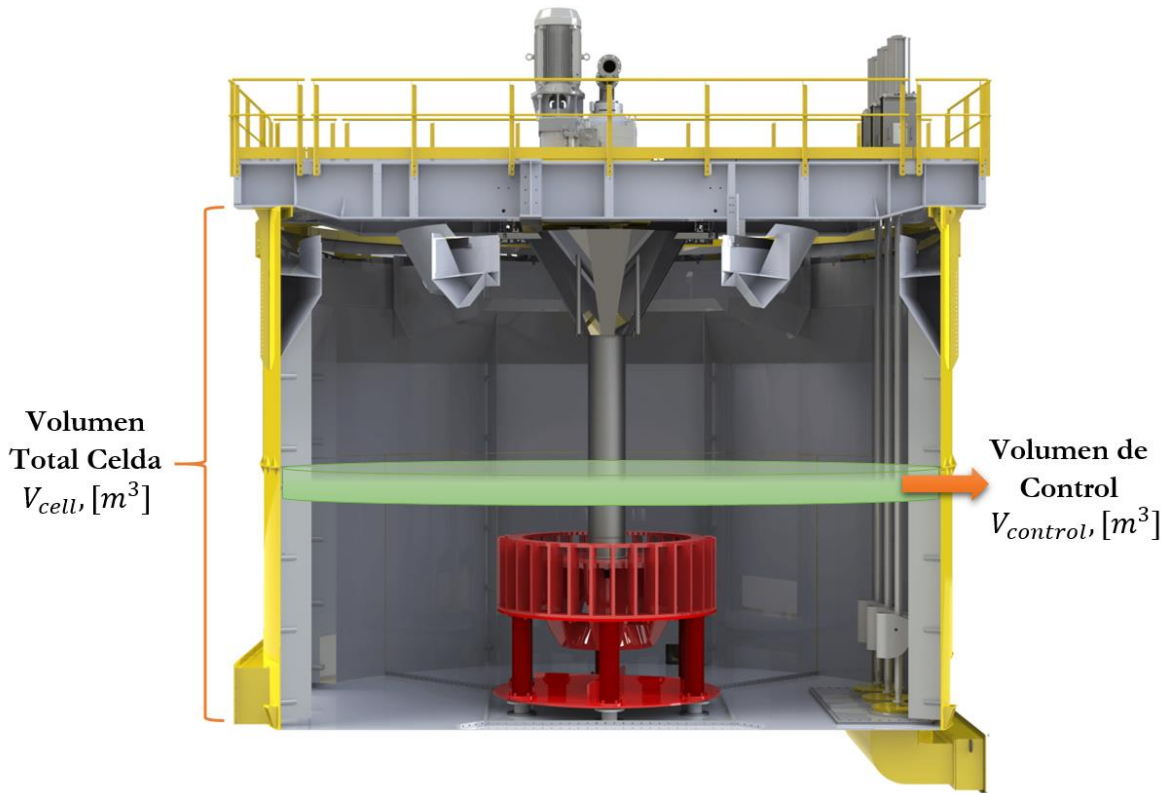


Figura 2.9 Representación esquemática del volumen total de la celda mecánica Outotec ($V_{cell}, [m^3]$) y volumen de control ($V_{control}, [m^3]$), adaptado de Output Outotec, 2012 [26].

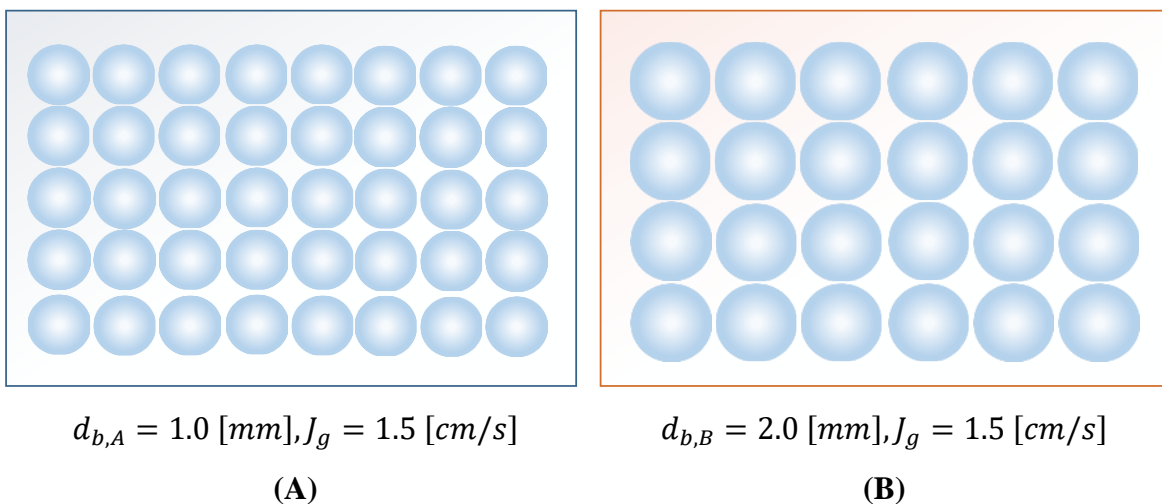


Figura 2.10 Representación cálculo de hold-up para un volumen de control de la celda ($V_{control}, [m^3]$), donde se tienen burbujas de $1.0 [mm]$ de diámetro en la condición (A) y burbujas de $2.0 [mm]$ de diámetro en la condición (B).

Con el fin de abordar el cálculo del hold-up de gas, es necesario establecer una serie de criterios, los cuales se detallan a continuación:

- Se asume un mono tamaño de las burbujas, es decir, que todas las burbujas del sistema presentan el mismo diámetro. Dado que para fines ilustrativos se adopta este criterio, se debe tener en consideración que en los sistemas de flotación se presenta una distribución de tamaño de burbujas.
- Las burbujas presentan una geometría perfectamente esférica.

Ya establecidos los supuestos para resolver este problema, se describe en primera instancia la secuencia de cálculo del hold-up para el sistema (A) de la Figura 2.10.

Paso 1: Se calcula el volumen de una burbuja ($V_{b,A}$, [cm^3 o m^3]) mediante la Ecuación (2.37), utilizando el valor de diámetro de burbuja para la condición (A) ($d_{b,A}$, [mm]).

$$V_{b,A} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\pi \cdot d_{b,A}^3}{8}, [cm^3 \text{ o } m^3] \quad (2.37)$$

Donde:

$$V_{b,A} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\pi \cdot \left(\frac{1.0[mm]}{1000 \left[\frac{mm}{m} \right]} \right)^3}{8} = 5.23 \cdot 10^{-10} [m^3] = 0.0005 [cm^3] \quad (2.38)$$

Paso 2: Se determina el número total de burbujas ($n_{tb,A}$, [n° burbujas/s]), de acuerdo a lo expresado en la Ecuaciones (2.39), (2.40) y (2.41), donde Q_g [m^3/s] corresponde al caudal de gas alimentado en la celda de flotación y A_c [cm^2 o m^2] al área transversal de la celda.

$$n_{tb,A} = \frac{Q_g [m^3/s]}{V_{b,A} [m^3]}, [n^\circ \text{ burbujas/s}] \quad (2.39)$$

$$Q_g = A_c \cdot J_g, [cm^3/s \text{ o } m^3/s] \quad (2.40)$$

$$A_c = \pi \cdot \frac{d_{cell}^2}{4}, [cm^2 \text{ o } m^2] \quad (2.41)$$

Reemplazando los valores de d_{cell} [m], J_g [cm/s] y $V_{b,A}$ [m³] en las ecuaciones anteriormente presentadas, se obtiene:

$$A_c = \pi \cdot \frac{(5.82 [m])^2}{4} = 26.59 [m^2] = 265898.34 [cm^2] \quad (2.42)$$

$$Q_g = 265898.34 [cm^2] \cdot 1.5 [cm/s] = 398847.51 [cm^3/s] = 0.40 [m^3/s] \quad (2.43)$$

$$n_{tb,A} = \frac{0.40 [m^3/s]}{5.23 \cdot 10^{-10} [m^3]} = 762,219,000 [n^\circ \text{ burbujas/s}] \quad (2.44)$$

Paso 3: Se determina el volumen total de las burbujas ($V_{tb,A}$, [m³]), utilizando el número total de burbujas ($n_{tb,A}$, [n^o burbujas/s]) y el volumen de una burbuja ($V_{b,A}$, [cm³ o m³]) para la condición (A), según lo indicado por la Ecuación (2.45).

$$V_{tb,A} = V_{b,A} \cdot n_{tb,A}, [m^3] \quad (2.45)$$

Resultando:

$$V_{tb,A} = 5.23 \cdot 10^{-10} [m^3] \cdot 762,219,000 [n^\circ \text{ burbujas/s}] = 0.4 [m^3] \quad (2.46)$$

Paso 4: Se determina el volumen de control de la celda ($V_{control}$, [m³]), según lo expresado en las Ecuaciones (2.47) y (2.48).

$$V_{efectivo} = 85 [\%] \cdot V_{cell} [m^3] = 0.85 \cdot 200 [m^3] = 170 [m^3] \quad (2.47)$$

$$V_{control} = 1.5 [\%] \cdot V_{efectivo} = 0.015 \cdot 170 [m^3] = 2.55 [m^3] \quad (2.48)$$

Paso 5: Se procede a calcular el hold-up de gas ($\varepsilon_{g,A}$, [%]) mediante la Ecuación (2.49).

$$\varepsilon_{g,A} = \left(\frac{V_{tb,A} [m^3]}{V_{control} [m^3]} \right) \cdot 100, [\%] \quad (2.49)$$

Obteniéndose:

$$\varepsilon_{g,A} = \left(\frac{0.4 [m^3]}{2.55 [m^3]} \right) \cdot 100 = \mathbf{15.64} [\%] \quad (2.50)$$

Cabe destacar, que los valores de diámetro de burbuja, velocidad superficial de gas y concentración de gas, para la condición (A), se encuentran en sincronía con las Ecuaciones (2.51) y (2.52) [27] [28].

$$S_b [s^{-1}] \cong 5.5 \varepsilon_g [\%] \quad (2.51)$$

$$S_b = \frac{6 \cdot J_g [cm/s]}{d_{32} [cm]}, [s^{-1}] \quad (2.52)$$

Despejando la Ecuación (2.52) en función del diámetro de burbuja (d_{32} , [cm]) se obtiene:

$$d_{32} = \frac{6 \cdot J_g [cm/s]}{S_b}, [cm] \quad (2.53)$$

Por lo que si reemplaza $\varepsilon_{g,A} = 15.64[\%]$ en la Ecuación (2.51) se obtiene un S_b de:

$$S_{b,A} = 5.5 \cdot (15.64[\%]) = 86.02[s^{-1}] \quad (2.54)$$

Considerando un valor de $J_g = 1.5[cm/s]$ para la Ecuación (2.53), se obtiene un tamaño de burbuja correspondiente para la condición (A) de:

$$d_{32,A} = \frac{6 \cdot 1.5[cm/s]}{86.02[s^{-1}]} = 0.1046[cm] = 1.046[mm] \quad (2.55)$$

Mediante el cálculo del $d_{32,A}$ fue posible verificar que los valores de hold-up, velocidad superficial de gas y tamaño de burbuja se encuentran en sincronía para la condición (A), dado que la relación presentada en la Ecuación (2.51) es una aproximación válida para la estimación del flujo superficial de área de burbuja y el $d_{32,A} = 1.046[mm]$ resultó un valor cercano al diámetro establecido inicialmente en el ejemplo, correspondiente a $1[mm]$.

Con respecto a la condición (B), donde se tienen burbujas de $2.0[mm]$ de diámetro ($d_{b,B}, [mm]$), es posible determinar el hold-up de gas ($\varepsilon_{g,B}, [\%]$) mediante la relación entre las Ecuaciones (2.56) y (2.57) [27] [28].

$$S_{b,B}[s^{-1}] \cong 5.5 \varepsilon_{g,B}[\%] \quad (2.56)$$

$$S_{b,B} = \frac{6 \cdot J_g[cm/s]}{d_{32,B}[cm]}, [s^{-1}] \quad (2.57)$$

Reemplazando $J_g = 1.5 [cm/s]$ y $d_{32,B} = d_{b,B} = 2.0 [mm] = 0.2 [cm]$ en la Ecuación (2.57) y asumiendo que la relación presentada Ecuación (2.56) es una aproximación válida y aplicable para el presente ejemplo, se despeja y se calcula el hold-up se gas de dicha relación, obteniéndose:

$$S_{b,B} = \frac{6 \cdot J_g [cm/s]}{d_{b,B}[mm]} = \frac{6 \cdot 1.5 [cm/s]}{2.0 [mm] \cdot \frac{1 [cm]}{10 [mm]}} = 45[s^{-1}] \quad (2.58)$$

$$\varepsilon_{g,B} = \frac{S_{b,B}[s^{-1}]}{5.5} = \frac{45 [s^{-1}]}{5.5} = \mathbf{8.18 [\%]} \quad (2.59)$$

Este ejemplo permitió visualizar que un aumento del diámetro de burbuja al doble repercute en el valor de concentración de gas obtenida, dado que la concentración de gas para la condición (A) fue 1.91 veces mayor en comparación a la concentración de gas de la condición (B), manteniéndose fija la velocidad superficial del gas para ambos casos. Esto indica que al aumentar el diámetro de burbuja a una velocidad superficial de gas fija, el hold-up de gas

disminuye, debido a que volumen de las burbujas disponible para flotación se reduce junto con el área superficial de las burbujas. Por lo tanto, con el fin de ilustrar la dinámica de la relación entre la concentración de gas, velocidad superficial de gas y diámetro de burbuja, se presenta la Figura 2.11 en base a las Ecuaciones (2.51), (2.52) y (2.53). Los datos que se utilizaron para la construcción de la Figura 2.11 se presentan en la Sección 8.2.

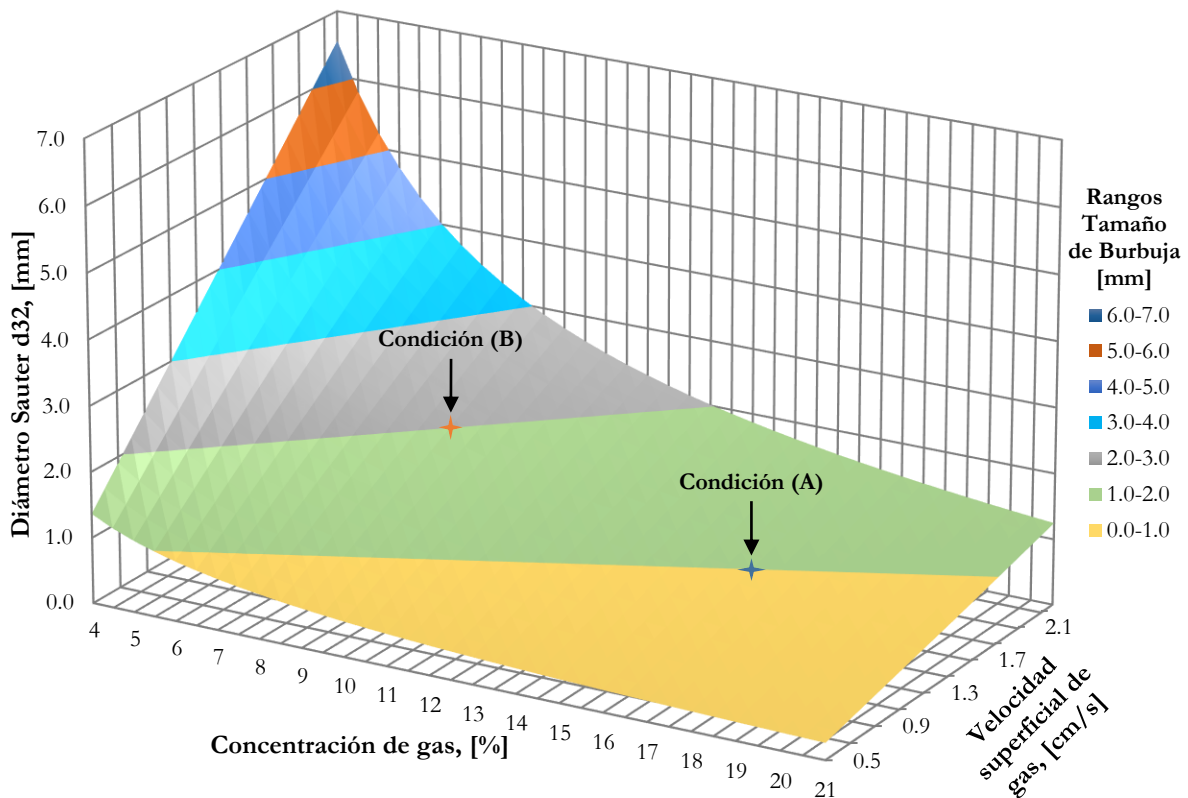


Figura 2.11 Relación entre la concentración de gas (4 – 21 [%]), velocidad superficial de gas (0.5 – 2.4 [cm/s]) y tamaño de burbuja (0.26 – 6.55 [mm]).

Es posible observar en la Figura 2.11 que la superficie delimitada por el color verde representa tamaños de burbuja entre 1.0 – 2.0 [mm] para un amplio rango de concentración de gas y velocidad superficial de gas. Además, los resultados obtenidos en el ejemplo anterior sobre el cálculo de la concentración de gas, evaluando el efecto del tamaño de burbuja a una velocidad superficial de gas dada, se indican en la gráfica para la condición (A) y (B), respectivamente.

2.1.3 Distribución de Tamaño de Burbuja (BSD, [mm])

Dado que las burbujas son el medio de transporte de las partículas de mineral y el agua al interior del equipo de flotación, la distribución de tamaño de burbuja, y consecuentemente el tamaño de burbuja, se consideran indicadores relevantes en la dispersión del gas, ya que representan el estado de atomización del aire en la pulpa, y repercuten sobre la eficiencia del proceso de colección, transporte del agregado partícula – burbuja y separación de minerales lograda en el proceso de flotación [29]. Debido a esto, la forma que adopte la BSD es consecuencia del proceso de dispersión de gas y coalescencia [12].

Según la literatura, en el trabajo de Gorain *et al.*, 1995 [15] se demostró que el tamaño de burbuja incrementaba a medida que se aumentaba el caudal de aire, aunque también se destacó que la forma que tenía la BSD se modificaba según la ubicación de muestreo a lo largo de una la celda mecánica.

En la práctica, la BSD se representa usualmente por el diámetro promedio Sauter (d_{32} , [mm]) y se puede estimar según la Ecuación (2.60). El diámetro promedio Sauter representa un valor medio de una población de burbujas, donde la relación entre el volumen total y área total es igual a la de la población real de burbujas medidas [3].

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} d_i^3 [mm^3]}{\sum_{i=1}^{i=n} d_i^2 [mm^2]}, [mm] \quad (2.60)$$

Donde:

d_{32} : Diámetro promedio Sauter, [mm].

d_i : Diámetro esférico equivalente de la i -ésima burbuja, [mm].

n : Tamaño de la muestra.

En relación a la estimación del tamaño de burbuja para el presente trabajo de memoria, esta se abordará desde dos perspectivas que se detallarán en capítulos futuros. Estas dos aproximaciones corresponden a:

- Análisis de flujo a la deriva (i.e., esto quiere decir Drift Flux analysis en inglés). Ver Capítulo III.
- Análisis de imágenes (i.e., esto quiere decir Image analysis en inglés). Ver Sección 4.2.1.

2.1.4 Flujo Superficial de Área de Burbuja ($S_b, [s^{-1}]$)

El $S_b, [s^{-1}]$ corresponde el área superficial de burbuja por unidad de tiempo por unidad de área de sección transversal de un equipo de flotación [28]. Es posible determinar el flujo superficial de área de burbuja mediante la relación de los parámetros de velocidad superficial del gas y el tamaño de burbuja como se expone en la Ecuación (2.61).

$$S_b = \frac{6 \cdot J_g [cm/s]}{d_{32} [mm]}, \left[\frac{\frac{m^2 \text{ área de burbuja}}{s}}{m^2 \text{ área celda flotación}} \right] \text{ ó } [s^{-1}] \quad (2.61)$$

El $S_b, [s^{-1}]$ se relaciona con el rendimiento de la flotación, debido a que esta es un proceso de carácter superficial y apunta directamente al área superficial del aire. Se correlaciona con la constante de velocidad de flotación (k) [30] [31], e impacta del desempeño directamente el desempeño metalúrgico. El flujo superficial de área de burbuja es un descriptor clave de las condiciones hidrodinámicas en una celda de flotación, en cuanto a las propiedades de dispersión de gas que presenta el equipo, ya que es un indicador práctico del proceso de dispersión de aire. El $S_b, [s^{-1}]$ ha sido utilizado como un criterio para la caracterización, diseño, modelación, evaluación y optimización de los equipos y planta de flotación [5] [30].

Cabe destacar, que hay una aproximación que permite relacionar linealmente el hold-up con el $S_b, [s^{-1}]$ [27] descrita por la Ecuación (2.62).

$$S_b [s^{-1}] \cong 5.5 \varepsilon_g [\%] \quad (2.62)$$

En relación a la Ecuación (2.62), es posible apreciar que el valor de hold-up corresponde directamente a un valor porcentual y no fraccional. Además, esta ecuación evidencia que a medida que el hold-up de gas aumenta el flujo de área superficial de burbuja también incrementa. Esto se debe a que la concentración de aire, como se demostró en el ejemplo anterior sobre el cálculo del hold-up para burbujas de 1.07 y 1.16 [mm], tiene asociada una superficie de área de burbuja y es el S_b , [s^{-1}] el parámetro de dispersión de gas que relaciona el flujo de esa área superficial de burbuja por unidad de tiempo con el área transversal del equipo de flotación. Conjuntamente, la relación presentada en la Ecuación (2.62) es aplicable a celdas mecánicas y columnas de flotación, tanto a escala laboratorio como industrial, para un rango de $S_b < 130 s^{-1}$ y $\varepsilon_g < 25 \%$ y también aplicaría para dispositivos de flujo descendente, teniendo la salvedad de que el hold-up esté referido al tanque de separación, zona donde sería posible alcanzar valores de hold-up menores a 25% (Ver Tabla 2.5).

2.1.5 Rangos de Operación

A modo de recopilar la información presentada sobre los parámetros de dispersión de gas, en la Tabla 2.5 se resumen los valores operacionales de estos parámetros para celdas mecánicas, columnas y celdas Jameson (celda de flujo descendente).

Tabla 2.5 Parámetros de dispersión de gas para máquinas de flotación convencionales y celda Jameson [23] [11] [32] [13] [22] [33].

Parámetro	Unidad	Celdas Mecánicas	Columnas	Celda Jameson
Velocidad superficial de gas, J_g ⁸	[cm/s]	0.63 – 2.7	1 – 3	0.5 – 2
Hold-up de gas, ε_g ⁹	[%]	3 – 26	10 – 30	40 – 60
Tamaño de burbuja, d_b ¹⁰	[mm]	1.03 – 2.7	1.5 – 3	0.6 – 1.3
Flujo superficial de área de burbuja, S_b	[s^{-1}]	24 – 83	20 – 60	50 – 90

⁸ En celdas mecánicas y columnas de flotación, medido respecto al área de la sección transversal del equipo; en la celda Jameson, medido respecto al área de la sección transversal del estanque de separación, excluyendo el área ocupada por el downcomer.

⁹ En celdas mecánicas y columnas de flotación, medido en la zona de colección; en la celda Jameson, medido en el downcomer (hold-up referido al tanque de separación: 20-40% [13]).

¹⁰ En celdas mecánicas y columnas de flotación, medido en la interfase pulpa-espuma; en la celda Jameson, medido en el tanque de separación.

2.2 Reactivos de Flotación

Dado que la métrica de inyección del aire es la fuerza motriz del proceso de flotación, y es de vital importancia fomentar y preservar una interacción favorable entre partículas y burbujas del tipo hidrófoba¹¹ para obtener resultados efectivos de separación y concentración, es necesario recurrir al uso de reactivos químicos en la flotación de minerales [34].

Existen minerales que presentan hidrofobicidad natural, como el Carbón, Pirita, Galena, Estibina, Calcosina, Molibdenita, Grafito, Azufre, Talco, entre otros [34] [35] [36]. Sin embargo, en algunos casos el nivel de hidrofobicidad natural no es suficiente para prescindir de reactivos químicos en la flotación, debido a esto, se debe tener un nivel de hidrofobicidad inducida mediante el uso de reactivos, con tal de tener el control de este proceso de separación [37]. Es por ello, que el uso de reactivos químicos en el procesamiento de minerales constituye una parte inseparable del proceso de flotación, ya que sin estos el proceso sería imposible de llevar a cabo. Los reactivos de flotación se consideran una estrategia para el tratamiento de nuevos minerales o mejora de las operaciones existentes [38]. Entre los reactivos más utilizados en flotación, destacan el colector y el espumante, los cuales se describen a continuación.

2.2.1 Colector

Debido a que el proceso de flotación emplea la diferencia en la química superficial (humectabilidad) de los minerales en el agua para lograr una separación selectiva [39] [40], se debe contar con la presencia de minerales hidrofóbicos flotantes (mineral valioso) y el rechazo de los hidrofílicos¹² (ganga) al interior de un equipo de flotación. Es por esto, que el uso de productos químicos orgánicos, conocidos como colectores, permite conferirle características hidrofóbicas a un mineral de naturaleza hidrofílica y/o aumentar el nivel de hidrofobicidad de un material hidrofóbico, gracias a su interacción específica y selectiva con la superficie del mineral valioso. Al conferirle la característica de hidrofobicidad al mineral valioso, este puede ser colectado selectivamente durante el proceso de flotación [3]. Por otro lado, el colector no se adsorberá en la superficie de la ganga, por lo que este material será

¹¹ Interacciones que presentan una repelencia natural al agua [50].

¹² Interacciones que presentan una afinidad especial por el agua [102].

descartado como desecho en el proceso de flotación. Estructuralmente, el colector se compone de una cabeza polar cargada y una cadena no polar, generalmente compuesta por hidrocarburos (Ver Figura 2.12).

Además, existen dos grandes clasificaciones para los colectores, las cuales consisten en:

Colectores Ionizables

Corresponden a compuestos ionizables disociables en agua. Pueden sub-dividirse en dos tipos: colectores aniónicos y colectores catiónicos. Los colectores aniónicos son los más utilizados en el proceso de flotación ya que presentan un grupo polar de carga negativa (-) de composición variada (basado en ácido orgánico, aniones ácidos sulfo, azufre bivalente, etcétera), que permiten conferirle al mineral la característica de repelencia al agua. Por otro lado, los colectores catiónicos poseen un grupo polar de carga positiva (+) basado en nitrógeno pentavalente que torna la superficie mineral hidrófoba [38].

Entre los colectores del tipo aniónico destacan los xantantos, ditiofosfinato (R3418A de Cytec), dodecil sulfonato sódico y oleato sódico; y para los colectores catiónicos, se tiene el colector sebo-1,3-diaminopropano (Duomeen T de Akzo Nobel), n-Dodecil amina y anilina [41] [38].

Colectores no Ionizables

Estas sustancias químicas pertenecen a la clase de compuestos hidrocarbonados, es decir, hidrocarburos líquidos no polares obtenidos a partir de petróleo crudo o de carbón, que no pueden disociarse para formar iones o son insolubles en agua. Los colectores no ionizables crean una película delgada sobre la superficie del mineral, confiriéndole la característica de hidrofobicidad. Dentro de los colectores comerciales para esta categoría destacan: queroseno, aceite de transformador y aceites de hidrocarburos sintéticos [38].

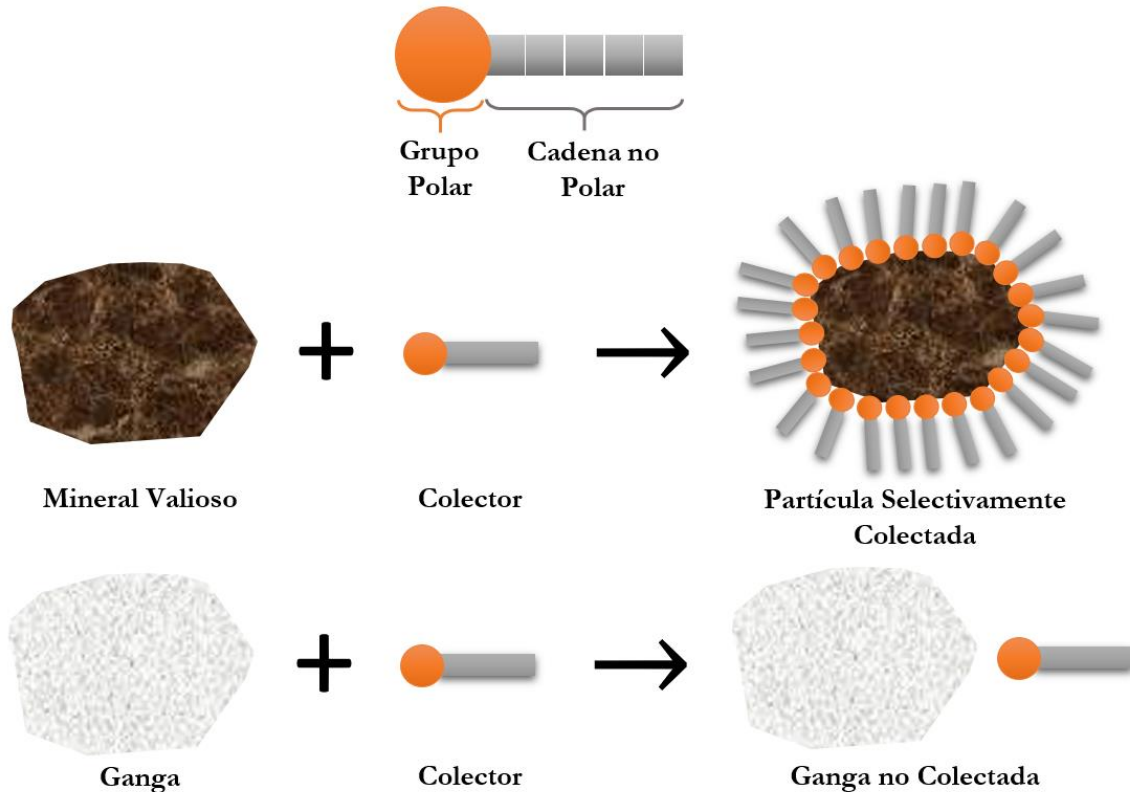


Figura 2.12 Representación del proceso de adsorción superficial selectivo del espumante sobre partícula de mineral valioso y ganga no colectada, adaptado de Urrea, 2016 [42].

Ya habiendo detallado las características y funciones del colector, damos paso a la descripción del espumante. Cabe destacar, que el colector es un reactivo químico enfocado en la partícula de mineral, y se reporta en unidades de $\left[\frac{\text{gramos de colector}}{\text{tonelada de mineral}}\right] = \left[\frac{g}{t}\right]$ [43]. Por otro lado, el espumante corresponde a un reactivo químico que se enfoca en el entorno que está sobre la partícula de mineral, y se reporta en unidades de $\left[\frac{\text{microlitro de espumante}}{\text{Litro de pulpa}}\right] = \left[\frac{\mu L}{L}\right]$ [32]. Para ambos casos la referencia difiere, sin embargo, las unidades señaladas tanto para el colector y el espumante, corresponden a partes por millón [ppm].

2.2.2 Espumante

Los espumantes son reactivos químicos conocidos como tensoactivos o surfactantes¹³. La tensión superficial (γ) es una propiedad física relacionada con el trabajo necesario para aumentar en $1[cm^2]$ el área superficial de un sistema multicomponente, bajo condiciones de adsorción [44] [45]. Las unidades de tensión superficial corresponden a fuerza por unidad de longitud, expresada en $\left[\frac{mN}{m}\right]$ ó $\left[\frac{dina}{cm}\right]$ [44]. Además, es posible determinar la tensión superficial mediante la Ecuación (5.1).

$$\gamma = \left(\frac{\partial F^s}{\partial A^s}\right)_{T,V^s,n_j^s} = \left(\frac{\partial F}{\partial A^s}\right)_{T,V,n_j} \quad (2.63)$$

Donde:

γ : Tensión superficial, $\left[\frac{mN}{m}\right]$ ó $\left[\frac{dina}{cm}\right]$.

F^s : Energía libre de Helmholtz en la interfase, $[J]$ ó $[erg]$.

A^s : Área de la interfase, $[m^2]$ ó $[cm^2]$.

T : Temperatura del sistema total, $[K]$.

V^s : Volumen interfacial, $[m^3]$ ó $[cm^3]$.

n_j^s : Número de moles de la especie j en la interfase, $[moles]$.

V : Volumen interfacial del sistema total, $[m^3]$ ó $[cm^3]$.

n_j : Número de moles de la especie j del sistema total, $[moles]$.

Por otro lado, en la Figura 2.13 se aprecia el efecto que tiene el tipo y concentración del espumante sobre la tensión superficial, evidenciándose que un aumento en la concentración del surfactante disminuye la tensión superficial de la solución.

¹³ Los tensoactivos (también llamados surfactantes) corresponden a sustancias que presentan actividad en las superficies, y en particular, repercuten sobre la tensión superficial del plano de contacto entre dos fases. Si un tensoactivo es añadido a un líquido, este presenta la capacidad de disminuir su tensión superficial, aumentando así sus propiedades de dispersión y humectación. Estas sustancias contienen moléculas con partes hidrofílicas (grupo polar) e hidrofóbicas (grupo no polar) [99] [100] [101].

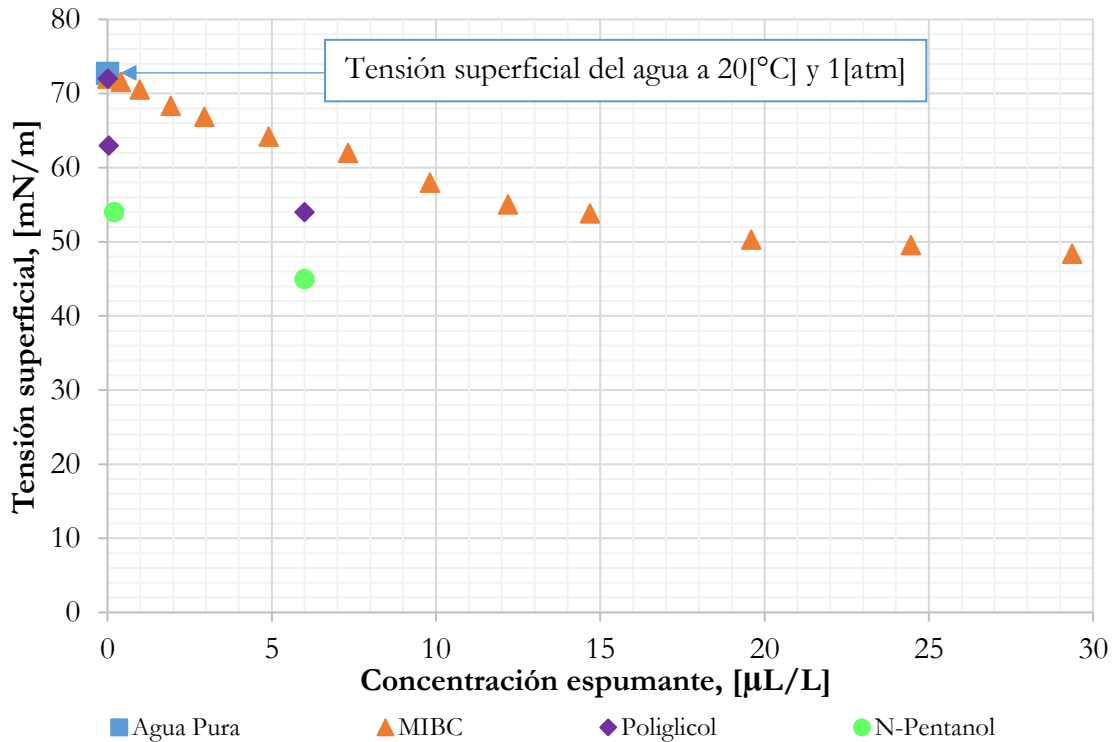


Figura 2.13 Efecto del tipo y concentración [µL/L] del espumante en la tensión superficial [mN/m], adaptado de Vilinska *et al.*, 2013 [46], Acuña, 2007 [47] y Vargaftik *et al.*, 1983 [48]. Datos experimentales se adjuntan en la Sección 8.3.

Estos reactivos son empleados en el proceso flotación de minerales para preservar una alta población de pequeñas burbujas (lo que permite un aumento en el área superficial de burbujas disponible para la flotación) y contribuir a la formación de una fase de espuma estable sobre la superficie de la pulpa, que beneficia la recolección de partículas. La función principal del espumante es evitar y/o retardar la coalescencia (i.e., unión de dos o más burbujas que forman una burbuja de mayor tamaño [49]), dado que es la coalescencia la que determina el tamaño final de las burbujas y tiene lugar en el punto de generación de las burbujas [50]. Además, al presentarse coalescencia de las burbujas, se produce una reducción del área superficial disponible de las burbujas para la flotación, repercutiendo el rendimiento de este proceso, ya que la flotación es un proceso superficial [51].

En esta sección, es conveniente ejemplificar la reducción del área superficial de las burbujas bajo los efectos de coalescencia. A modo de ejercicio, se utilizará la información presentada en la Sección 2.1.2 respectiva al cálculo de la concentración de gas y el efecto del tamaño de

burbuja a una velocidad superficial de gas dada. Si se cuenta con burbujas de $1.046 [mm]$ en la condición (A) que coleasen y formen burbujas de $2.0 [mm]$ de diámetro en la condición (B), determinar cuántas burbujas están implicadas en la coalescencia y calcular la reducción de área asociada, como se observa en la Figura 2.14.

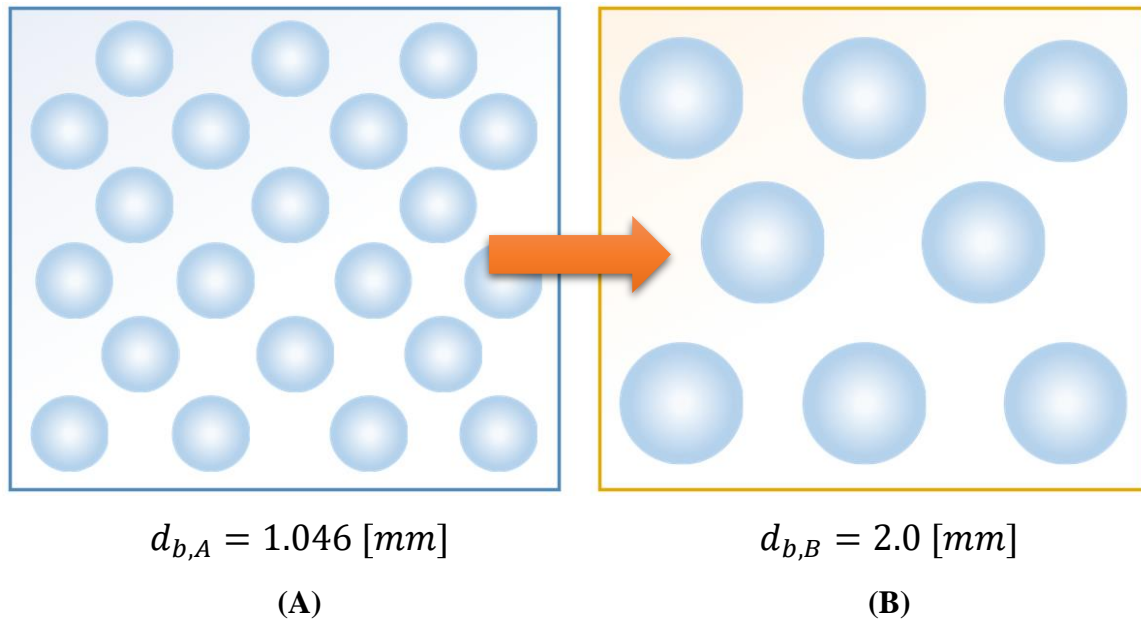


Figura 2.14 Esquematización de la reducción de área de burbuja por coalescencia para dos condiciones. La condición (A) representa un sistema con burbujas de $1.046 [mm]$ de diámetro y la condición (B) representa la unión de burbujas de $1.046 [mm]$ de diámetro que forman burbujas de $2.0 [mm]$ de diámetro.

Con el propósito de determinar el área superficial total de las burbujas de $1.046 [mm]$ de diámetro presentes en el sistema, se describe la secuencia de cálculo respectiva a la condición (A).

Paso 1: Se calcula el área ($A_{b,A}, [m^2]$) y volumen ($V_{b,A}, [m^3]$) de una burbuja de $1.046 [mm]$ de diámetro ($d_{b,A}, [mm]$), según lo descrito en la condición (A), mediante las Ecuaciones (2.64) y (2.65).

$$A_{b,A} = \pi \cdot d_{b,A}^2 = \pi \cdot \left(\frac{1.046 \text{ [mm]}}{1000 \frac{\text{[mm]}}{\text{[m]}}} \right)^2 = 3.44 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2] \quad (2.64)$$

$$V_{b,A} = \frac{\pi \cdot d_{b,A}^3}{6} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{1.046 \text{ [mm]}}{1000 \frac{\text{[mm]}}{\text{[m]}}} \right)^3}{6} [\text{m}^3] = 5.99 \cdot 10^{-10} [\text{m}^3] \quad (2.65)$$

Paso 2: Se calcula el volumen total de las burbujas ($V_{tb,A}$, [m^3]) para una concentración de gas ($\varepsilon_{g,A}$, [%]) de 15.64 [%] y un volumen de control ($V_{control}$, [m^3]) de 2.55 [m^3].

$$V_{tb,A} = \varepsilon_{g,A} \cdot V_{control} = \frac{(15.64[\%]) \cdot (2.55[\text{m}^3])}{100} = 0.4[\text{m}^3] \quad (2.66)$$

Paso 3: Se determina el número de burbujas ($n_{burbujas,A}$, [*Burbujas*]) contenidas en el volumen total de las burbujas para la condición (A) ($V_{tb,A}$, [m^3]), como se presenta en la Ecuación (2.67).

$$n_{burbujas,A} = \frac{V_{tb,A}}{V_{b,A}} = \frac{0.4[\text{m}^3]}{5.99 \cdot 10^{-10}[\text{m}^3]} = 665,724,653[\text{Burbujas}] \quad (2.67)$$

Paso 4: Se calcula el área de superficie de burbuja total ($A_{tb,A}$, [m^2]), en base al número de burbujas ($n_{burbujas,A}$, [*Burbujas*]) y el área de una burbuja ($A_{b,A}$, [m^2]), respectiva a la condición (A).

$$A_{tb,A} = n_{burbujas,A}[\text{Burbujas}] \cdot A_{b,A}[\text{m}^2] \quad (2.68)$$

$$A_{tb,A} = 665,724,653[\text{Burbujas}] \cdot 3.44 \cdot 10^{-6}[\text{m}^2] = 2288.27[\text{m}^2] \quad (2.69)$$

De la misma forma, con el fin de determinar el área superficial total de las burbujas de 2.0 [mm] de diámetro presentes en el sistema, se describe la secuencia de cálculo respectiva a la condición (B).

Paso 1: Se calcula el área ($A_{b,B}$, [m^2]) y volumen ($V_{b,B}$, [m^3]) de una burbuja de 2.0 [mm] de diámetro ($d_{b,B}$, [mm]), según lo descrito en la condición (B), mediante las Ecuaciones (2.70) y (2.71).

$$A_{b,B} = \pi \cdot d_{b,B}^2 = \pi \cdot \left(\frac{2.0 \text{ [mm]}}{1000 \left[\frac{\text{mm}}{\text{m}} \right]} \right)^2 = 1.26 \cdot 10^{-5} [m^2] \quad (2.70)$$

$$V_{b,B} = \frac{\pi \cdot d_{b,B}^3}{6} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{2.0 \text{ [mm]}}{1000 \left[\frac{\text{mm}}{\text{m}} \right]} \right)^3}{6} [m^3] = 4.19 \cdot 10^{-9} [m^3] \quad (2.71)$$

Paso 2: Se calcula el volumen total de las burbujas ($V_{tb,B}$, [m^3]) para una concentración de gas ($\varepsilon_{g,B}$, [%]) de 8.18 [%] y un volumen de control ($V_{control}$, [m^3]) de 2.55 [m^3].

$$V_{tb,B} = \varepsilon_{g,B} \cdot V_{control} = \frac{(8.18[\%]) \cdot (2.55[m^3])}{100} = 0.21[m^3] \quad (2.72)$$

Paso 3: Se determina el número de burbujas ($n_{burbujas,B}$, [Burbujas]) contenidas en el volumen total de las burbujas para la condición (B) ($V_{tb,B}$, [m^3]), como se presenta en la Ecuación (2.73).

$$n_{burbujas,B} = \frac{V_{tb,B}}{V_{b,B}} = \frac{0.21[m^3]}{4.19 \cdot 10^{-9}[m^3]} = 49,808,262.87 [Burbujas] \quad (2.73)$$

Paso 4: Se calcula el área de superficie de burbuja total ($A_{tb,B}$, [m^2]), en base al número de burbujas ($n_{burbujas,B}$, [Burbujas]) y el área de una burbuja ($A_{b,B}$, [m^2]), respectiva a la condición (B).

$$A_{tb,B} = n_{burbujas,B} [Burbujas] \cdot A_{b,B} [m^2] \quad (2.74)$$

$$A_{tb,B} = 49,808,262.87 [Burbujas] \cdot 1.26 \cdot 10^{-5} [m^2] = 625.91 [m^2] \quad (2.75)$$

Paso 5: Se compara el área de superficie de burbuja total para la condición (A) y (B) mediante la Ecuación (2.76).

$$Razón = \frac{A_{tb,A} [m^2]}{A_{tb,B} [m^2]}, [-] \quad (2.76)$$

$$Razón = \frac{2288.27 [m^2]}{625.91 [m^2]} = 3.66 [-] \quad (2.77)$$

Dado que la flotación es un proceso superficial, gracias a este ejemplo, fue posible cuantificar y evaluar el impacto de la coalescencia en el área superficial de burbuja disponible en el sistema de flotación. Al unirse las burbujas de 1.046 [mm] de diámetro y formar burbujas de 2.0 [mm] de diámetro, se produce una reducción del área superficial de 1062.36 [m²] yendo del escenario (A) al escenario (B), en otras palabras, el área se reduce 3.66 veces. En la Tabla 2.6 se presenta un resumen de los valores respectivos al número total de burbujas, área superficial y volumen total de las burbujas para la condición (A) y (B).

Tabla 2.6 Resumen de resultados obtenidos en relación al número total de burbujas, área y volumen total de las burbujas para la condición (A) y (B), respectivamente.

Condición	Diámetro burbuja [mm]	J_g [cm/s]	ε_g [%]	Número total de burbujas	Área total de burbujas [m ²]	Volumen total de burbujas [m ³]
A	1.046	1.5	15.64	665,724,653	2288.27	0.40
B	2.0	1.5	8.18	49,808,262.87	625.91	0.21

Los espumantes presentan una estructura heteropolar, es decir, cuentan con una cabeza o grupo polar (hidrofilico) y una cadena de hidrocarbomos no polar (hidrofóbica, radical) [52], tal como se esquematiza en la Figura 2.15.

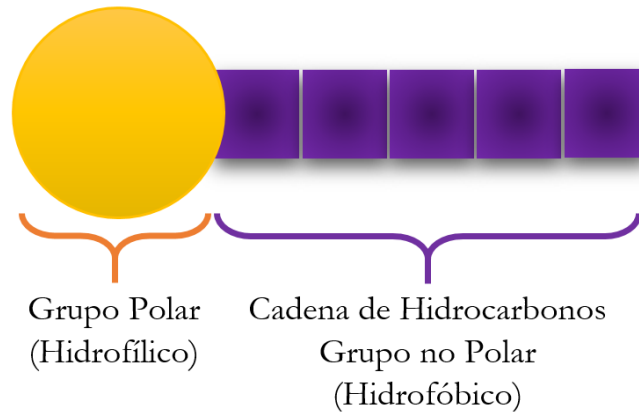


Figura 2.15 Esquema de la molécula de espumante, adaptado de Finch *et al.*, 2008 [51].

La estructura heteropolar de los espumantes se adsorbe en una interfaz aire-agua (i.e., superficie de la burbuja en contacto con la fase líquida), donde el grupo polar se orienta hacia la fase líquida (agua o pulpa) y la cadena de hidrocarburos se orienta hacia la fase gaseosa (interior de la burbuja). La orientación de la estructura heteropolar permite estabilizar una película de agua sobre la superficie de la burbuja, lo que ayuda a retardar la coalescencia y cooperar activamente con el colector adsorbido, debido a que existe un balance sutil del nivel de polaridad entre la superficie de la burbuja y la superficie del mineral, al momento de la formación del agregado partícula-burbuja. Este balance está dado por la orientación de la molécula de espumante en la burbuja y la absorción del colector sobre la superficie del mineral. Como se mencionó anteriormente, la cabeza del espumante (grupo polar) queda orientada hacia la fase líquida, confiriéndole a la burbuja un grado de polaridad mayor en comparación al que presenta la cadena hidrocarbonada del espumante, ubicada hacia el interior de la burbuja. Este grupo polar del espumante se encuentra en equilibrio con la cadena no polar del colector, la cual le confiere al mineral la propiedad de hidrofobicidad y se repele con el agua que es altamente polar, permitiendo finalmente la mineralización de las burbujas de aire [53]. Debido a esto, los espumantes reducen el tiempo de inducción y, en

consecuencia, permiten que el proceso de flotación sea cinéticamente más favorable [54], como se representa en la Figura 2.16.

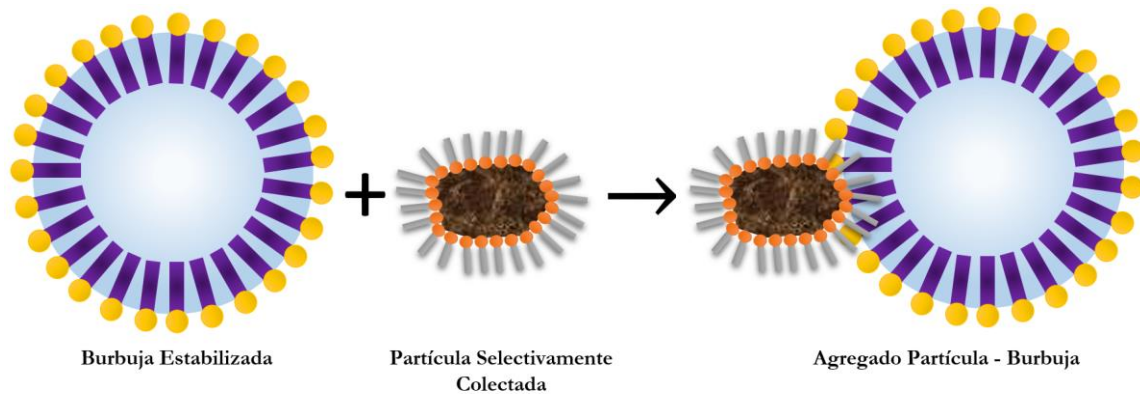


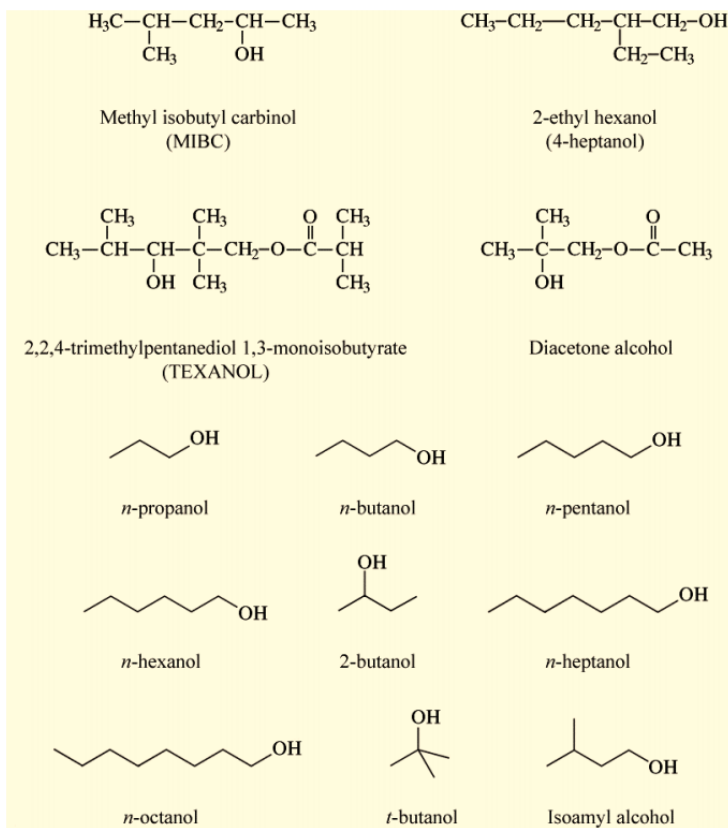
Figura 2.16 Representación de la absorción de moléculas de espumante en la superficie de la burbuja y mineralización de las burbujas de aire, adaptado de adaptado de Urra, 2016 [42].

Existen dos familias de espumantes utilizados comercialmente en el procesamiento de minerales, los alcoholes alifáticos y espumantes del tipo poliglicoles, descritos a continuación.

Alcoholes Alifáticos

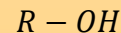
Corresponden a mezclas de alcoholes que contienen entre 5 a 8 átomos de carbono y presentan una cadena de alquilo lineal o ramificada (Ver Figura 2.17). Los espumantes comerciales de esta categoría más utilizados industrialmente son: metil isobutil carbinol (MIBC, 4-metil-2-pentanol) y 2-etilhexanol (4-heptanol) [55] [56].

En el trabajo de Tan, *et al.*, 2016 [56] se reportó que longitud de la cadena alquímica y la posición de la ramificación del grupo metilo ($-CH_3$) e hidroxilo ($-OH$) en alcoholes alifáticos tiene incidencia sobre la velocidad de ascenso de la burbuja. El efecto más significativo se atribuyó a la longitud de cadena alquímica, la cual disminuye la velocidad de ascenso de la burbuja progresivamente por cada carbono adicional que contenga.



Fórmula Molecular General

Alcoholes Alifáticos



Donde,

$$R = C_n H_{2n+1}$$

Figura 2.17 Estructuras químicas de algunos alcoholes alifáticos utilizados en el procesamiento de minerales [52] [56].

El siguiente efecto correspondió a la posición de la ramificación del grupo metilo, que disminuye la velocidad de ascenso de la burbuja a medida que se aleja del grupo hidroxilo. Finalmente, el menor efecto se atribuyó a la posición del grupo ($-OH$), el cual disminuyó sistemáticamente la velocidad de ascenso de la burbuja a medida que se mueve de la posición C-3 a C-1 (es decir, desde el centro hasta el extremo de la molécula). En la Figura 2.18 se representa el modelo de empaquetadura respectivo a la molécula de surfactante en la superficie de la burbuja propuesto por los autores de esta investigación.

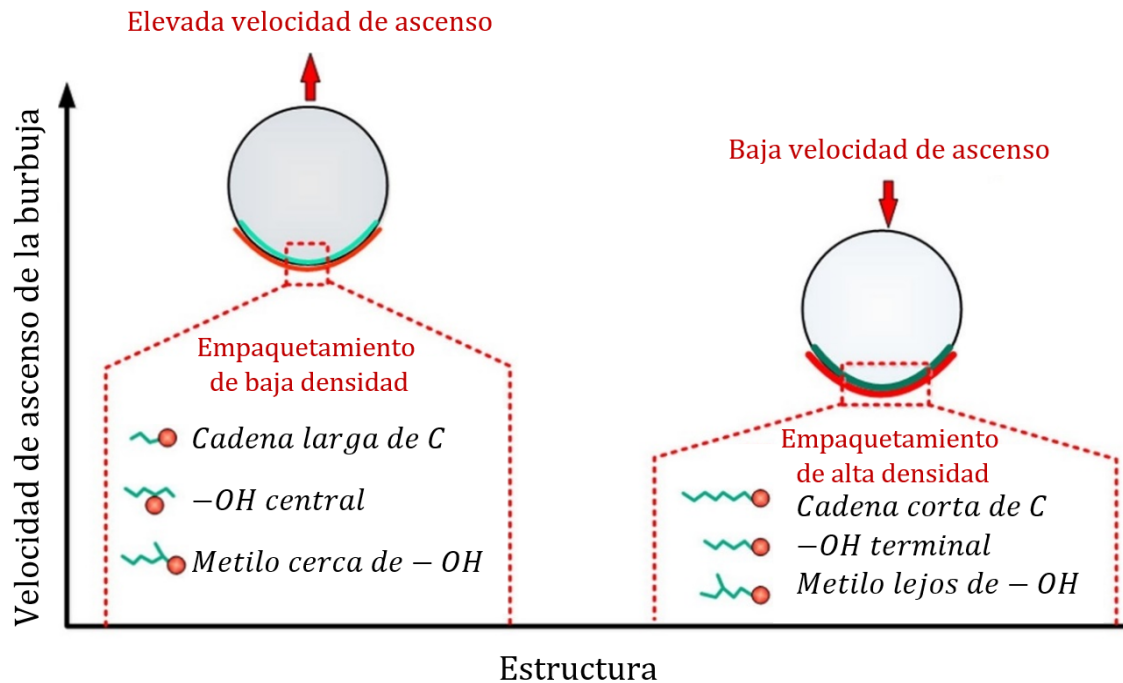


Figura 2.18 Empaquetadura de la molécula de surfactante en la superficie de la burbuja, adaptado de Tan *et al.*, 2016 [56].

Espumantes del Tipo Poliglicoles

En esta categoría se distinguen dos sub-divisiones, correspondiente a los poliglicol éteres y los poliglicoles propiamente tal. Los poliglicol éteres se fabrican generalmente de fluido de frenos sintético, son metoxipropilenglicoles o éteres metílicos de polipropilenglicol y presentan las siguientes características: su potencia y rendimiento depende del peso molecular y la longitud de carbono, es decir, un poliglicol éter de mayor peso molecular presenta una espuma más persistente y menos selectiva en comparación a un poliglicol éter de peso molecular menor; exhiben solubilidad total en agua, forman una espuma persistente y más estable que las formadas por espumantes compuestos de alcoholes, presentan retención de agua y baja sensibilidad frente a los cambios de pH en el sistema [38] [57].

Por otro lado, los poliglicoles presentan un comportamiento similar y más intenso que los poliglicol éteres, con la desventaja de que los poliglicoles tienen una elevada retención de agua, y, por lo tanto, son menos selectivos. Sin embargo, este carácter de los poliglicoles

podría ser ventajoso en el caso de recuperar partículas gruesas [57]. Entre los espumantes comerciales del tipo poliglicoles, destacan: F-507 (polipropilenglicol, de Cytec), F-150, Dowfroth 200 y Dowfroth 250 [58]. Además, en el trabajo de Orozco, 2012 [40] se reconoce que al emplear poliglicoles con mayores pesos moleculares se incrementaba la concentración de gas al interior de un equipo de flotación.

Ya habiendo descrito las familias de espumante de mayor relevancia en el procesamiento de minerales, se presenta a continuación un análisis sobre el efecto de la dosificación de estos surfactantes en los parámetros de dispersión de gas.

Efecto de la dosificación de espumante en la curva hold-up y velocidad superficial de gas.

En la Figura 2.19 es posible apreciar el efecto de la dosificación de espumante sobre el hold-up (ε_g , [%]) y la velocidad superficial de gas (J_g , [cm/s]). Un incremento en la concentración de espumante promueve un desplazamiento ascendente de la curva hold-up de gas versus velocidad superficial de gas, y en consecuencia, se produce un aumento en la concentración de gas para un mismo valor de J_g .

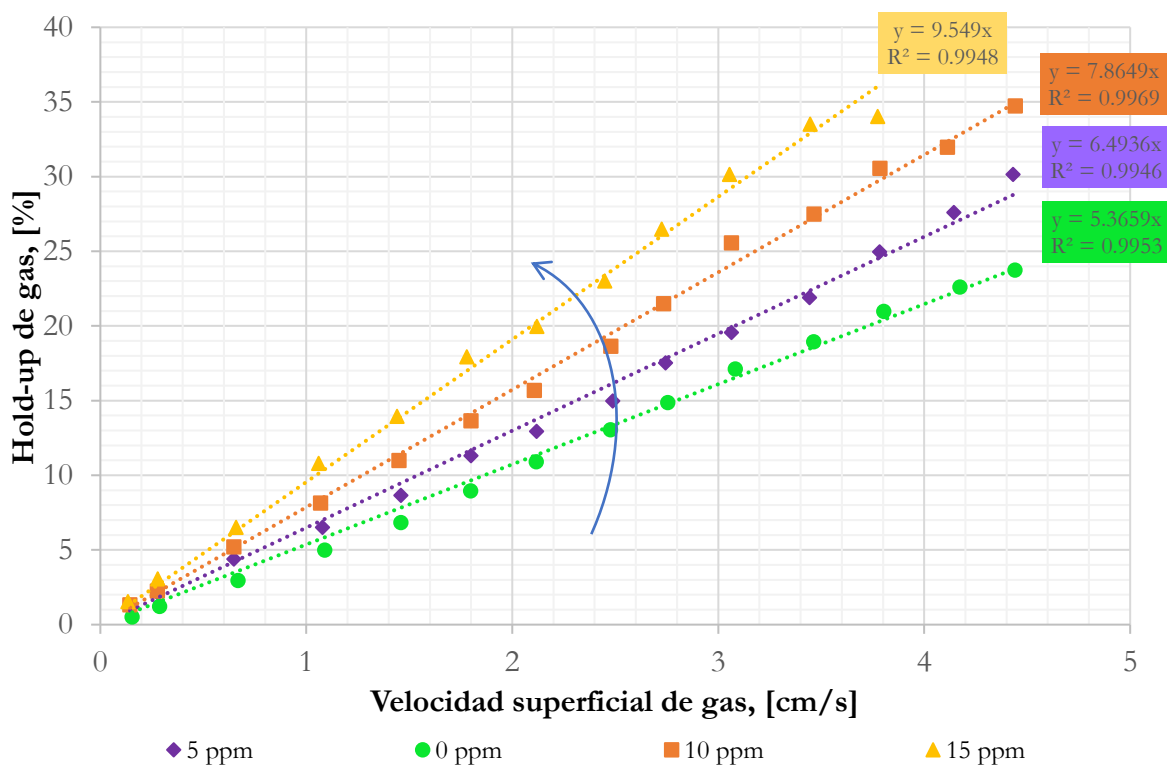


Figura 2.19 Hold-up de gas (ε_g , [%]) versus velocidad superficial de gas (J_g , [cm/s]). Efecto de la dosificación de espumante (Dowfroth 250C). Velocidad superficial de líquido (J_l) = 0.5 [cm/s], adaptado de Finch *et al.*, 1990 [9]. Los datos experimentales se presentan en la Sección 8.4.

Efecto de la dosificación de espumante sobre el diámetro de burbuja y área superficial de burbuja disponible para flotación.

Es importante definir la concentración crítica de coalescencia (CCC) para abordar este inciso. CCC corresponde a un término que se utiliza en el contexto de espumantes para referirse a la concentración de transición a la que el tamaño de burbuja no presenta variaciones significativas frente a un aumento en la adición de surfactante. Actualmente, se emplean dos procedimientos para la determinación de la CCC. El primer procedimiento corresponde a una estimación gráfica de la CCC desarrollada por Cho y Laskowski en el año 2002 [59], donde se utiliza la curva de diámetro de burbuja versus concentración de espumante con el fin de obtener la CCC en base al punto de intersección entre la recta respectiva al decaimiento inicial del diámetro de la burbuja y una recta horizontal trazada sobre el diámetro de burbuja que no presenta variaciones significativas, tal como se presenta en la Figura 2.20.

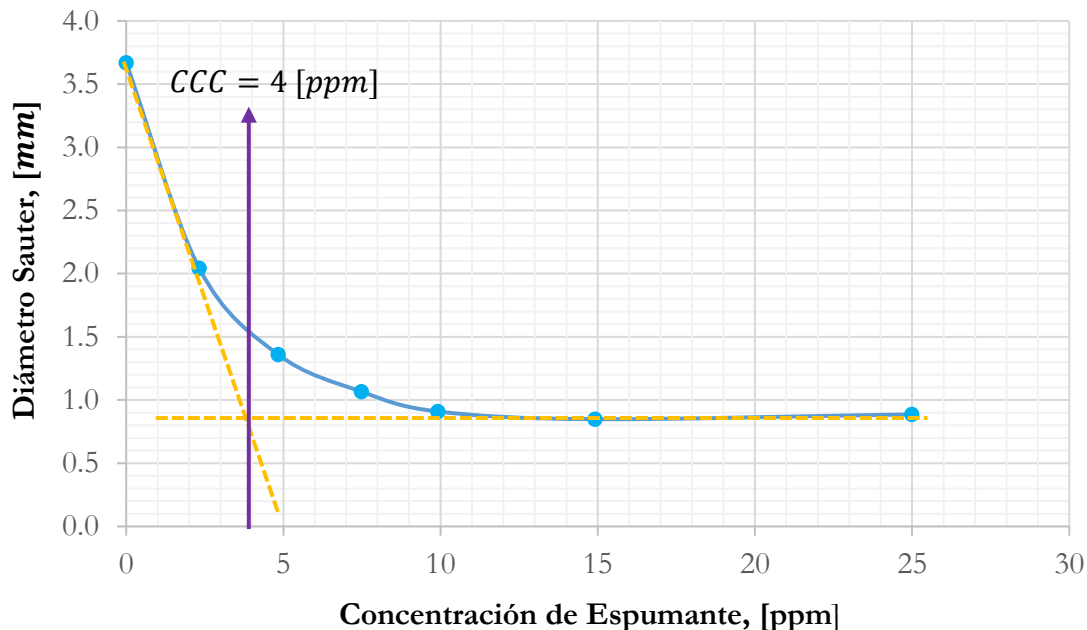


Figura 2.20 Diámetro de burbuja versus concentración de espumante y procedimiento gráfico para la estimación de la CCC propuesto por Cho y Laskowski (2002) [59] utilizando una celda mecánica de 0.8 [m³] que opera con un velocidad superficial de gas (J_g) = 0.5 [cm/s],

adaptado de Wills *et al.*, 2015 [3]. Los datos experimentales utilizados en la construcción de la curva de exhiben en la Sección 8.5.

El segundo procedimiento para la determinación de la CCC contempla un modelo de decaimiento exponencial de tres parámetros desarrollado por Nasset *et al.*, 2007 [60] que permite ajustar los datos y determinar la concentración de espumante a la que se presenta una “**reducción**” del 95% del tamaño de burbuja en comparación con el agua pura, conocida con las siglas CCC95, tal como se presenta en la Figura 2.21

En este sentido, considerar que el espumante logra una “reducción” del diámetro de burbuja, es una suposición físicamente imposible, debido que energéticamente reducir el tamaño de una burbuja tiene un costo elevado y la adición de espumante no es capaz de suministrar la cantidad necesaria energía al sistema de flotación para lograr una “disminución” del tamaño de burbuja. Sin embargo, debido a que la función del espumante es preservar y evitar la coalescencia de las burbujas presentes en el sistema de flotación es posible que en dicho sistema se mantenga un diámetro de burbuja pequeño al momento de la generación de burbujas.

A modo de visualizar el efecto que ejercen las diversas estructuras químicas de los espumantes sobre el tamaño de burbuja, en la Figura 2.21 se presentan el comportamiento del diámetro de burbuja para un sistema de flotación (celda mecánica de $0.8[m^3]$ que opera a una velocidad superficial de gas de $0.5[cm/s]$) en base al grupo reactivo del tensoactivo.

Una adecuada interpretación de la Figura 2.21, concierne en que el espumante es el encargado de preservar el tamaño de burbuja e impedir o evitar la coalescencia a una concentración dada. Cuando se alcanza la CCC95, se observa que el diámetro de burbuja se estabiliza, manifestándose una condición de saturación y equilibrio en el sistema [51].

Con el objetivo de revelar el efecto de la estructura química y el tipo empaquetadura de la molécula de surfactante en la superficie de la burbuja [57], en la Figura 2.21 se presenta la tendencia de algunos espumantes del tipo alcohol alifático en relación a la curva diámetro de burbuja versus concentración de espumante donde los resultados obtenidos se encuentran en concordancia con lo establecido en el estudio de Tan, *et al.*, 2016 [56] , debido que a mayor longitud de la cadena alquílica del espumante se presenta una velocidad de ascenso de la

burbuja menor, confiriéndole al tensoactivo una mayor persistencia en el sistema (reside un tiempo mayor al interior del equipo de flotación), mayor impacto en la preservación del diámetro de burbuja y el impedimento de la coalescencia, y consecuentemente, resulta en la presencia de un menor diámetro de burbuja en el sistema de flotación.

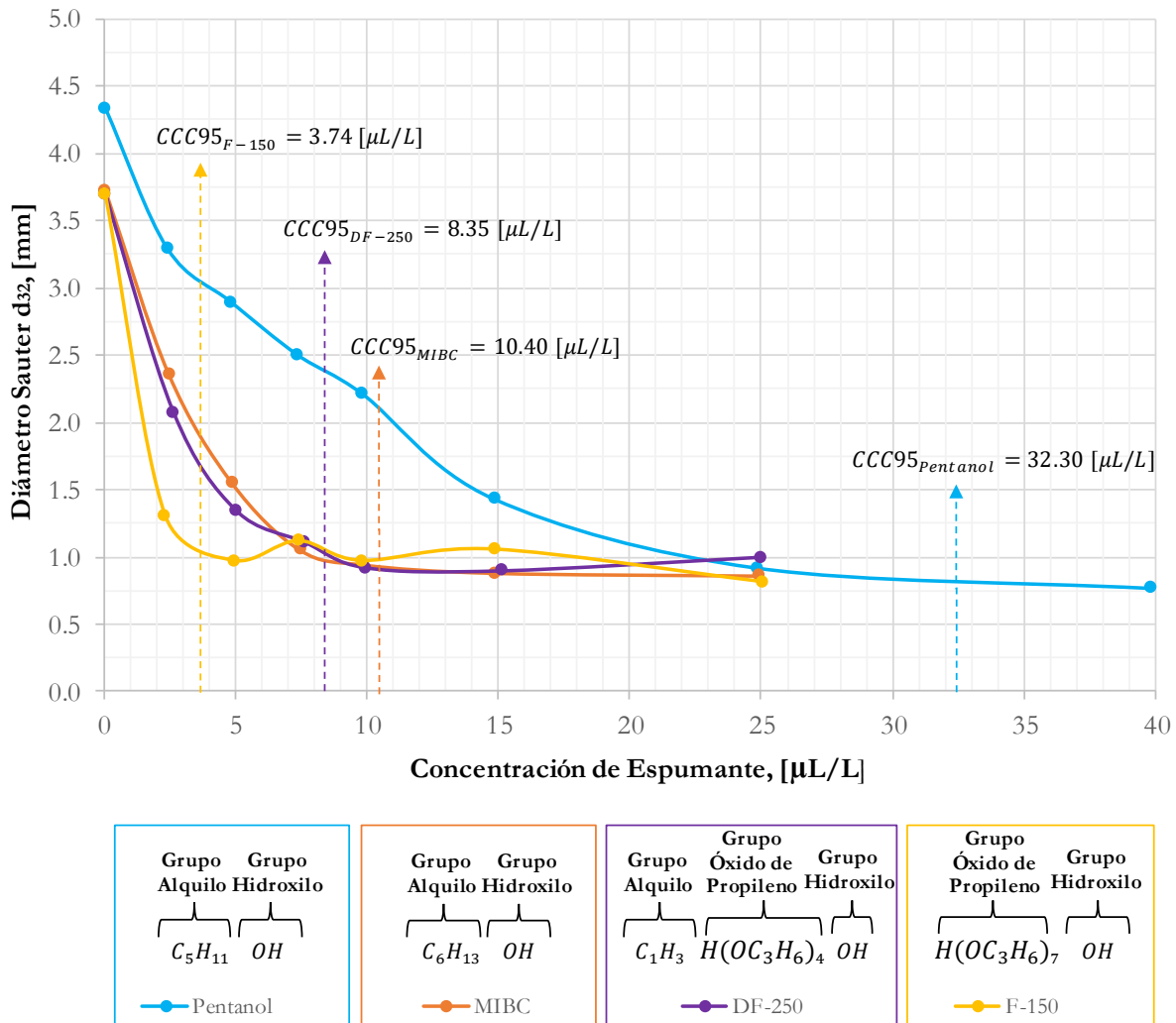


Figura 2.21 Efecto de la dosificación y naturaleza química del espumante sobre el diámetro de burbuja (diámetro promedio Sauter d_{32} , [mm]), para una celda mecánica de $0.8[m^3]$ ($V_{control}$, [m^3]) que opera con una velocidad superficial de gas (J_g) = $0.5 [cm/s]$, adaptado de Finch *et al.*, 2008 [51] y Zhang *et al.*, 2014 [61]. Los datos experimentales utilizados en la construcción de las curvas de exhiben en la Sección

En relación a la familia de espumante del tipo poliglicol, tanto el tensoactivo F-150 como DF-250 presentan un comportamiento intensivo en la preservación del tamaño de burbuja en

con comparación a los espumantes del tipo alcohol alifático, atribuyéndole el mayor efecto al espumante F-150. Es posible categorizar a los espumantes según su poder para preservar del diámetro de burbuja y evitar la coalescencia, basándose en la relación entre el tamaño de burbuja y la concentración del espumante junto con la CCC95 reportada en la Figura 2.21, resultando en la siguiente clasificación que se ordena desde el poder de acción más débil hasta el más fuerte del espumante:

$$n - pentanol < MIBC < Dowfroth 250 < F - 150$$

La clasificación anteriormente presentada se encuentra en concordancia con lo establecido en el trabajo de Kracht, *et al.*, 2009 [62], donde se demuestra que un incremento en la prevención de la coalescencia para espumantes de flotación comunes y n-alcoholes ($C_4 - C_8$) se relaciona con el aumento de la concentración y la longitud de la cadena del tensoactivo.

Con el objetivo de cuantificar el efecto sobre el área superficial de burbuja disponible para la flotación en función de la dosificación y naturaleza química de los espumantes descritos en el presente trabajo de memoria, de forma ilustrativa se presenta en la Figura 2.22 la reducción del área total de las burbujas para el tensoactivo MIBC.

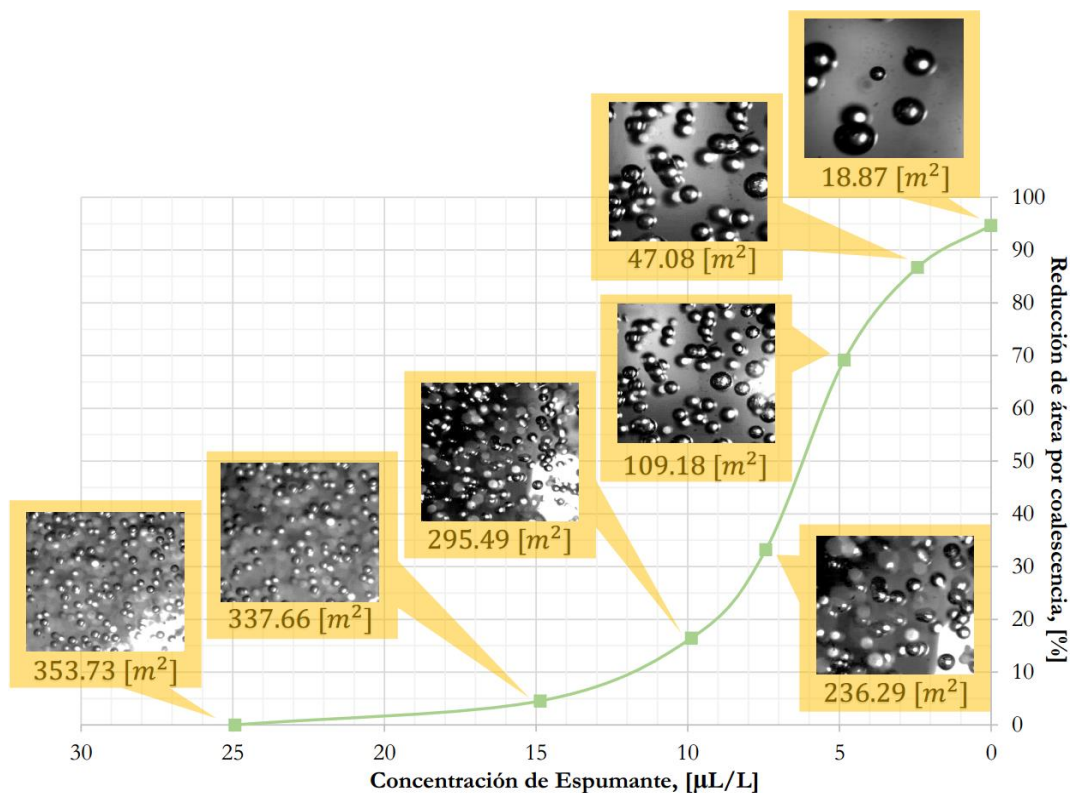
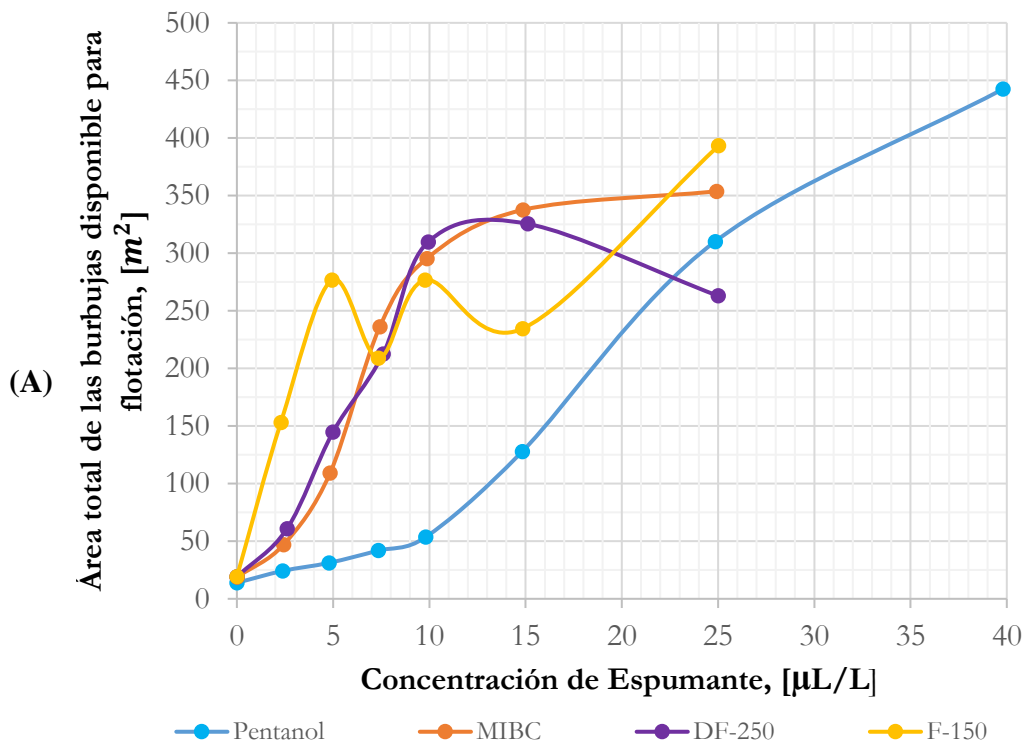


Figura 2.22 Impacto de la dosificación de MIBC en la reducción porcentual del área debido a la coalescencia de las burbujas, para una celda mecánica de $0.8[m^3]$ ($V_{control}, [m^3]$) que opera con una velocidad superficial de gas (J_g) = $0.5 [cm/s]$, adaptado de Finch *et al.*, 2008 [51]. Ver Sección 8.7.

Además, en la Figura 2.23 (A) se exhibe área total de las burbujas disponible para flotación [m^2] y en la Figura 2.23 (B) se presenta la reducción porcentual del área debido a la coalescencia de las burbujas en un sistema de flotación, sistema comprendido por una celda mecánica de $0.8[m^3]$ que opera a una velocidad superficial de gas de $0.5[cm/s]$. En este punto, se torna interesante analizar el impacto de la estructura química de los espumantes tipo alcohol alifático y poliglicol sobre el área superficial de burbuja disponible para flotación, donde se muestra que al utilizar un espumante del tipo poliglicol en comparación a un alcohol alifático se preserva de mejor forma un diámetro de burbuja pequeño, y en consecuencia, al tener burbujas pequeñas en el sistema de flotación se presenta una mayor área superficial de burbuja disponible para flotación y una menor reducción del área total por coalescencia.



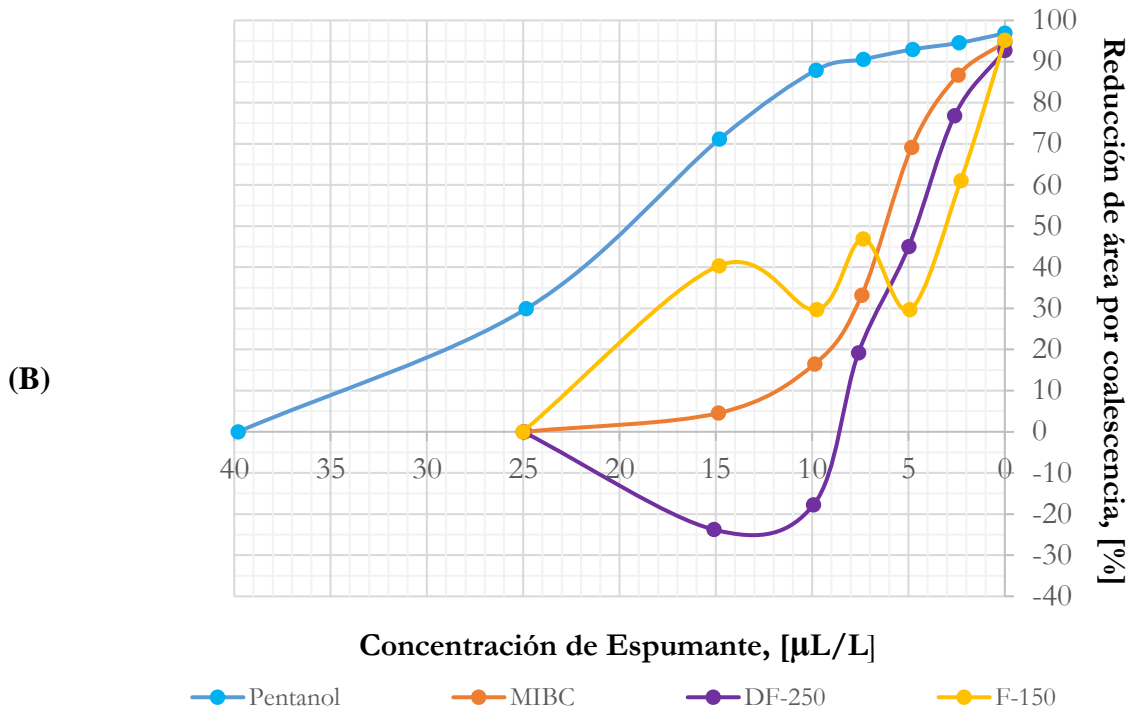


Figura 2.23 (A) Impacto de la dosificación y naturaleza química de los espumantes en el área superficial de burbuja disponible para flotación [m^2]. (B) Reducción porcentual del área disponible para flotación debido a la coalescencia de las burbujas. El volumen de la celda en estudio ($V_{control}$, [m^3]) es de $0.8[m^3]$, y este equipo opera con una velocidad superficial de gas (J_g) = $0.5 [cm/s]$, adaptado de Finch *et al.*, 2008 [51]. Para detalles del cálculo y datos empleados ver Sección 8.8.

Por otra parte, la Figura 2.24 presenta una extrapolación del comportamiento del diámetro de burbuja en relación a mezcla de espumantes del tipo Pentanol y MIBC en distintas proporciones. A medida que la mezcla de espumante tiene un mayor contenido del MIBC, el poder de la mezcla de tensoactivos es mayor, ya presenta un efecto significativo sobre la preservación de un diámetro de burbuja pequeño y en el impedimento de la coalescencia de las burbujas presentes en el sistema de flotación. El Caso contrario se presenta cuando la mezcla de surfactantes posee un mayor contenido de Pentanol.

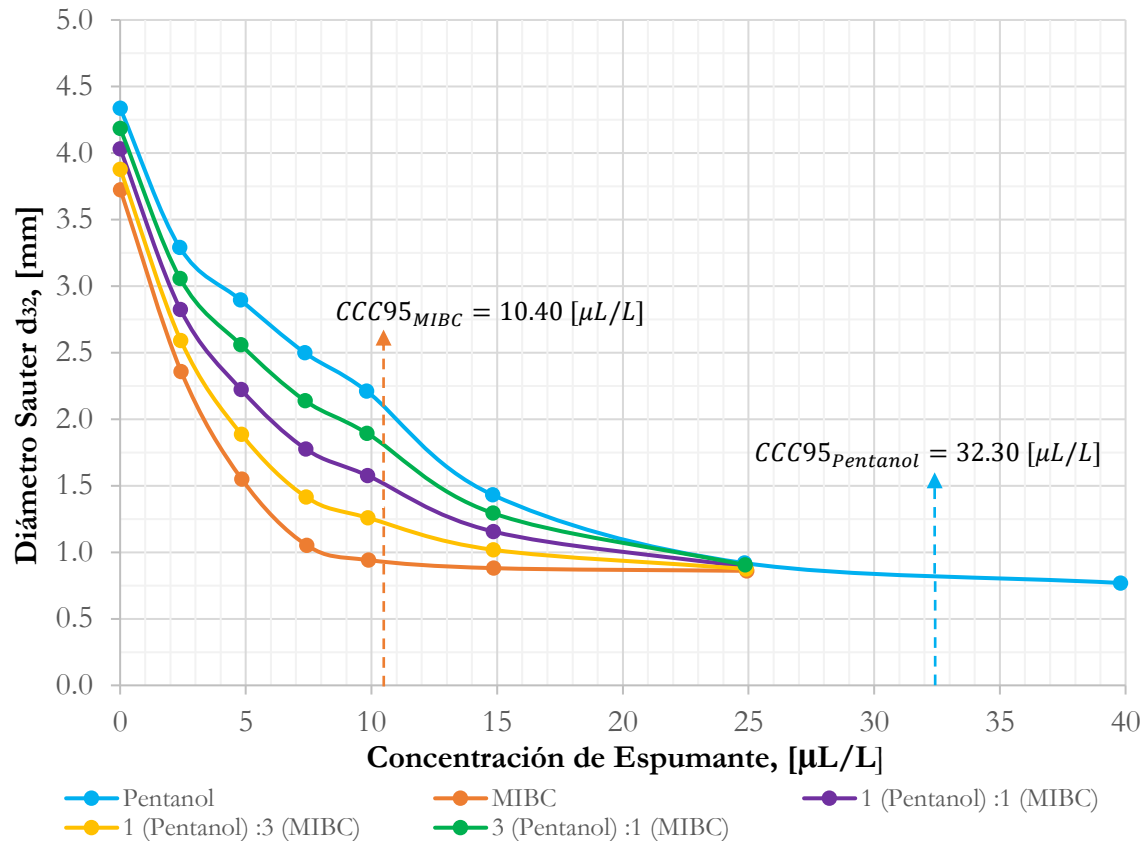


Figura 2.24 Impacto de la dosificación y proporción de la mezcla de espumantes del tipo Pentanol y MIBC sobre el diámetro de burbuja (diámetro promedio Sauter d_{32} , [mm]). Considerando que el volumen de la celda en estudio ($V_{control}$, [m^3]) es de $0.8[m^3]$, y este equipo opera con una velocidad superficial de gas (J_g) = $0.5 [cm/s]$. Ver Sección 8.9.

En adición a la información presentada en la Figura 2.24, mediante la Figura 2.25 es posible visualizar y cuantificar el impacto de la mezcla del tensoactivo sobre el área superficial de burbuja. Se observa que a medida que se incrementa la porción de MIBC en la mezcla de tensoactivos, se presenta un área total de las burbujas disponible para flotación mayor (en comparación a mezclas de tensoactivos que presenten una mayor cantidad de Pentanol), y, en consecuencia, una menor reducción porcentual del área por coalescencia.

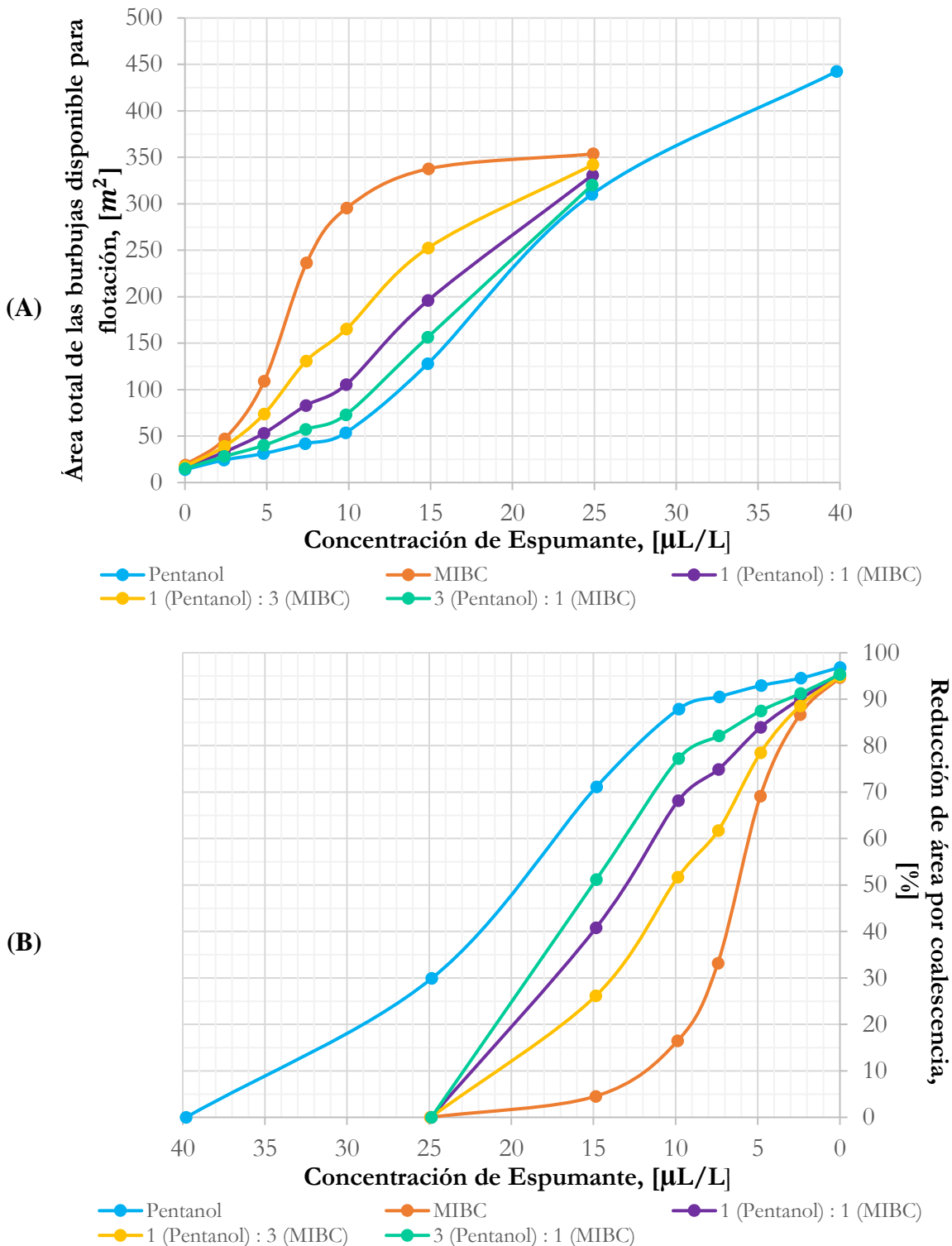


Figura 2.25 (A) Impacto de la dosificación y proporción de la mezcla de espumantes del tipo Pentanol y MIBC sobre el área superficial de burbuja disponible para flotación [m^2]. (B) Reducción porcentual del área disponible para flotación debido a la coalescencia de las

burbujas. El volumen de la celda en estudio ($V_{control}$, $[m^3]$) es de $0.8[m^3]$, y este equipo opera con una velocidad superficial de gas (J_g) = $0.5 [cm/s]$. Ver Sección 8.10.

Efecto del tipo de tensoactivo sobre el arrastre de agua.

Dado que las burbujas no sólo transportan partículas, sino que también transportan agua (como una capa sobre la superficie de la burbuja o como una estela de arrastre) cuando ascienden a través del equipo de flotación, el estudio de Moyo, 2005 [57] permitió demostrar que el transporte de agua hacia la zona de espuma es una función de tipo de espumante. Donde, el arrastre de agua conlleva al arrastre de partículas de forma no selectiva, por lo que la cantidad de agua recuperada en el concentrado impacta la recuperación de ganga y, consecuentemente, en la ley del concentrado. Además, en dicho estudio se clasificaron los espumantes en 4 grupos de acuerdo a la relación lineal hallada entre transporte de agua (J_{wo}) y el hold-up de gas (ε_g), obteniéndose la siguiente disposición:

$$n - pentanol < n - heptanol, n - hexanol, MIBC, Dowfroth 200 \\ < n - octanol, Etoxilados alcohol C6, Dowfroth 250 < F - 150$$

Con el objetivo de modelar los datos presentados en la investigación de Moyo, 2005 [57] sobre el efecto del tensoactivo en el arrastre de agua, se propuso una estimación de la tasa de transporte de agua generada por el ascenso de las burbujas en el sistema de flotación mediante la determinación del espesor de una monocapa de agua variable (e) que cubre a la burbuja de diámetro (d_1) y genera virtualmente una burbuja de diámetro (d_2), tal como se presenta en la Figura 2.26. La determinación de esta monocapa de agua variable permitió obtener resultados similares a los reportados por Moyo, 2005 [57], como se observa en la Figura 2.27.

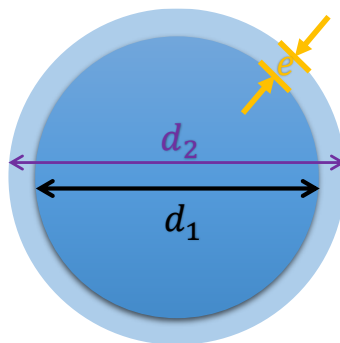


Figura 2.26 Representación esquemática de la monocapa de agua sobre la burbuja de gas.

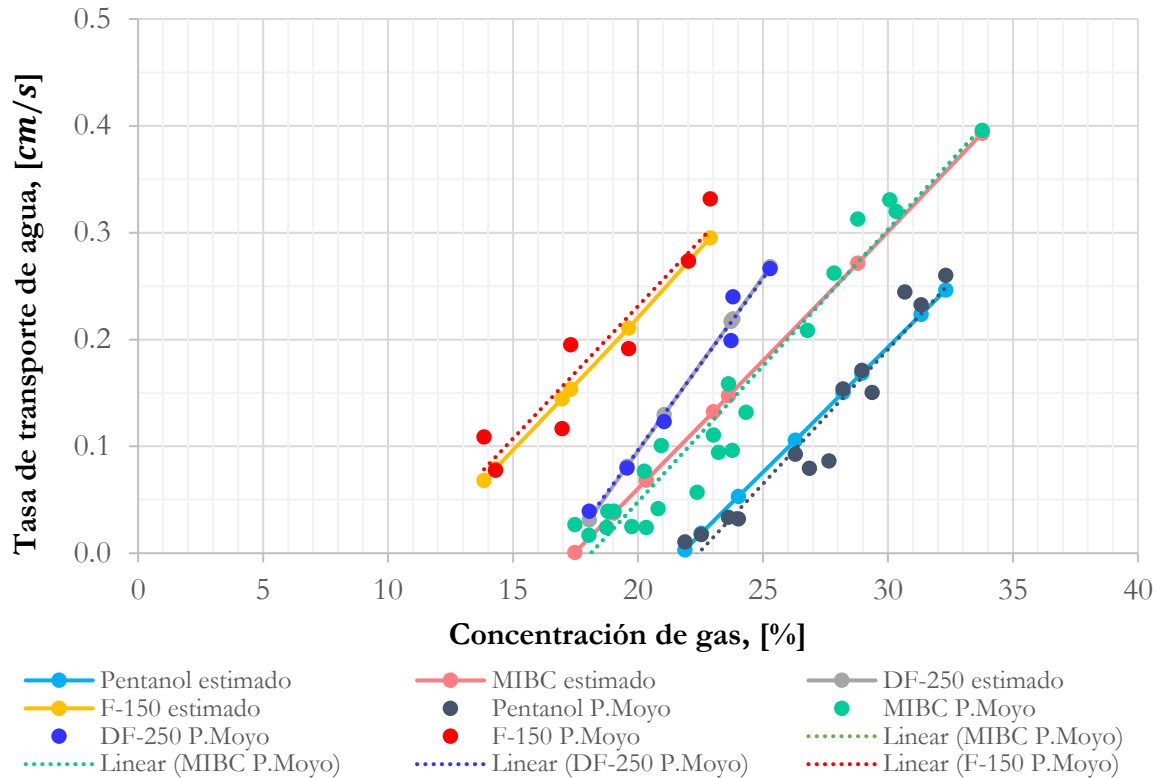


Figura 2.27 Modelación de la tasa de transporte de agua [cm/s] mediante la determinación del espesor de la monocapa de agua variable sobre las burbujas presentes en el sistema de flotación (celda mecánica de $0.8[m^3]$ que opera a una velocidad superficial de gas de $0.5[cm/s]$), adaptado de Moyo, 2005 [57]. Los datos experimentales y las estimaciones realizadas se adjuntan en la Sección 8.11.

2.3 Equipos de Flotación

El proceso de flotación se lleva cabo al interior de una máquina de flotación, equipo que otorga un ambiente favorable para la interacción entre partículas y burbujas, formación del agregado partícula-burbuja, transporte del agregado hacia la espuma y su posterior descarga. Es por ello, que la manera en que interactúan las partículas y burbujas depende de las condiciones de operación de la celda y el tipo de máquina de flotación empleada en el proceso [63].

Existen diversos procesos industriales donde las máquinas de flotación juegan un rol fundamental, entre sus principales aplicaciones se encuentra el destintado de la pulpa de papel reciclado, tratamiento de aguas residuales y procesamiento de arenas de petróleo [55].

Es posible clasificar a los equipos de flotación en dos categorías, correspondientes a las celdas mecánicas y celdas neumáticas. Con respecto a las celdas neumáticas, es posible distinguir dos sub-categorías, correspondientes a las columnas de flotación y los dispositivos de flujo descendente. Cabe destacar que las columnas de flotación se contemplan como uno de los reactores de mayor uso en la industria química, debido a la variedad de sistemas de inyección de aire permitidos y configuración en su diseño [64]. Se debe tener en consideración, que el presente trabajo de memoria se enfoca en sistemas de flujo descendente y la interacción de la pulpa con las burbujas generadas al interior del downcomer.

A continuación, se presenta una descripción de cada categoría señalada con respecto a los equipos de flotación.

2.3.1 Celdas Mecánicas o Convencionales

Estos equipos poseen un tanque con un impulsor accionado mecánicamente que permite la agitación de la pulpa junto con mantener las partículas minerales en suspensión, dispersar el gas en finas burbujas, proveer de un ambiente favorable para la formación del agregado partícula-burbuja, permitir la levitación del agregado hacia la espuma y recuperación de las especies valiosas [63]. Las celdas mecánicas presentan generalmente una geometría cilíndrica, aunque también existen de geométrica cuadrada, y la inyección de gas al interior del equipo es del tipo aire forzado o auto-aspirante. El ingreso de aire forzado o comprimido se logra gracias al empleo de un compresor o soplador, mientras que el ingreso del aire de forma auto-inducida se produce por el mismo giro del rotor que permite aspiración de aire desde el exterior hacia el interior del equipo. Con respecto a las celdas mecánicas del tipo auto-aspirante destaca la celda Wemco, y, para el caso de las celdas mecánicas que operan con aire comprimido, se tiene la celda Dorr-Oliver [3], presentada en la Figura 2.28 (B), y la TankCell-300 de Outotec (Ver Figura 2.9 y Figura 2.28 (C)).

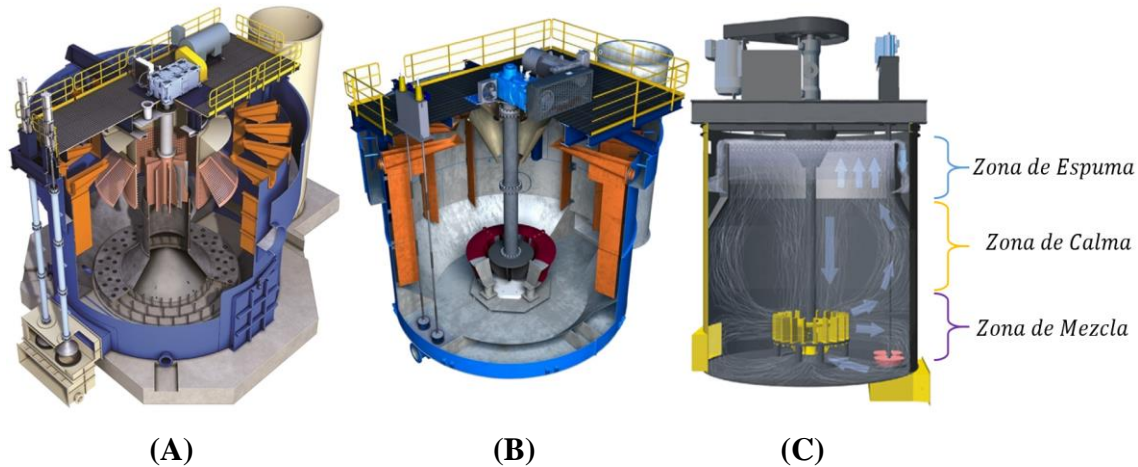


Figura 2.28 Representación esquemática (A) Celda Wemco (auto-aspirante), (B) Celda Dorr-Oliver (aire forzado) [3] y TankCell-300 de Outotec (aire forzado) [65].

2.3.2 Celdas Neumáticas

Las celdas neumáticas se caracterizan por prescindir del uso de partes móviles para lograr la dispersión de aire y agitación de pulpa al interior del equipo de flotación, y en su reemplazo emplean como fuerza motriz el aire [66].

Columnas de Flotación

Equipo de geometría cilíndrica o cuadrada, que carece de agitación mecánica y presenta una altura entre 10 a 15 metros [67]. Al interior de las columnas de flotación, se produce un contacto contracorriente entre la pulpa de mineral y el aire comprimido suministrado a través de inyectores. Además, este equipo permite el lavado de la espuma con tal de mejorar la calidad del concentrado [9]. Dentro de los diseños de columnas de flotación destacan la columna Microcell™ [68] y CoalPro® [69], las cuales se muestran en la Figura 2.29.



Figura 2.29 Representación esquemática (A) Columna Microcell™ y (B) Columna CoalPro® [68] [69].

Celdas de flujo descendente

Esta categoría se compone principalmente por celdas tipo Jameson, Imhoflot™ (Diseños V-Cell y G-Cell) y Ekoflot, las cuales se caracterizan por permitir el ingreso de gas y pulpa al interior de un tubo descendente, con tal de promover el contacto íntimo entre las partículas y burbujas. A continuación, se detalla cada una de las tecnologías mencionadas.

Celda Jameson

La celda de flotación Jameson se desarrolló en el año 1986 por el Prof. Graeme Jameson de la Universidad de Newcastle, Australia. El diseño de esta celda permite un contacto intensivo entre la pulpa y el aire al interior de un tubo vertical descendente (i.e., downcomer)¹⁴, como se presenta en la Figura 2.2. La incorporación de aire al interior del downcomer se efectúa generalmente de forma auto-inducida, prescindiendo del uso de sopladores o compresores, a diferencia de las tecnologías de flotación convencionales. En el downcomer, el aire y la pulpa se dispersan en una densa espuma de finas burbujas, generando un ambiente favorable para la colisión partícula-burbuja [13], que desemboca en una cámara de separación donde las

¹⁴ Las celdas Jameson de tamaño industrial pueden contener varios downcomers en una sola unidad [70].

partículas hidrofóbicas adheridas a las burbujas se separan de la pulpa y suben a la parte superior de la celda para desbordar en una canaleta de concentrado, mientras que las colas se descargan desde la parte inferior de la columna [70]. Además, sobre la fase de espuma se permite la irrigación de agua de lavado para remover partículas de ganga no deseadas [71], como se muestra en la Figura 2.1.

A continuación, se señalan las principales ventajas que presenta el uso de la celda Jameson según el fabricante (Glencore Technology) [17]: al generar finas burbujas, se aumenta el área superficial y la capacidad de transporte al interior del equipo; presenta un mantenimiento reducido, sencillo y de bajo costo en comparación a las tecnologías de flotación convencionales; y el lavado de espuma permite maximizar la ley de concentrado en una sola etapa de flotación.

El uso de la celda Jameson se ha manifestado en el tratamiento de carbón, metales base y preciosos, potasa, bitumen, grafito, minerales no sulfurados, tratamiento de aguas residuales y recuperación de orgánico en procesos de extracción por solventes [72].

Celda Imhoflot™

Esta celda de flotación se compone principalmente de dos secciones: un ducto confinado descendente que permite el ingreso y aireación de la pulpa; y una cámara de separación. La aireación de la pulpa al interior del tubo descendente se realiza utilizando una tecnología especializada para la generación de burbujas finas con una modalidad auto-aspirante o mediante aire comprimido, dependiendo de la aplicación, lográndose así el contacto íntimo entre partículas y burbujas. Por otro lado, la cámara de separación es la encargada de separar y recuperar las especies valiosas contenidas en la pulpa [73].

Según la información disponible por el fabricante (Maelgwyn Mineral Services Limited) [73], llevar a cabo el proceso de flotación en una celda Imhoflot™ exhibe un tiempo de residencia extremadamente corto, y, gracias a las características de su diseño, logra reducir el arrastre de ganga hacia el concentrado [74]. Dentro de las principales aplicaciones de esta celda destacan: procesamiento de sulfuro de cobre, óxidos minerales, oro y escorias; separación de solventes y petróleo, preparación de carbón y remediación ambiental [75].

Existen dos diseños de la celda Imhoflot™, correspondientes a los modelos V-Cell y G-Cell, presentados en la Figura 2.30 (A) y (B), respectivamente.

Imhoflot™ V-Cell: Esta configuración permite el ingreso de la pulpa aireada por medio de un sistema vertical descendente junto con un distribuidor de anillos y boquillas ubicado en la pulpa e inmerso en la cámara de separación. Además, la V-Cell presenta un espumador cónico que permite un control preciso de la dinámica de la espuma, y un reciclo de flujo para el control de nivel de la celda [76]. Ver Figura 2.30 (A).

Imhoflot™ G-Cell: Este diseño emplea la fuerza centrífuga que produce la alimentación tangencial de la pulpa hacia la cámara de separación, con tal de acelerar la separación y eliminación de la fase de espuma. Con respecto a lo descrito por el fabricante, esta tecnología ha permitido obtener elevados rendimientos en el proceso de flotación junto con una disminución significativa del tiempo de residencia en la celda (alrededor de 30 segundos), aumentando la capacidad de la unidad de flotación. La G-Cell se ha destacado por su aplicación en la recuperación de metales del grupo de platino ultra fino que no se recuperan por celdas convencionales [77] [78]. Ver Figura 2.30 (B).

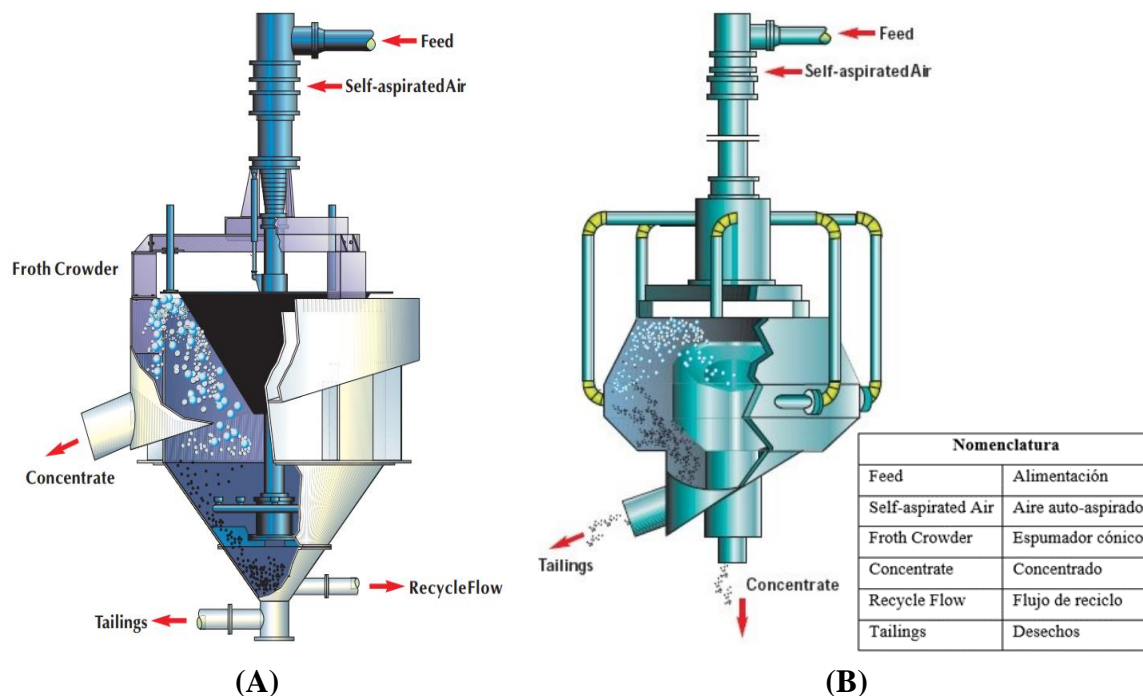


Figura 2.30 Representación esquemática de la celda Imhoflot (A) V-Cell y (B) G-Cell [75] [77].

Celda Ekoflot

Esta tecnología fue inventada en 1974 por el Prof. Albert Bahrn de la Universidad Técnica de Clausthal-Zellerfeld, Alemania [79]; y se encuentra representada en la Figura 2.31 (A). La celda Ekoflot, también conocida por el nombre de celda Pneufлот®, posee un sistema de mezclado previo al downcomer, donde la pulpa se pone en contacto con el aire mediante una serie de aireadores de pared porosa. Este sistema de aireación y mezcla fuerza a la pulpa a fluir transversalmente por una cavidad confinada¹⁵, contactándola con el aire (aire comprimido o auto aspirado) que se introduce en ángulo recto desde una ranura. Gracias al contacto entre estas dos fases, se genera el cizallamiento del aire mediante el paso vertical de la pulpa al interior de la cavidad confinada, generándose una población de finas burbujas y obteniéndose una pulpa aireada, como se muestra en la Figura 2.31 (B). Luego, la pulpa aireada se conduce por el downcomer hasta su descarga en el fondo de una cámara cónica invertida de separación, donde las burbujas se distribuyen, se elevan y se contactan con las partículas flotables, recuperándose el material valioso como concentrado en la parte superior del equipo. Los modelos más actuales de la celda Pneufлот®, permiten el lavado de la espuma [80], control del nivel de espuma mediante un cuello de ganso y control del tiempo de residencia y recuperación mediante la recirculación de las colas a la alimentación.

Además, la celda Ekoflot posee un sistema móvil de geometría cónica, ubicado en la parte superior del equipo, que permite ajustar el volumen de la espuma que desborda en la canaleta de concentrado [70]. Se han registrado aplicaciones de este tipo de tecnología en el procesamiento de minerales de Carbón, Magnesita, Plomo, Zinc, Cobre, Galenaflorita, Hierro, Estaño, Cuarzo, Pieza Caliza; reciclaje de residuos de papel y plástico, eliminación de cenizas volantes y yeso de la desulfuración de gases de combustión y tratamiento de aguas residuales [79] [81].

¹⁵La pulpa, al fluir a través de la cavidad confinada, puede alcanzar velocidades entre 4 a 6 [m/s] [70].

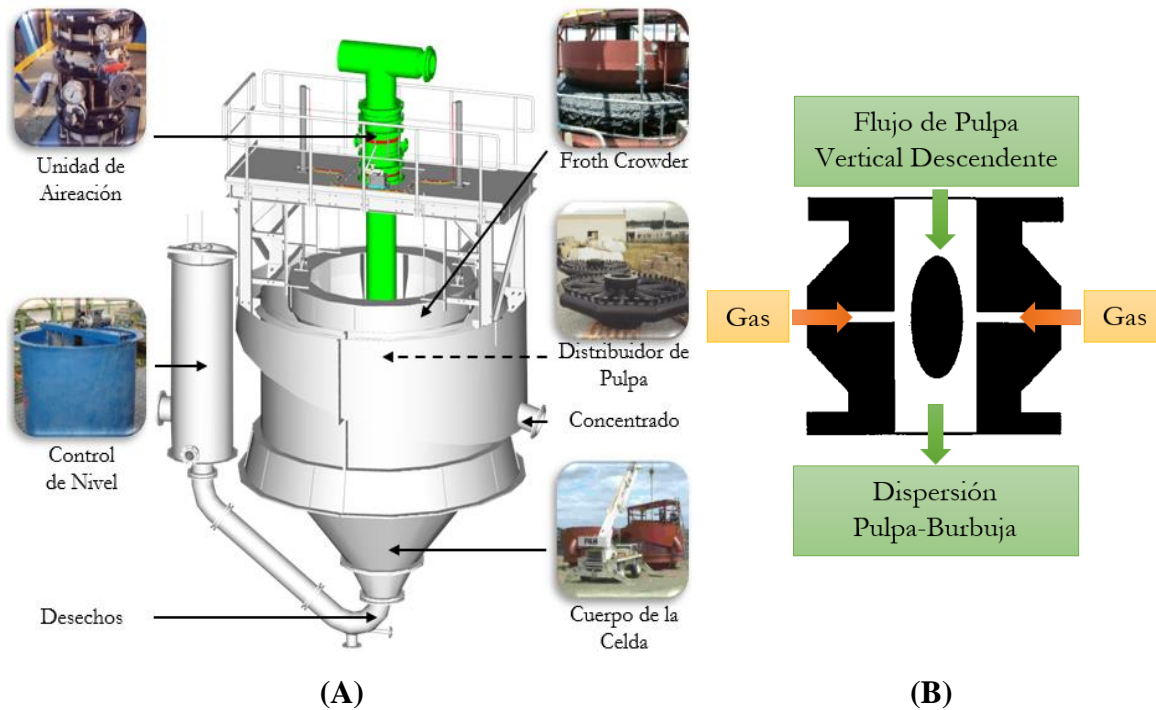


Figura 2.31 Representación esquemática de la celda Pneufлот®. (A) Vista general del equipo. (B) Tecnología de aireación, adaptado de [70] [82].

De esta forma, en el presente capítulo se abordaron los principales parámetros de dispersión de gas que permitirán identificar la métrica de inyección de gas al interior de los equipos de flotación. Además, se describieron los principales reactivos y equipos utilizados en el proceso de flotación, realizando un particular énfasis en el espumante y las celdas de flujo descendente. Por lo tanto, se da paso al siguiente capítulo donde se analizan en detalle los principales aspectos del análisis de Drift Flux, las ecuaciones comprendidas en este análisis y su aplicación a celdas neumáticas. Además, se propone una rutina iterativa para estimación del diámetro de burbuja empleando el análisis de Drift Flux.

CAPÍTULO III

HIDRODINÁMICA EN TUBOS CONFINADOS

Con el propósito de describir el comportamiento hidrodinámico que presenta el enjambre de burbujas al interior del dispositivo de flujo descendente en estudio, se presenta a continuación una descripción del análisis de Drift Flux junto a las ecuaciones implicadas en este método, con tal de emplear esta herramienta para modelar la hidrodinámica en tubos confinados.

3.1 Análisis de Drift Flux

El concepto de análisis de Drift Flux fue introducido por Graham Wallis en el año 1969 [83], con el objetivo de relacionar las tasas de flujo, hold-up y propiedades físicas de las fases presentes en reactores de columna gas-líquido, así como de gas-líquido-sólido.

Actualmente, el análisis de Drift Flux se contempla como una aproximación para el cálculo del diámetro medio de burbuja (d_b , [cm]) [64]. Para realizar esta estimación en sistemas bifásicos gas-líquido, se debe determinar la velocidad de deslizamiento (U_{bs} , [cm/s]), la cual corresponde a la velocidad relativa de la burbuja con respecto a la fase líquida [84] y es posible expresarla en términos de la velocidad superficial del gas (J_g , [cm/s]), velocidad superficial del líquido (J_l , [cm/s]), hold-up de gas (ε_g , [%]) y hold-up de líquido (ε_l , [%]), este último corresponde a la relación entre el volumen de líquido contenido por unidad de volumen de pulpa. Los parámetros señalados anteriormente son fácilmente medibles en un sistema de flotación para la estimación de U_{bs} , tal como se presenta en la Ecuación (3.1). Además, el símbolo % se utilizó para referirse a un porcentaje fraccional, el cual considera como unidad la centésima parte del todo.

$$U_{bs} = \frac{J_g}{\varepsilon_g} \pm \frac{J_l}{\varepsilon_l} = \frac{J_g}{\varepsilon_g} \pm \frac{J_l}{(1 - \varepsilon_g)}, [cm/s] \quad (3.1)$$

Cabe destacar, que el signo + de la Ecuación (3.1) representa un sistema contracorriente y el signo – representa un sistema operando de forma co-corriente, respectivamente [85].

Adicionalmente, se presenta un análisis de sensibilidad de la Ecuación (3.1), con el objetivo de ilustrar el efecto de la velocidad superficial del gas ($J_g, [cm/s]$) y velocidad superficial del líquido ($J_l, [cm/s]$) sobre la velocidad de deslizamiento ($U_{bs}, [cm/s]$) para un sistema de flujo contracorriente y co-corriente, respectivamente.

Para el análisis de sensibilidad se consideró que el hold-up de gas ($\varepsilon_g, [\%]$) se encuentra relacionado linealmente con la velocidad superficial de gas ($J_g, [cm/s]$) tal como se presenta en la Ecuación (5.1).

$$\varepsilon_g = C_g \cdot J_g, [\%] \quad (3.2)$$

Donde,

C_g = Pendiente de la curva ε_g versus $J_g, [\% \cdot s/cm]$.

Empleando los datos experimentales expuestos por Yianatos *et al.*, 1988 [85] para una columna de 5.71 [cm] de diámetro que opera con una velocidad superficial de gas entre 0.5 – 1.8 [cm/s] y una velocidad superficial de líquido constante de 1.0 [cm/s], es posible determinar C_g relacionando ε_g y J_g , tal como se presenta en la Figura 3.1.

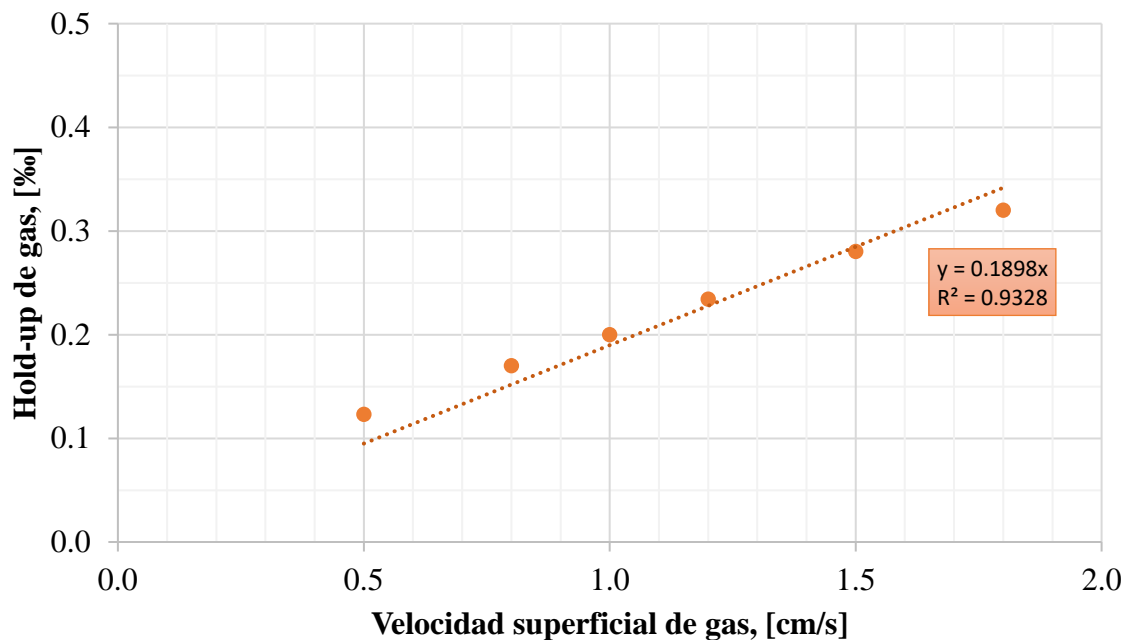


Figura 3.1 Relación entre el hold-up de gas ($\varepsilon_g, [\%]$) y la velocidad superficial de gas ($J_g, [cm/s]$). Datos experimentales obtenidos de Yianatos *et al.*, 1988 [85].

En consecuencia, de la Figura 3.2 es posible establecer que C_g corresponde a $0.1898 [\% \cdot s/cm]$.

Del mismo modo, se consideró una relación entre el hold-up de gas ($\varepsilon_g, [\%]$) y velocidad superficial de líquido ($J_l, [cm/s]$). Dicha relación se obtuvo utilizando nuevamente los datos experimentales expuestos por Yianatos *et al.*, 1988 [85] para una columna de $3.81 [cm]$ de diámetro que opera con una velocidad superficial de líquido entre $0.77 - 0.91 [cm/s]$ y una velocidad superficial de gas constante de $1.0 [cm/s]$, estableciéndose lo siguiente:

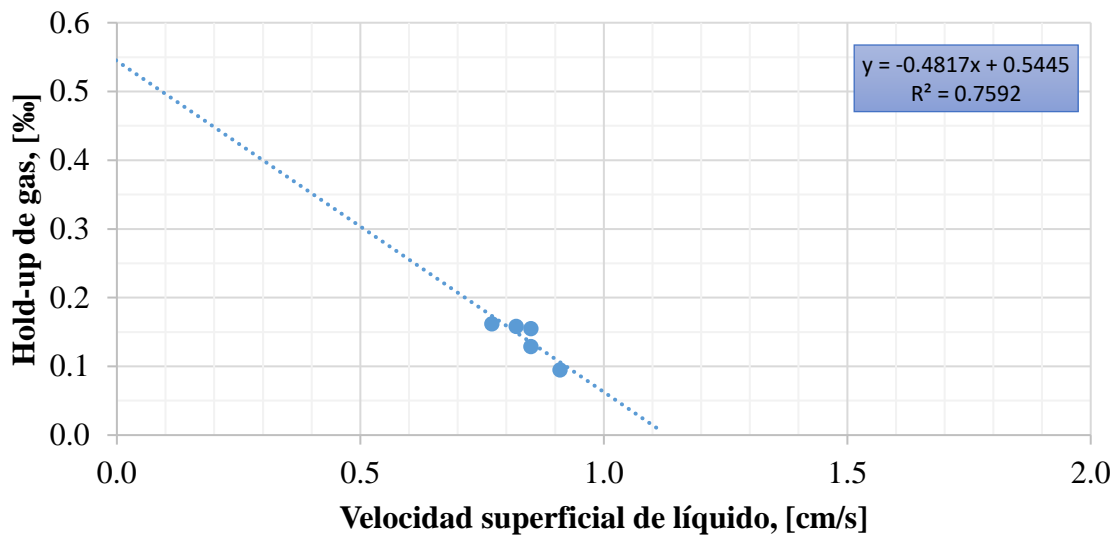


Figura 3.3 Relación entre el hold-up de gas ($\varepsilon_g, [\%]$) y la velocidad superficial de líquido ($J_l, [cm/s]$). Datos experimentales obtenidos de Yianatos *et al.*, 1988 [85].

De la Figura 3.3 es posible determinar la siguiente relación lineal entre el hold-up de gas y la velocidad superficial de líquido, expresada en la Ecuación (5.1).

$$\varepsilon_g = -0.4817 \cdot J_l + 0.5445, [\%] \quad (3.3)$$

Ya definidas las relaciones entre el hold-up y las velocidades superficiales tanto de gas como líquido, es posible establecer el impacto de estas variables sobre la velocidad de deslizamiento, tal como se exhibe en Figura 3.4 y Figura 3.5.

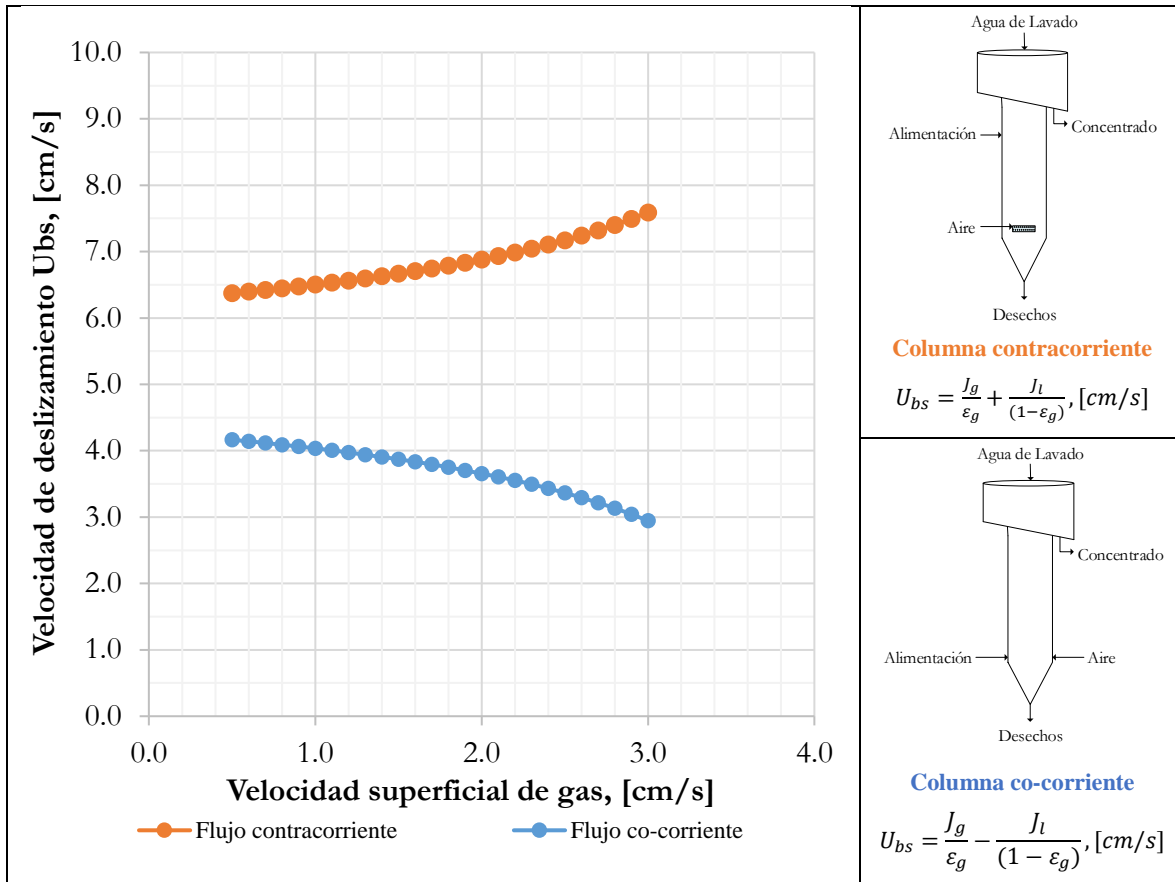


Figura 3.6 Efecto de la velocidad superficial de gas (J_g , [cm/s]) sobre la velocidad de deslizamiento (U_{bs} , [cm/s]) para una columna operando en contracorriente y co-corriente. Ver Sección 8.12.

Con respecto a la Figura 3.6, es posible apreciar que si se incrementa la velocidad superficial de gas en un sistema contracorriente la velocidad de deslizamiento incrementa, debido a que la velocidad de la fase gaseosa y el hold-up de gas aumenta en relación a la fase líquida ($J_l = 1 \left[\frac{cm}{s} \right] = constante$). Por el contrario, cuando se tiene un sistema co-corriente (i.e., alimentación e inyección de aire se realiza en la parte inferior de la columna), el aumento de la velocidad superficial de gas y consecuentemente, el aumento de hold-up de gas, impactan sobre el valor de la velocidad de deslizamiento, disminuyéndola a medida que J_g aumenta (i.e., en referencia al término $\frac{J_l}{(1-\varepsilon_g)}$ de la Ecuación (3.1)). Otro factor que influye en el régimen de flujo al interior del equipo de flotación y la respuesta de la velocidad de

deslizamiento frente a un cambio en J_g es el efecto de la pared de columna del equipo, es decir, si se tiene columnas con un diámetro muy pequeño, se puede manifestar la condición de flujo pistón (i.e., Plug Flow), donde burbujas de gran tamaño alcanzan un diámetro similar al de la columna, presenciándose una fase continua de líquido separada por un pistón de fase gaseosa [9] representa en la Figura 3.7.

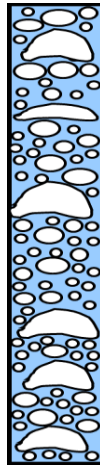


Figura 3.7 Representación del flujo pistón, adaptada de Finch *et al.*, 1990 [9].

La Figura 3.8 exhibe la relación entre la velocidad superficial de líquido y la velocidad de deslizamiento, presenciándose que al aumentar J_l entre $0.5 - 1.13$ [cm/s] para un sistema tanto contracorriente como co-corriente se produce un incremento neto de la velocidad de deslizamiento, teniendo en consideración la relación expuesta en la Ecuación (3.8) que presenta condiciones de borde de $0 < J_l$ [cm/s] < 1.13 y $0 < \varepsilon_g$ [%] < 0.54 , donde se produce una compensación entre el aumento J_l y la disminución de ε_g . Frente a un aumento excesivo del flujo de líquido (entre $1.13 < J_l$ [cm/s] < 3.0) se obtienen valores negativos de hold-up de gas y velocidad de deslizamiento, soluciones no factibles para este tipo de sistema. Este efecto se atribuye a que el flujo de líquido en términos energéticos es considerablemente mayor al del gas, por lo que su efecto es relevante e impacta sobre el contenido de gas al interior de la columna e indirectamente al tiempo de residencia de las burbujas al interior del equipo. En consecuencia, si el flujo de líquido de alimentación presenta la fuerza necesaria para arrastrar a las burbujas a la corriente de desecho, el tiempo

de residencia de las burbujas al interior de la columna disminuirá, hasta casos extremos donde no se reporta presencia de gas al interior del equipo.

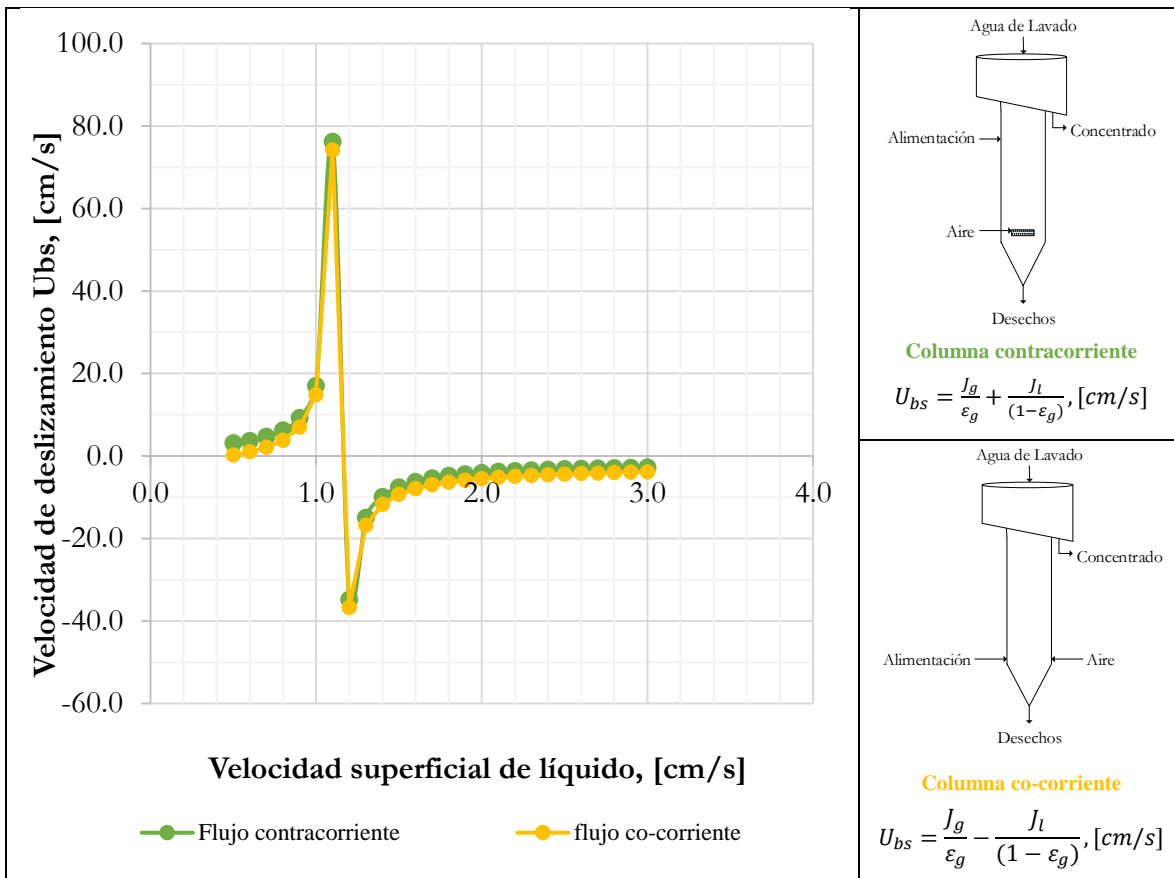


Figura 3.9 Efecto de la velocidad superficial de líquido (J_L , [cm/s]) sobre la velocidad de deslizamiento (U_{bs} , [cm/s]) para una columna operando en contracorriente y co-corriente. Ver Sección 8.12.

Por otro lado, se define la velocidad terminal de una sola burbuja (U_t , [cm/s]) como la velocidad de ascenso de una sola burbuja a través de un pozo infinito de fase líquida [64]. Empleando la ecuación derivada de Stokes para describir el movimiento de partículas esféricas pequeñas moviéndose a velocidades bajas a través de un fluido viscoso [3], teniendo en consideración que el objeto esférico que representa una partícula será análogo a una burbuja, además de que se empleará un sistema bifásico aire-agua, es posible determinar la velocidad terminal de una sola burbuja según Stokes ($U_{t, \text{stokes}}$, [cm/s]) mediante la Ecuación (3.4).

$$U_{t,stokes} = \frac{g \cdot d_b^2 \cdot \rho_l}{18 \cdot \mu_l}, \left[\frac{cm}{s} \right] \text{ Para } Re_b < 2000 \text{ (flujo laminar)} \quad (3.4)$$

Según lo propuesto por Schiller y Neumann (1933) [86], se establece que el coeficiente de arrastre para una sola burbuja ($C_D, [-]$) es posible expresarlo en términos del $Re_b, [-]$ según lo presentado en la Ecuación (3.5), para valores de Reynolds de una sola burbuja ($Re_b, [-]$, Ecuación (5.1)) menores a 800. Por consiguiente, en referencia a la relación establecida por Jacob Masliyah (1979) [87] donde se aplica el concepto de Drift Flux a sistemas de múltiples especies utilizando la relación del C_D de Schiller y Neumann, es posible determinar la velocidad terminal de una sola burbuja ($U_t, [cm/s]$) según lo expuesto en la Ecuación (3.7).

$$C_D = \frac{24}{Re_b} \cdot (1 + 0.15 \cdot Re_b^{0.687}), [-] \quad (3.5)$$

$$Re_b = \frac{d_b \cdot \rho_l \cdot U_t}{\mu_l}, [-] \quad (3.6)$$

$$U_t = \frac{g \cdot d_b^2 \cdot \rho_l}{18 \cdot \mu_l \cdot [1 + 0.15 \cdot Re_b^{0.687}]}, [cm/s] \quad (3.7)$$

A continuación, se presenta un análisis de sensibilidad para las Ecuaciones (3.4) y (3.7) frente a una variación del diámetro de burbuja, presentado en la Figura 3.10, correspondientemente.

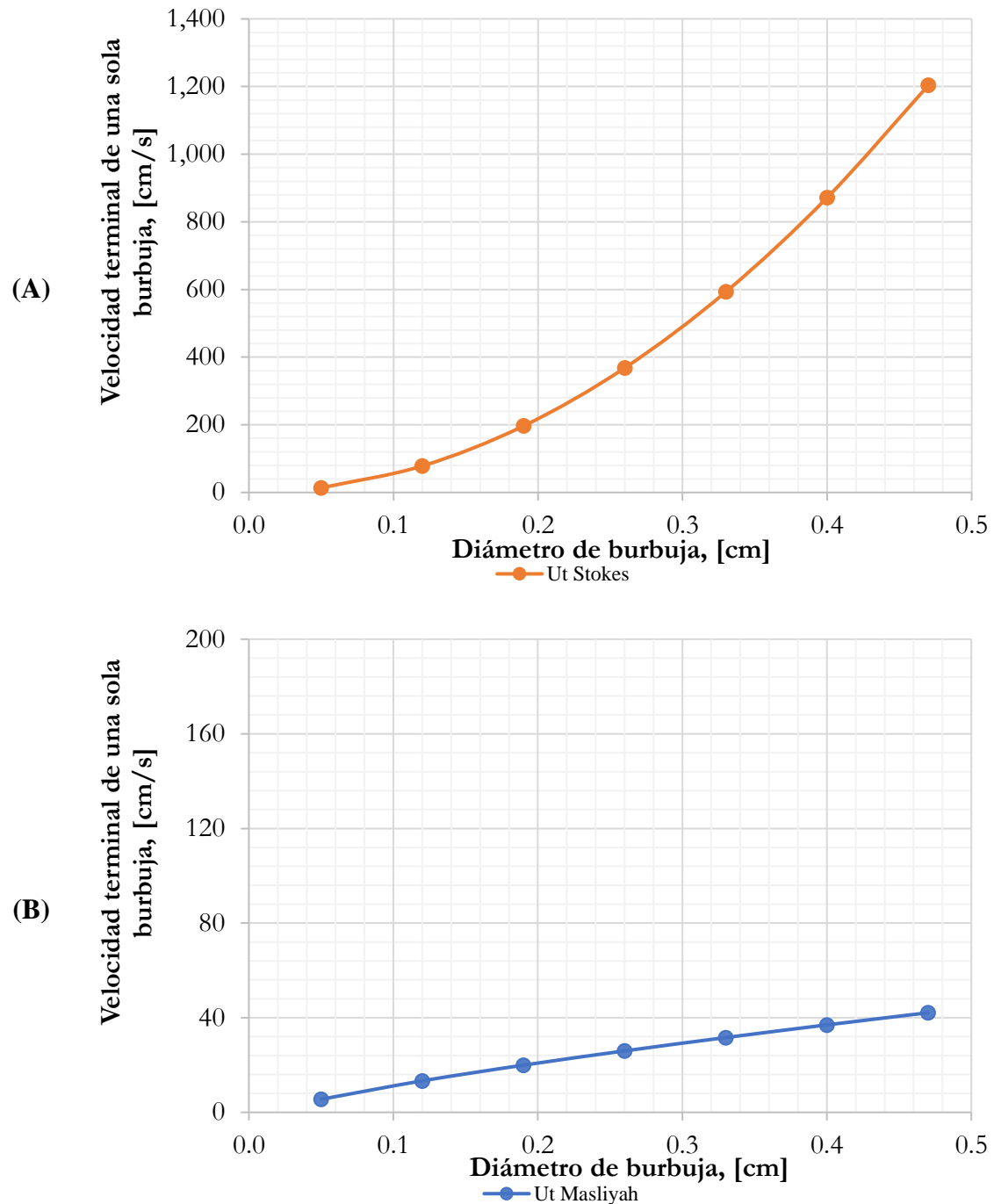


Figura 3.10 Análisis de sensibilidad del diámetro de la burbuja (d_b , [cm]) sobre (A) la velocidad terminal de una sola burbuja estimada mediante la Ecuación de Stokes ($U_{t, \text{stokes}}$, [cm/s]) y (B) la velocidad terminal de una sola burbuja según la aproximación de Masliyah (U_t , [cm/s]). Ver Sección 8.13.

Con respecto a la Figura 3.10, es posible apreciar que la velocidad terminal estimada por la Ecuación de Stokes presenta valores hasta 28 veces mayores que la velocidad terminal calculada por la Ecuación de Masliyah, esta diferencia se atribuye a la inclusión del coeficiente de roce propuesto por Schiller y Neumann ($C_D, [-]$) en la estimación de la U_t , el cual representa a una fuerza opositora al movimiento de la burbuja a través de un fluido, que retarda el ascenso de la burbuja, y en consecuencia, se reportan valores de U_t menores.

Por otro lado, las investigaciones realizadas por Lapidus *et al.*, 1957 [88] y Shah *et al.*, 1982 [89] establecen que la velocidad de deslizamiento ($U_{bs}, [cm/s]$) se encuentra directamente relacionada con la velocidad terminal de ascenso de una burbuja ($U_t, [cm/s]$), según lo expuesto en la Ecuación (3.8).

$$U_{bs} = U_t \cdot (1 - \varepsilon_g)^{m-1}, [cm/s] \quad (3.8)$$

Donde m está definido de acuerdo a lo expresado por Richardson y Zaki en el año 1954 [90] y corresponde a una función dependiente del número de Reynolds de una sola burbuja ($Re_b, [-]$), identificándose dos tramos para la función m según el valor que adopte Re_b , tal como se presenta en las Ecuaciones (3.9) y (3.10):

Tramo 1: Función m para valores de $1 < Re_b < 200$

$$m = \left(4.45 + 18 \cdot \frac{d_b}{d_c}\right) \cdot Re_b^{-0.1}, [-] \quad (3.9)$$

Tramo 2: Función m para valores de $200 < Re_b < 500$

$$m = 4.45 \cdot Re_b^{-0.1}, [-] \quad (3.10)$$

Definiéndose lo siguiente,

Re_b : Número de Reynolds de una sola burbuja, $[-]$.

d_b : Diámetro medio de burbuja, $[cm]$.

ρ_l : Densidad del líquido, $[g/cm^3]$.

U_t : velocidad terminal de ascenso de una burbuja, $[cm/s]$.

μ_l : Viscosidad del líquido, $[g/cm \cdot s]$.

m : Función parametrizada, $[-]$.

d_c : Diámetro de la columna en estudio, $[cm]$.

Otra aproximación para estimar la velocidad de deslizamiento ($U_{bs,M}$, $[cm/s]$) corresponde al empleo de las ecuaciones de sedimentación impedida para partículas esféricas propuestas por Jacob Masliyah en 1979 [87], las cuales son adaptadas para predecir el tamaño medio de burbuja en un enjambre de burbujas, aplicando el concepto del análisis drift-flux a sistemas de múltiples especies, además de considerar que las burbujas y las esferas rígidas en el agua tienen coeficientes de arrastre prácticamente equivalentes hasta un número de Reynolds de una sola burbuja (Re_b , $[-]$) de aproximadamente 500 [91]. Por lo tanto, es posible expresar $U_{bs,M}$ para valores de Re_b menores a 500 según lo expuesto en la Ecuación (3.11) [9].

$$U_{bs,M} = \frac{g \cdot d_b^2 \cdot f(1 - \varepsilon_g) \cdot [\rho_{susp} - \rho_b]}{18 \cdot \mu_{susp} \cdot [1 + 0.15 \cdot Re_s^{0.687}]}, [cm/s] \quad (3.11)$$

Donde,

$U_{bs,M}$: Velocidad de deslizamiento según la aproximación de Masliyah, $[cm/s]$.

g : Aceleración de gravedad, $980.60 [cm/s^2]$.

$f(1 - \varepsilon_g)$: Función que contempla el efecto de la concentración de burbujas a una velocidad promedio de ascenso.

ρ_b : Densidad de la burbuja, $[g/cm^3]$.

ρ_{susp} : Densidad de la suspensión, $[g/cm^3]$.

μ_{susp} : viscosidad de la suspensión, $[g/cm \cdot s]$.

Re_s : Número de Reynolds de un enjambre de burbujas, [-].

Además de considerar lo siguiente,

$$Re_s = \frac{d_b \cdot \rho_{susp} \cdot U_{bs} \cdot (1 - \varepsilon_g)}{\mu_{susp}}, [-] \quad (3.12)$$

$$f(\varepsilon_l) = (1 - \varepsilon_g)^{m-1} \quad (3.13)$$

Con m según lo presentado en las Ecuaciones (3.9) y (3.10).

Una simplificación de la Ecuación de Masliyah (Ecuación (3.11)) para un sistema bifásico se presenta a continuación, considerando que la densidad de la burbuja es despreciable:

$$U_{bs,M} = \frac{g \cdot d_b^2 \cdot f(1 - \varepsilon_g) \cdot \rho_l}{18 \cdot \mu_l \cdot [1 + 0.15 \cdot Re_s^{0.687}]} = \frac{g \cdot d_b^2 \cdot (1 - \varepsilon_g)^{m-1} \cdot \rho_l}{18 \cdot \mu_l \cdot [1 + 0.15 \cdot Re_s^{0.687}]}, [cm/s] \quad (3.14)$$

Donde,

$$Re_s = \frac{d_b \cdot \rho_l \cdot U_{bs} \cdot (1 - \varepsilon_g)}{\mu_l}, [-] \quad (3.15)$$

Hasta el momento se ha hecho un particular énfasis en la descripción del análisis de Drift Flux aplicado a columnas de flotación operando en forma contracorriente y co-corriente, describiendo las ecuaciones aplicables a cada sistema, el efecto que tiene la velocidad superficial de gas y líquido sobre la velocidad de deslizamiento y el efecto del diámetro de burbuja sobre la velocidad terminal.

A continuación, se presentará y evaluará la factibilidad de aplicar el análisis de Drift Flux para dispositivos de flujo descendente (desde ahora llamado DFD), representado en la Figura 3.11 donde se destacan las principales corrientes de alimentación y productos de descarte.

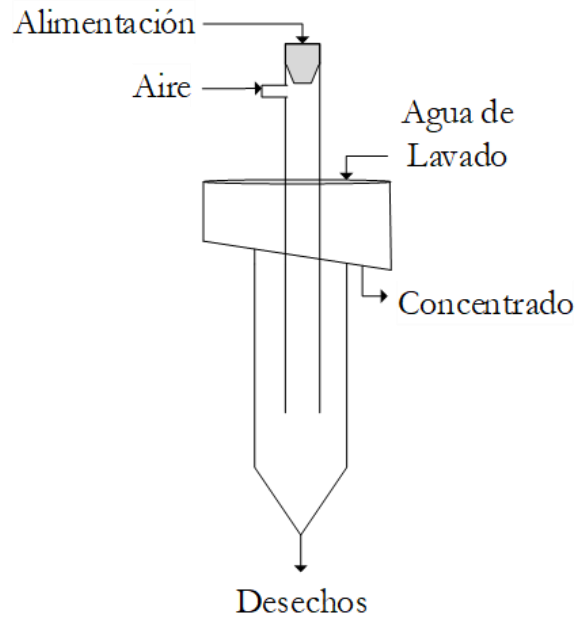


Figura 3.11 Esquema del dispositivo de flujo descendente con sus principales corrientes

Para esto, se utilizará como referencia la Ecuación (3.1) que se presentó anteriormente en la Sección 3.1 para el caso de una columna co-corriente, y se aplicará para dispositivos de flujo descendente, como se muestra a continuación:

$$U_{bs,DFD} = \frac{J_g}{\varepsilon_g} - \frac{J_l}{(1 - \varepsilon_g)}, [cm/s] \quad (3.16)$$

Ya presentadas las ecuaciones del análisis de Drift Flux para columnas de flotación y dispositivos de flujo descendente, se plantea a continuación una rutina iterativa para la estimación del diámetro de burbuja empleando el análisis de Drift Flux. Además, se desarrolló un algoritmo llamado Drift Flux Routine de Mella® en la plataforma Matlab® para evaluar la aplicación de la rutina iterativa planteada para la estimación de diámetro de burbuja en columnas de flotación operando de forma contracorriente (i.e., celda neumática contracorriente) y dispositivos de flujo descendente (i.e., celda neumática co-corriente).

3.2 Descripción de la Rutina Iterativa

Debido a que el parámetro de búsqueda implicado en las ecuaciones anteriormente presentadas en la Sección 3.1 corresponde al diámetro medio de burbuja ($d_b, [cm]$), se presenta a continuación en la Figura 3.12 el detalle de la rutina iterativa para la estimación de d_b planteada [85] [92]:

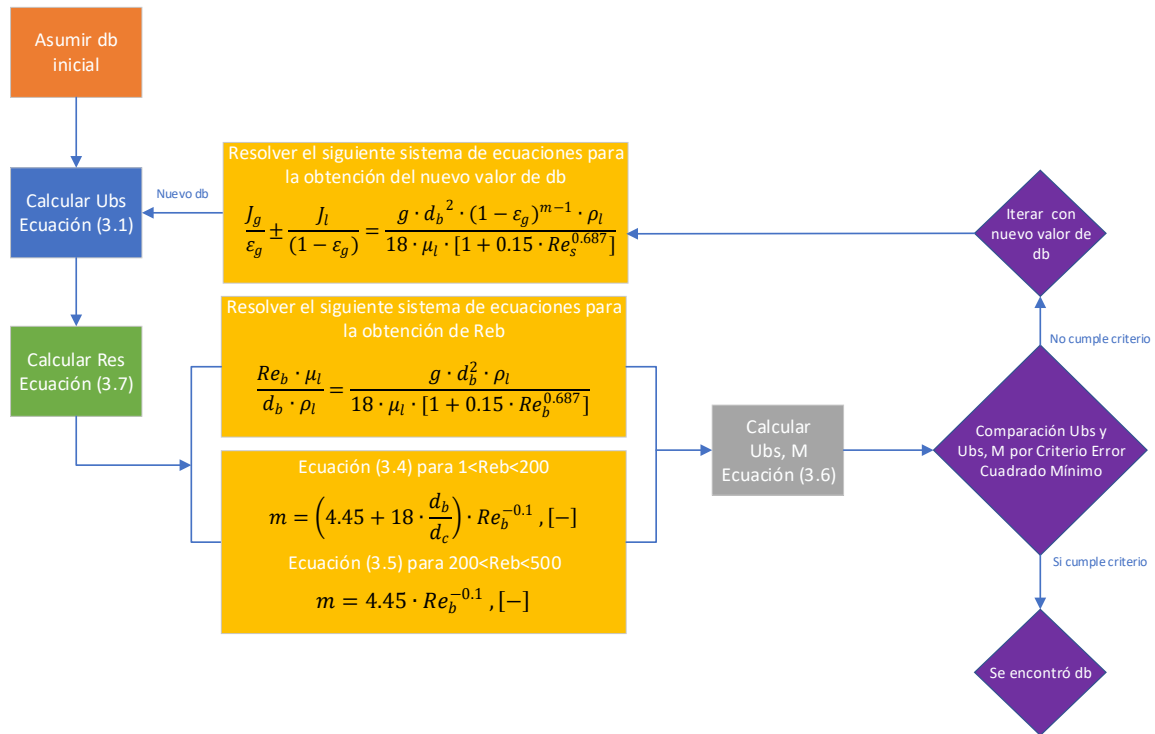


Figura 3.12 Esquema de la rutina iterativa para la estimación de d_b mediante análisis de Drift Flux.

En base a la rutina iterativa presentada en la Figura 3.12 y su secuencia lógica para la estimación del diámetro de la burbuja, se desarrolló un algoritmo en la plataforma Matlab® llamado Drift Flux Routine de Mella®. El código de este algoritmo se detalla en la Sección 8.14.

A modo de ilustrar la rutina iterativa propuesta para la estimación del tamaño de burbuja mediante el análisis de Drift Flux, se presenta el siguiente caso hipotético:

Se tiene una columna de flotación circular de $5.71 [cm]$ de diámetro, que presenta un sistema gas-líquido contracorriente, con una velocidad superficial de gas de $0.5 [cm/s]$, una

velocidad superficial de líquido de 1.0 [cm/s] y un hold-up de gas 12.3 [%]. Se pide determinar el diámetro medio de burbuja (d_b , [cm]) mediante el análisis de Drift Flux, además de considerar los siguientes valores para las propiedades físicas y constantes implicadas en el cálculo.

$$g = 980.60 \text{ [cm/s}^2\text{]}$$

$$\rho_l = 1.0 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$\mu_l = 0.01 \text{ [g/cm} \cdot \text{s]}$$

Con el fin de calcular el diámetro medio de burbuja, se describe a continuación la rutina iterativa de cálculo para la estimación d_b mediante el análisis de Drift Flux.

Paso 1: Se asume un valor inicial para el diámetro de la burbuja (d_b , [cm]) según lo presentado en la Ecuación (3.17).

$$d_b = 0.1 \text{ [cm]} \quad (3.17)$$

Paso 2: Se calcula la velocidad de deslizamiento (U_{bs} , [cm/s]) empleando la Ecuación (3.18). Como corresponde a un sistema de flotación con flujos en contracorriente, el signo de la Ecuación (3.18) será positivo.

$$U_{bs} = \frac{J_g}{\varepsilon_g} + \frac{J_l}{\varepsilon_l} = \frac{J_g}{\varepsilon_g} + \frac{J_l}{(1 - \varepsilon_g)}, \text{ [cm/s]} \quad (3.18)$$

Por lo tanto,

$$U_{bs} = \frac{0.5 \text{ [cm/s]}}{0.123} + \frac{1.0 \text{ [cm/s]}}{(1 - 0.123)} = 5.205 \text{ [cm/s]} \quad (3.19)$$

Paso 3: Se calcula Re_s mediante la Ecuación (3.20).

$$Re_s = \frac{d_b \cdot \rho_l \cdot U_{bs} \cdot \varepsilon_l}{\mu_l} = \frac{d_b \cdot \rho_l \cdot U_{bs} \cdot (1 - \varepsilon_g)}{\mu_l}, [-] \quad (3.20)$$

Donde,

$$Re_s = \frac{0.1 [cm] \cdot 1.0 [g/cm^3] \cdot 5.205 \cdot (1 - 0.123)}{0.01 [g/cm \cdot s]} = 45.650 [-] \quad (3.21)$$

Paso 4: Con respecto al diámetro inicial de la burbuja, se resuelve el sistema de ecuaciones (Ecuaciones (5.1) y (3.23)) para la velocidad terminal de ascenso de una burbuja (U_t , [cm/s]) con el objetivo de hallar el número de Reynolds de una sola burbuja (Re_b , [-]) de la Ecuación (3.24) y la función m representada por las Ecuaciones (3.25) y (3.26), en concordancia con los tramos definidos para el valor de Re_b .

$$U_t = \frac{Re_b \cdot \mu_l}{d_b \cdot \rho_l} \quad (3.22)$$

$$U_t = \frac{g \cdot d_b^2 \cdot \rho_l}{18 \cdot \mu_l \cdot [1 + 0.15 \cdot Re_b^{0.687}]} \quad (3.23)$$

$$Re_b = \frac{d_b \cdot \rho_l \cdot U_t}{\mu_l}, [-] \quad (3.24)$$

Considerando además los tramos para la función m descrito a continuación,

Función m para valores de $1 < Re_b < 200$

$$m = \left(4.45 + 18 \cdot \frac{d_b}{d_c}\right) \cdot Re_b^{-0.1}, [-] \quad (3.25)$$

Función m para valores de $200 < Re_b < 500$

$$m = 4.45 \cdot Re_b^{-0.1}, [-] \quad (3.26)$$

Para este caso en particular se obtuvo lo siguiente:

$$U_t = 6.638 \text{ [cm/s]} \quad (3.27)$$

$$Re_b = 66.376 \text{ [-]} \quad (3.28)$$

$$m = 2.852 \text{ [-]} \quad (3.29)$$

Paso 5: Se determina la velocidad de deslizamiento ($U_{bs,M}$, [cm/s]) según la aproximación de Masliyah de la Ecuación (3.30).

$$U_{bs,M} = \frac{g \cdot d_b^2 \cdot (1 - \varepsilon_g)^{m-1} \cdot \rho_l}{18 \cdot \mu_l \cdot [1 + 0.15 \cdot Re_s^{0.687}]}, \text{ [cm/s]} \quad (3.30)$$

Obteniéndose,

$$U_{bs,M} = \frac{980.60 \cdot 0.1^2 \cdot (1 - 0.123)^{2.852-1} \cdot 1.0}{18 \cdot 0.01 \cdot [1 + 0.15 \cdot 45.650^{0.687}]} = \mathbf{13.913 \text{ [cm/s]}} \quad (3.31)$$

Paso 6: Se comparan las velocidades de deslizamiento obtenidas de las Ecuaciones (3.19) y (3.31), definiéndose un error cuadrático medio mínimo (*Error*) de 0.1 [-].

$$\Delta U_{bs} = (U_{bs} - U_{bs,M})^2 = (5.205 \text{ [cm/s]} - 13.913 \text{ [cm/s]})^2 = 75.187 > \textit{Error} \quad (3.32)$$

Debido a que el error obtenido se encuentra sobre el valor de error cuadrático medio definido, se debe iterar con otro valor para el diámetro de burbuja inicial (paso 1).

A continuación, se presenta la Tabla 3.1, la cual compila los valores obtenidos para cada iteración de diámetro de burbuja realizada.

Tabla 3.1 Resumen de los valores obtenidos en cada iteración del diámetro de burbuja.

Iteración	d_b [cm]	Re_s [-]	U_t [cm/s]	Re_b [-]	m [-]	$U_{bs,M}$ [cm/s]	Error [-]
1	0.100	45.650	6.638	66.376	2.852	13.913	75.817
2	0.080	36.520	6.605	52.838	2.814	9.897	22.010
3	0.060	27.390	6.572	39.433	2.777	6.320	1.242
4	0.055	25.118	6.964	32.287	3.212	5.205	0.091

Por lo tanto, el diámetro medio de burbuja corresponde a **0.055 [cm]** según el análisis de Drift Flux desarrollado.

De esta forma se ejemplifica la aplicación de la rutina iterativa propuesta para la estimación del diámetro de burbuja, particularmente para una columna de flotación operando en forma contracorriente. En conclusión, se establece una metodología clara para el empleo de las ecuaciones comprendidas en el análisis de Drift Flux para realizar una estimación del diámetro de la burbuja. En secciones futuras se evaluará si la rutina iterativa propuesta en este estudio es aplicable para una columna de flotación contracorriente y/o un dispositivo de flujo descendente.

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE LABORATORIO Y PRUEBAS EXPERIMENTALES

El estudio de la hidrodinámica fue realizado en un dispositivo de flujo descendente, donde cuatro parámetros hidrodinámicos (i.e., velocidad superficial de gas, velocidad superficial de líquido, hold-up de gas y tamaño de burbuja) fueron medidos para los 72 ensayos desarrollados en el presente trabajo de memoria. A continuación, se presentan las características e instrumentación de la unidad de laboratorio, junto con la descripción de la metodología experimental y el procesamiento de los datos experimentales obtenidos.

4.1 Detalle de la Unidad de Laboratorio e Instrumentación

El dispositivo de flujo descendente que se utilizó para el desarrollo de las pruebas experimentales pertenece al Laboratorio de Transferencia de Materia II del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Técnica Federico Santa María, Casa Central. El equipo posee un volumen de 2.5 [L] y se encuentra fabricado en acrílico transparente, tal como se observa en la Figura 4.1. Cabe destacar, que tanto la elección de los equipos e instrumentos como la configuración de ellos es parte de la contribución (viz., diseño propio) del presente trabajo de memoria.

Este dispositivo se compone de un tubo de descenso que permite la admisión de una corriente de alimentación de líquido en el tope superior del cuello, gracias al empleo de una bomba centrífuga y un estanque de alimentación con un sistema de recirculación de desechos.

Para generar burbujas al interior del dispositivo de flujo descendente, se incorporó un sistema de difusión de aire adosado en la mitad del cuello, constituido por dos tipos de inyectores intercambiables conectados a una matriz distribuidora de aire con un compresor, es decir, un difusor de alúmina permeable o un capilar de 400 [μm] de diámetro.

Tabla 4.1 Dimensiones del dispositivo de flujo descendente (Equipo principal, E-1).

Ítem	Simbología	Valor [cm]
Largo del Cuello	L_{Cuello}	89
Ancho del Cuello	h_{Cuello}	4.0
Espesor Equipo	e_{Equipo}	2.5
Largo Cuerpo del Dispositivo	L_{Cuerpo}	35
Ancho del Cuerpo del Dispositivo	h_{Cuerpo}	20

Tabla 4.2 Características equipos secundarios de la instalación experimental.

Ítem	TAG	Características
Estanque de Alimentación ¹⁶	E-2	Marca: Aguamarket
		Alto Estanque: 46 [cm], Diámetro Estanque: 29 [cm] Capacidad: 25 [L], Cámara de Aire: 500 [mL] Material: Polietileno de Alta Densidad
Compresor ¹⁷ (Bomba de Aire)	E-3	Marca: Zone Air Pump, Modelo: Z-80 Voltaje: 110/220/240 [V], Frecuencia: 50/60 [Hz] Caudal de Operación: 3.5 [L/min](220 [V]) Presión de Operación: 12 [kPa](220 [V]) Potencia: 3.3 [W](220 [V]), Altura Máxima: 0.5 [m](220 [V])
		Se trabajo con dos tipos de inyectores: a) Difusor de alúmina permeable de geometría cilíndrica.
Inyector	E-4	Largo del Difusor: 3 [cm], Diámetro del Difusor: 1 [cm] ¹⁸ b) Capilar de acero inoxidable. Largo del Capilar: 2.5 [cm], Diámetro del Capilar: 400 [μm] ¹⁹

¹⁶<http://www.aguamarket.com/productos/productos.asp?producto=17245&nombreproducto=bidon+25+litros+boca+ancha+con+llave>¹⁷ <http://coastlamps.com/shop/zone-air-pump-z60-80/>¹⁸ <http://www.aquacave.com/ecoplus-cylinder-air-stones.html>¹⁹ <http://www.ibiocare.cl/>

Cámara de Alta Velocidad ²⁰	E-5	<p>Marca: Fastec Imaging Corporation, Modelo: TroubleShooter TSHRMM, Número de Serie: T101421X</p> <p>Cuadros por Segundo: 125, 250, 500, 1000</p> <p>Resolución del Sensor CMOS: 320x240, 640x480, 1280x256, 1280x512, 1280x1024</p> <p>Memoria SODIMM incorporada: 512 MB</p> <p>Disparadores Manuales y Remotos: Start, 25%, 50%, 75%, End</p> <p>Almacenamiento de Cuadros: 2,184 a 8,736 cuadros.</p> <p>Tiempo de Grabación: 2.2 a 69.9 [s]</p>
	E-6	<p>Marca: König, Potencia Total: 10 [W]</p> <p>Flujo Lumínico: 900 [lm], Angulo Haz: 100 x 50 [°]</p> <p>Índice de Renderización de Color: CRI 75-80</p> <p>Temperatura del Color: 6000 [K]</p> <p>Alimentación: 220 [V], Vida Útil: 50,000 [Horas]</p>

Tabla 4.3 Especificación de la instrumentación del dispositivo de flujo descendente.

Objetivo de Control	Equipo/ Instrumento	TAG	Características
Flujo de Alimentación	Bomba de Alimentación ²²	B-1	Marca: Reggio, Modelo: CM6/2
			Potencia Nominal: 0.5 [HP], 0.37 [kW]
	Válvula de Alimentación ²³	V-1	Tipo: Centrifuga, Caudal: 5 – 35 [L/min]
			Altura Manométrica: 35 – 9 [m]
			Altura Máxima: 40 [m]
			Marca: Hoke, Modelo: 2813G8Y - Gyrolok®
			Número de Serie: 2800
			Tipo: Aguja, Tamaño: 1/2"

²⁰ <http://www.alava-ing.es/repositorio/7bd9/pdf/1258/2/camara-alta-velocidad-fastec-troubleshooter.pdf?d=1>

²¹ <http://ledmania.cl/shop/proyectores-de-area/foco-proyector-led-10w-certificado-sec/>

²² <http://www.prodesem.cl/catreggio.pdf>

²³ http://www.hoke.com/catalogs/catalog_79352spa_hoke_needle_valves_10.15.13.pdf

			Material: Acero Inoxidable 316 Presión Máxima de Operación: 5000 [psig] a 70 [°F] Rango de Temperatura de Funcionamiento: -40 [°F] a +450 [°F] Cv: 1.10 [gpm/psi]
			Marca: ColeParmer, Modelo: 32707-2, Número de Serie: CP6606 Tipo: Másico, Material: Acetal, Conexión: 1/8" Precisión: ± 1.5% Escala Completa Repetibilidad: ± 0.5% Escala Completa Presión Máxima: 150 [psi] Rango de Caudal de Operación: 0 – 50 [mL/min] Rango de Temperatura de Operación: 50 – 122 [°F] Tipo de Gas Permitido: Aire/Nitrógeno Tiempo de Respuesta: 2000 [ms] Tipo de Display: 3.5-LCD Digital Fuente: 12.5 a 15 [VCD], 100 [mA] Salida: 0 – 5 [VCD] Lineal
Flujo de Aire	Flujómetro de Aire ²⁴	F-1	
	Regulador de Presión ²⁵	R-1	Marca: Samson, Modelo: 4708-14 Material: Aluminio y Poliamida Presión de Operación: 1 – 12 [bar] (equivalente a 15 – 180 [psi]) Consumo de Aire: ≤ 0.05 [m ³ /h] (a 7 [bar]) Histéresis: < 0.1 [bar] Posee Filtro de Aire con Receptáculo

²⁴ <https://www.coleparmer.com/i/cole-parmer-low-cost-gas-mass-flowmeter-0-to-50-sccm-acetal/3270722>

²⁵ <https://www.samson.de/document/t85460es.pdf>

		Tamaño de Malla del Filtro: 20 [μm]
		Marca: Omega, Modelo: FVLT101, Número de Serie: FVLT100
Válvula de Aire ²⁶	V-2	Flujo Máximo de Aire: 2400 [mL/min] Flujo Máximo de Agua: 130 [mL/min] Tipo: Aguja, Tamaño: 1/4" Material: Politetrafluoroetileno Cv: 0.011 [gpm/psi]

Habiendo descrito el equipo de trabajo, sus características y rangos de operación, están las condiciones para presentar la metodología experimental desarrollada en este estudio. Esto permitirá la caracterización del comportamiento hidrodinámico del dispositivo de flujo descendente.

4.2 Metodología Experimental

Con el fin de abordar adecuadamente los objetivos establecidos en el presente trabajo de memoria (i.e., Caracterizar la hidrodinámica del enjambre de burbujas en ductos confinados), se presentan a continuación las etapas comprendidas en la metodología experimental, mediante la cual se obtendrá información relevante para la evaluación de la hipótesis propuesta en este documento.

Las etapas de la metodología experimental son presentadas de forma secuencial en la Figura 4.2. y se describen a continuación.

²⁶ <https://es.omega.com/pptst/FVLT100.html>

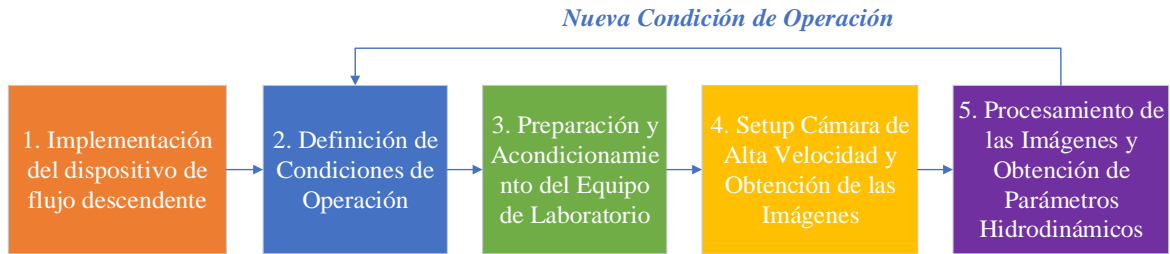


Figura 4.2 Etapas de la metodología experimental (secuencial).

1. Implementación del dispositivo de flujo descendente: Se diseñó y se implementó una configuración experimental (Ver Figura 4.1) con los equipos descritos en la Sección 4.1. Dicha configuración permitió la medición de los parámetros hidrodinámicos de interés en un dispositivo de flujo descendente, correspondientes a la velocidad superficial de gas, velocidad superficial de líquido, hold-up de gas y el tamaño de burbuja. Para ello, se utilizó una columna de laboratorio fabricada en acrílico, la cual se modificó en su estructura para que admitiera una corriente de alimentación por el tope del cuello superior, una corriente de gas en la mitad del cuello y que descarga su contenido en una corriente de productos de descarte por el fondo de la columna.

En relación a la línea de alimentación de líquido, se realizó una conexión entre el Estanque de Alimentación (E-2) y la succión de Bomba de Alimentación (B-1) utilizando tubería de PVC de 32 [mm], junto con adaptadores de PVC de 1" a 32 [mm], respectivamente. Además, se emplearon tubos de poliuretano de 10 [mm] y conectores de acople rápido que permitieron unir la descarga de la Bomba de Alimentación (B-1) con la Válvula de Alimentación (V-1), y posteriormente ingresar esta corriente por el tope superior del dispositivo de flujo descendente.

Para la línea de alimentación de aire se utilizaron tubos de poliuretano de 4 [mm] y conectores de acople rápido para unir el circuito entre el Compresor (E-3) – Regulador de Presión (R-1) – Válvula de Aire (V-2) – Flujómetro (F-1) – Inyector de Alúmina Permeable o Capilar (E-4) al equipo principal. Tanto al inicio como al término del equipo se adosaron flanges de acrílico con un sello de goma y tornillos, con tal de conferirle resistencia al

dispositivo ante una eventual fractura de material ejercida por la presión de la cámara interior, tal como se exhibe en la Figura 4.3.



Figura 4.3 Instalación del flange superior en el dispositivo de flujo descendente de laboratorio.

2. Definición de las Condiciones Operacionales: Las experiencias de laboratorio contemplan la evaluación del efecto del tipo inyector, tipo de espumante, concentración de espumante, flujo de alimentación y posición de muestreo, sobre los parámetros hidrodinámicos en el dispositivo de flujo descendente.

En relación al tipo de inyector, se utilizó un Difusor de alúmina permeable y un capilar de acero inoxidable de 400 [μm] de diámetro. Los espumantes seleccionados fueron del tipo alcohol alifático (i.e., Aerofroth® 70, conocido comercialmente también con el nombre de MIBC) y polipropilenglicol (i.e., OrePrep® F507), ambos de grado analítico y suministrados por el proveedor Cytec® (actualmente conocido como Solvay).

El flujo de alimentación se midió con aforo volumétrico, estableciéndose dos niveles, un nivel bajo correspondiente a 50 [mL/s] y uno alto de 100 [mL/s]. Particularmente, el tamaño de burbuja fue medido en diferentes ubicaciones a lo largo del cuello del dispositivo, estas ubicaciones se presentan en la Figura 4.4, donde la posición superior o Top corresponde a una ventana de muestreo posicionada 5 [cm] sobre el inyector y a 69 [cm] del tope superior del cuello, con tal de aislar el efecto de la turbulencia generada por el ingreso de la corriente de líquido. La posición media o Middle corresponde a una ventana de muestreo ubicada en el punto de generación de burbujas (i.e., en el inyector) y la posición inferior o Bottom hace referencia a una ventana de muestreo posicionada 15 [cm] bajo el inyector.

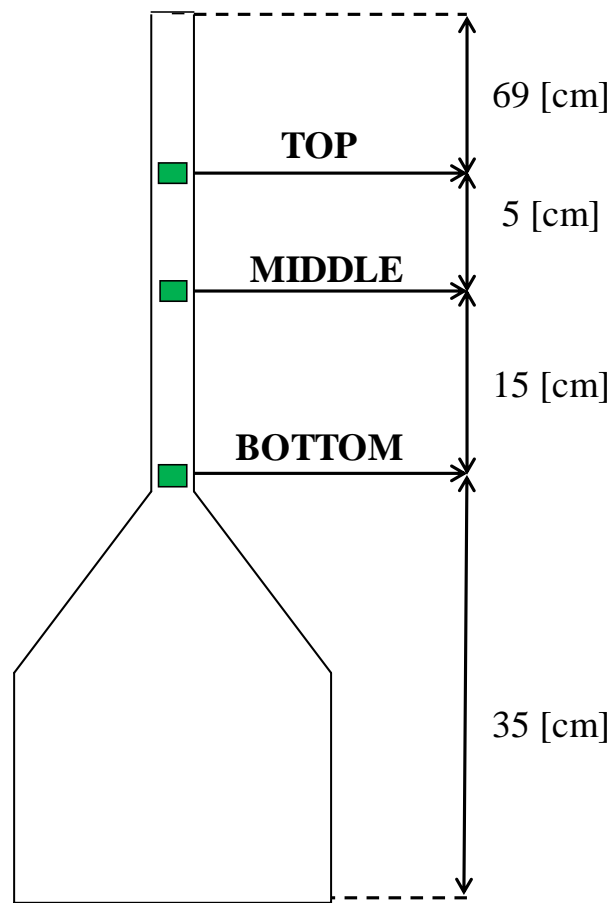


Figura 4.4 Posición de la captura de imágenes a lo largo del cuello del dispositivo de flujo descendente.

En referencia a la combinatoria entre las variables de estudio señaladas anteriormente, se presenta en la Tabla 4.4 las condiciones operacionales que se establecieron en las experiencias de laboratorio realizadas, dando como resultado un total de 72 combinaciones para las pruebas experimentales.

Tabla 4.4 Condiciones operacionales de las pruebas experimentales.

Tipo de Inyector	Tipo de Espumante	Concentración Espumante [mmol/L]	Flujo de Alimentación [mL/s]	Posición de Muestreo
Difusor de Alúmina Permeable o Capilar	MIBC o F507	0 (equivalente a 0 [ppm] MIBC o F507)	50 100	Sobre el inyector (Top)
		0.05 (equivalente a 5.1 [ppm] MIBC y 21.5 [ppm] F507)		En el inyector (Middle)
		0.5 (equivalente a 51 [ppm] MIBC y 215 [ppm] F507)		Bajo el inyector (Bottom)

A modo de ilustrar la combinatoria entre las variables de estudio, y, en consecuencia, definir una condición de operación para una prueba experimental, se exhiben los siguientes ejemplos de algunas combinaciones factibles.

Condición N°1: Se utilizó sistema de generación de burbujas correspondiente a un difusor de alúmina permeable. Se trabajó con una solución de agua y MIBC a una concentración de 50 [mmol/L], además de un flujo de alimentación de 50 [mL/s]. La captura de imágenes se realizó en la posición superior del cuello o también llamada Top.

Condición N°2: Se utilizó sistema de generación de burbujas correspondiente a un difusor de alúmina permeable. Se trabajó con una solución de agua y MIBC a una concentración de 50 [mmol/L], además de un flujo de alimentación de 100 [mL/s]. La captura de imágenes se realizó en la posición superior del cuello o también llamada Top.

Condición N°3: Se utilizó sistema de generación de burbujas correspondiente a un difusor de alúmina permeable. Se trabajó con una solución de agua y MIBC a una concentración de 50 [mmol/L], además de un flujo de alimentación de 100 [mL/s]. La captura de imágenes se realizó en la posición inferior del cuello o también llamada Bottom.

Condición N°4: Se utilizó sistema de generación de burbujas correspondiente a un capilar de 400 [μm] de diámetro. Se trabajó con una solución de agua y MIBC a una concentración de 50 [mmol/L], además de un flujo de alimentación de 100 [mL/s]. La captura de imágenes se realizó en la posición inferior del cuello o también llamada Bottom.

3. Preparación y Acondicionamiento del Equipo de Laboratorio: Habiendo establecido las condiciones de operación para la experiencia de laboratorio, se procedió a preparar la solución de espumante y agua según la concentración de espumante en estudio.

Para ello, se utilizó una micropipeta marca Science Med con una capacidad máxima de 1000 [μL] para cuantificar la cantidad de espumante a adicionar en la solución y se depositaron 20 [L]²⁷ de agua en el Estanque de Alimentación (E-2). Luego, se procedió a homogenizar la solución mediante el accionamiento de la Bomba de Alimentación (B-1) y la recirculación de su corriente de descarga (P-1 y P-4) hacia E-2 por un tiempo de 15 [min]. Posteriormente, se accionó el compresor, se fijó el caudal de aire²⁸ en 15 [mL/min] con la ayuda de la Válvula de Aire (V-2) y el Flujoímetro de Aire (F-1). Finalmente, se accionó la Bomba de Alimentación (B-1), dirigiendo la corriente de líquido (P-1) hacia el tope superior del cuello del dispositivo y se dejó operando el sistema por 15 [min] hasta alcanzar un estado estacionario (aproximadamente 9 -18 tiempos de residencia medio) de operación.

4. Setup Cámara de Alta Velocidad y Obtención las Imágenes: Luego de alcanzar el estado estacionario en la operación del dispositivo, se procedió a la captura de las imágenes mediante la técnica de cinematografía de alta velocidad, con el objetivo de determinar el tamaño de burbuja y el hold-up 2D en el dispositivo de flujo descendente.

²⁷ La cantidad de agua que se depositó en el Estanque de Alimentación (E-2) para realizar la solución con espumante y agua, se mantiene constante para todas las pruebas experimentales desarrolladas.

²⁸ El caudal de aire que ingresa al dispositivo de flujo descendente se mantuvo constante en todas las experiencias de laboratorio. Este correspondió a un valor de 15 [mL/min].

Para la captura de las imágenes, se utilizó una cámara de alta velocidad modelo TroubleShooter desarrollada por Fastec Imaging Corporation que se posicionó sobre un trípode en la parte frontal del dispositivo, además de tener en consideración que la configuración de la cámara debe corresponder a la información presentada en la Tabla 4.5. y Figura 4.5. A la misma altura, pero por la parte posterior del dispositivo, se posicionó el Foco Led (E-6).

Además, se hace necesaria una calibración previa del sistema antes de capturar las fotografías. Esta calibración se realiza con el objetivo de representar los 1280 [píxeles] que tiene la fotografía en el eje horizontal y convertirlos en unidad de longitud ([mm] en este caso). Para ello se enfoca el punto donde se van a capturar las imágenes de la prueba experimental, se dispone de una regla en el eje horizontal de este punto y se captura una imagen de referencia, obteniéndose así la equivalencia en milímetros de los 1280 [píxeles] de la horizontal. Ya definida la referencia de muestreo y la calibración, se da inicio al ensayo experimental, manteniendo la posición de la cámara fija a la cual se realizó la calibración.

En cada medición, se colectaron 500 fotografías por cada una de las 3 posiciones de muestreo, dado un tipo de inyector, tipo y concentración de espumante, flujo de alimentación de líquido y flujo de alimentación de gas, recolectándose un total de 36.000 fotografías en los 72 ensayos realizados.

Tabla 4.5 Configuración cámara de alta velocidad [93].

Parámetro	Valor	Descripción
Shutter Multiplier	2x	El multiplicador del obturador determina la velocidad de obturación de la cámara.
Trigger	End	Señal de disparo al final, es decir, se detiene la grabación cuando se presiona el botón STOP.
Image Size	1280x1024	Resolución de la grabación en píxeles (i.e., 1,310,720 píxeles).
Record Rate	250	Frecuencia de la grabación en cuadros por segundo.

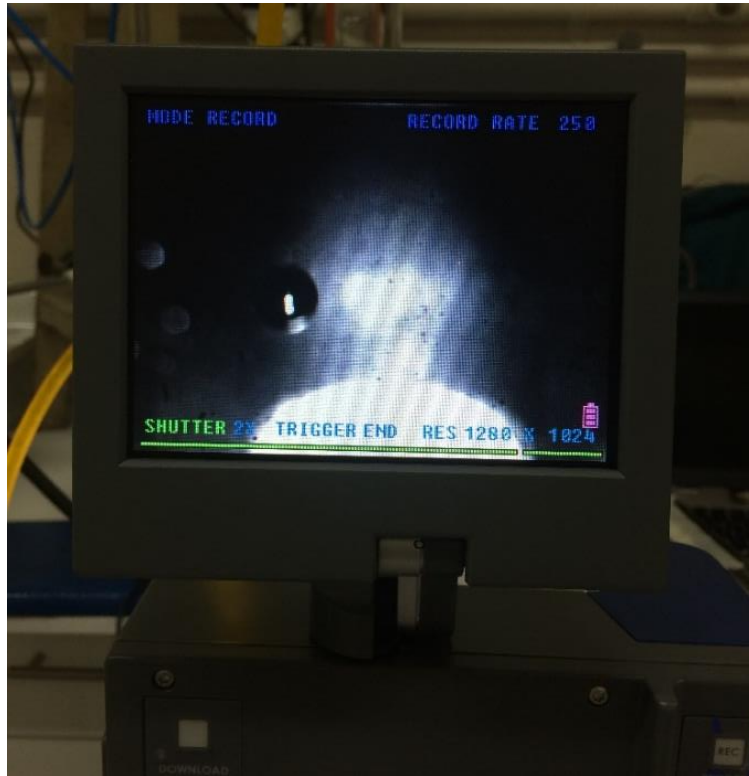


Figura 4.5 Vista del panel de configuración en la cámara de alta velocidad.

5. Procesamiento de las Imágenes y Obtención de los Parámetros Hidrodinámicos:

Luego de obtenidas las imágenes, se utilizó un algoritmo de procesamiento de imágenes, desde ahora llamado Bubble Analysis Farías-Mella®, para la obtención de los parámetros hidrodinámicos correspondientes al tamaño de burbuja y hold-up de gas 2D. Este algoritmo se detallará en la siguiente sección.

4.2.1 Algoritmo de Procesamiento de Imágenes

En el presente estudio se desarrolló el algoritmo Bubble Analysis de Farías-Mella® usando como plataforma de desarrollo el software Matlab®, con el objetivo de obtener el diámetro de burbuja y hold-up 2D (Ver Sección 2.1.2) a partir de las imágenes capturadas mediante cinematografía de alta velocidad.

Este algoritmo de procesamiento de imágenes mejorado se basa en la relación entre el área del objeto (i.e., en este caso el objeto corresponde a una burbuja), y el área convexa con el fin de detectar pequeñas burbujas y/o burbujas irregulares, además de incluir un Threshold

(umbral) variable, el cual contempla un histograma de intensidades que ayuda a resolver problemas de iluminación irregular en las fotografías o la presencia de partículas oscuras, incrementando así la confiabilidad de la técnica de análisis de imágenes [94].

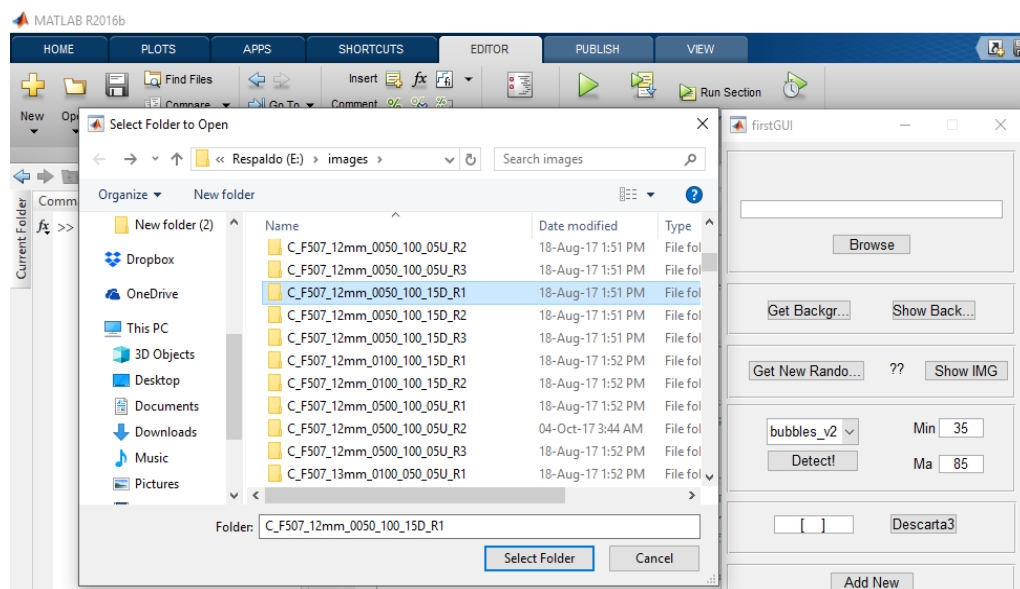
A continuación, en la Figura 4.6 se describe paso a paso la secuencia lógica que emplea el algoritmo para la detección de los elementos de interés en una imagen y la obtención de información como el tamaño de burbuja y hold-up 2D. El código en Matlab® del algoritmo Bubble Analysis de Farías-Mella® desarrollado se adjunta en la Sección 8.15.

PASO 1

Se elige el directorio raíz de trabajo donde se encuentran las fotos (con resolución de 1280x1024 [pixeles]) a procesar, el nombre del directorio debe tener la siguiente estructura:

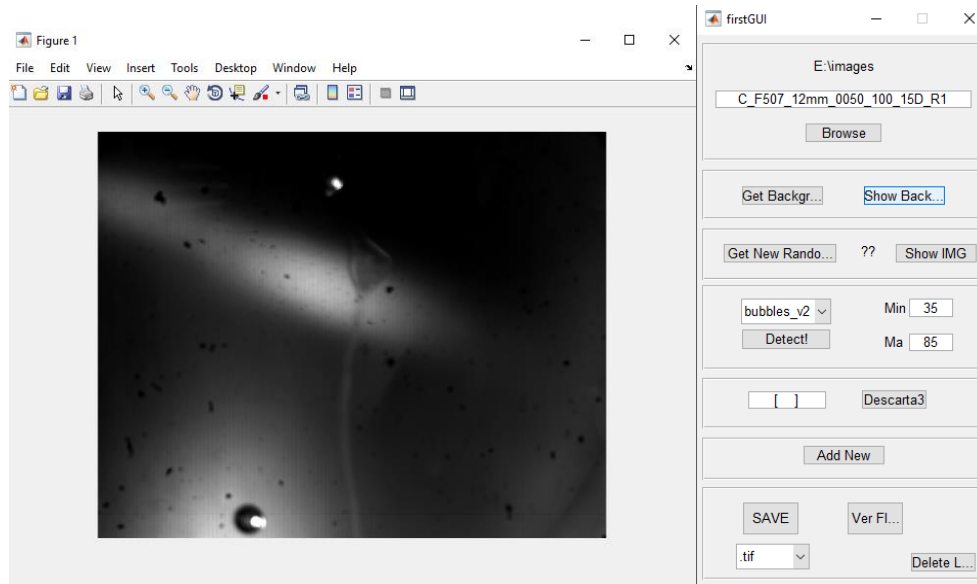
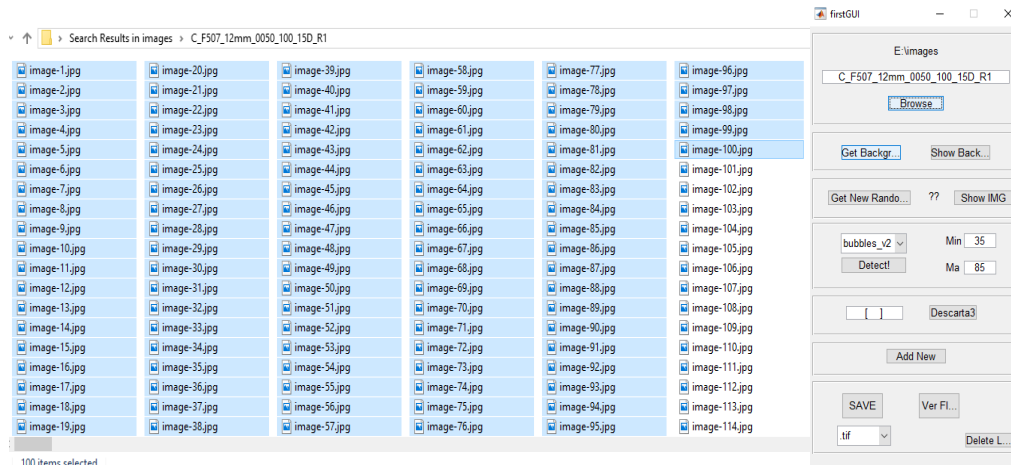
C_F507_12mm_0050_100_15D_R1

Generación Burbuja P: Poroso C:Capilar	Tipo Espumante MIBC F507	Calibración Foto 1280 [pixeles]=14[mm]	Concentración de Espumante 0000 = 0 [mmol/L] 0050 = 0,05 [mmol/L] 0500 = 0,5 [mmol/L]	Flujo Alimentación 100 [ml/s] 050 [ml/s]	Posición de Muestreo Foto 05U = Top 00U = Middle 15D = Bottom	Repetición Test R1 = Repetición N°1 R2 = Repetición N°2 R3 = Repetición N°3
---	---------------------------------------	--	---	---	---	---



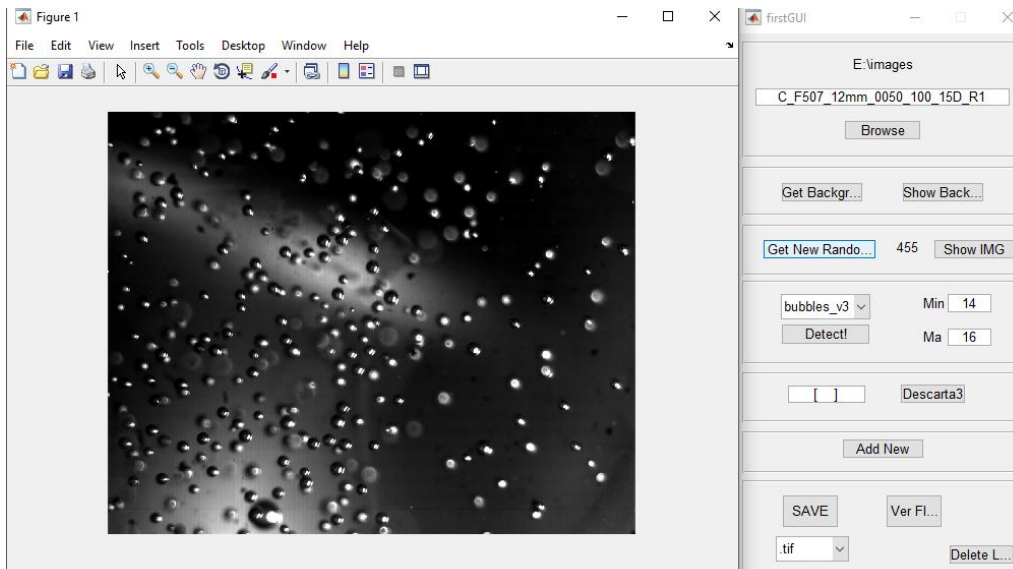
PASO 2

Se utilizan las primeras 100 imágenes del directorio seleccionado para realizar la detección del fondo. Estas imágenes en formato RGB son convertidas a imágenes en escala de grises. Mediante el cálculo de la mediana de las intensidades de cada pixel con respecto a las 100 imágenes que se procesan se obtiene una matriz de intensidades para el fondo.



PASO 3

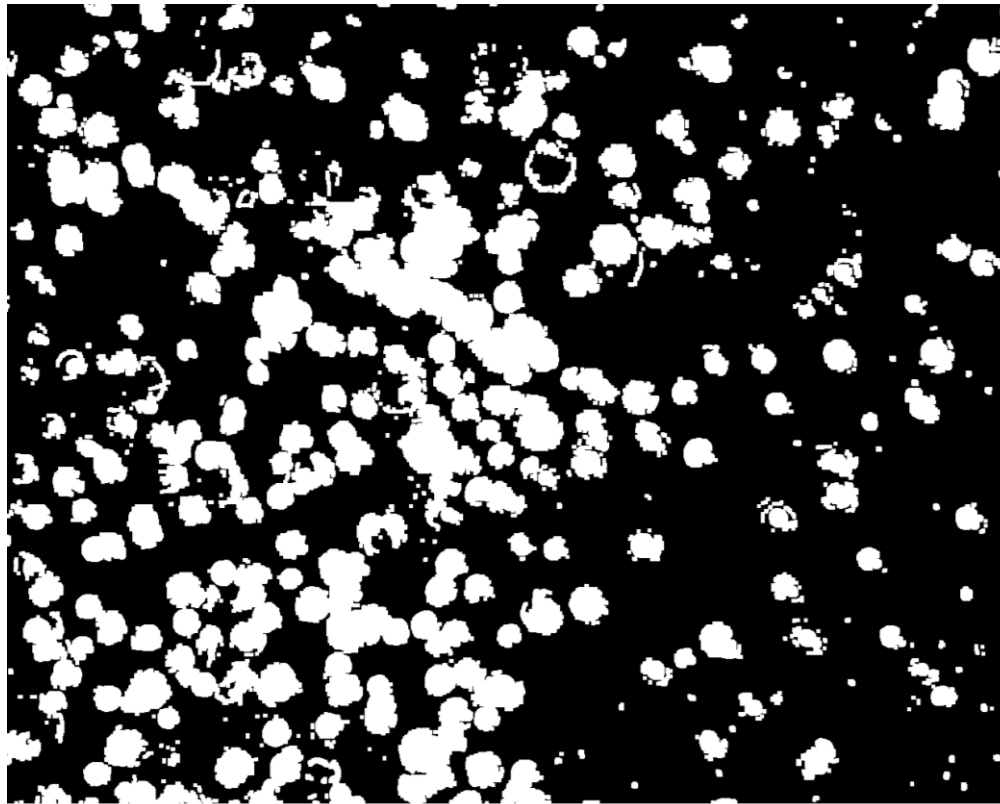
Desde el directorio raíz de trabajo se selecciona una imagen al azar para realizar la detección de los objetos (i.e., en este caso burbujas) presentes en la imagen.



PASO 4

Se emplea un algoritmo de detección de objetos basado en la relación entre el área del objeto y el área convexa. Para ello, se calcula la diferencia absoluta entre las intensidades de la imagen en estudio y el fondo. Luego, se agrupa por intensidades los objetos detectados, obteniéndose objetos compactos (o también llamados hoyos). Se aplica una función de Treshhold variable de forma local que permite filtrar los objetos detectados y definir su borde. Se rellenan los hoyos, aislándose los elementos traslapados, se registra el centro y el radio de cada objeto y se le asigna un numero correlativo al elemento detectado. Con la información presente en el nombre del directorio se obtiene la calibración de la imagen, se realiza la conversión del radio de [píxeles] a [mm] y se calcula el hold-up 2D, dividiendo el área total de todos los objetos detectados en relación al área total de la foto en píxeles.

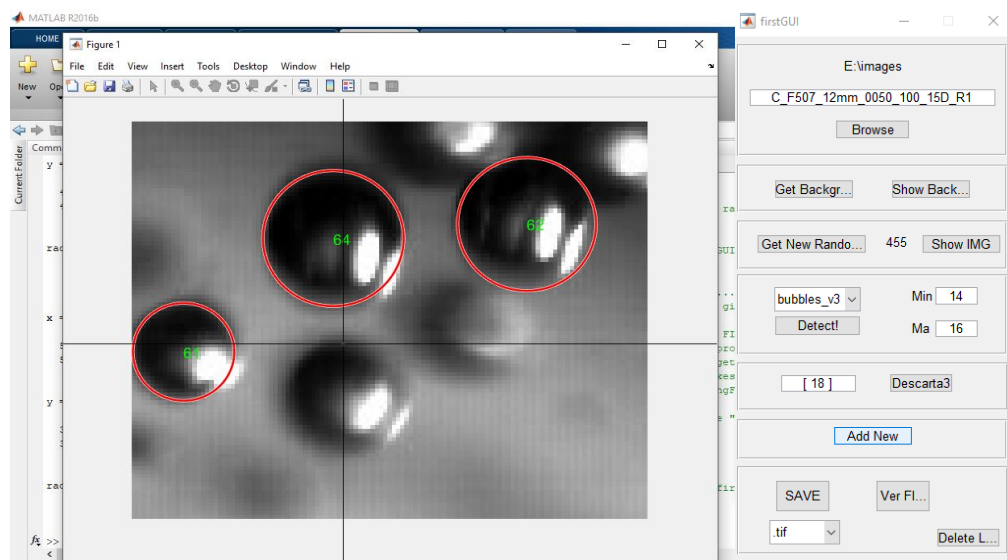
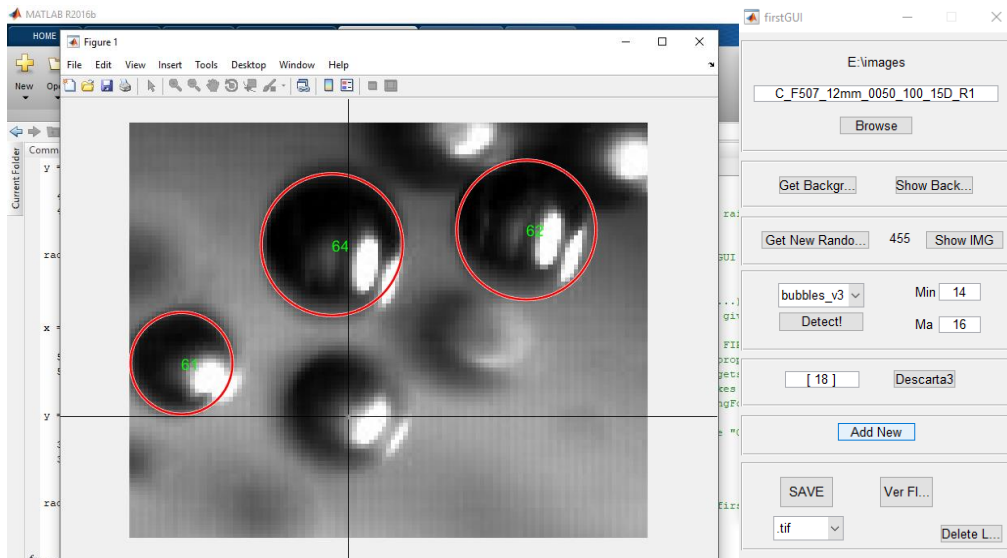
Continuación



Variables - result						
result						
76x6 cell						
	1	2	3	4	5	6
1	'Nombre'	'Radios'	'im_ratio'	'radios_conv'	'D32'	'Eg'
43	'P_F507_16mm_0500_100_00U_R1'	1x662 double	80	1x662 double	0.3717	0.0198
44	'C_MIBC_15mm_0500_100_00U_R1'	1x590 double	85.3333	1x590 double	0.4060	0.0227
45	'C_F507_14mm_0500_100_00U_R1'	1x223 double	91.4286	1x223 double	0.7613	0.0224
46	'P_MIBC_14mm_0500_050_00U_R1'	1x1439 dou...	91.4286	1x1439 dou...	0.2872	0.0277
47	'P_F507_12mm_0500_050_00U_R1'	1x873 double	106.6667	1x873 double	0.3127	0.0199
48	'C_MIBC_17mm_0500_050_00U_R1'	1x354 double	75.2941	1x354 double	0.4126	0.0142
49	'C_F507_15mm_0500_050_00U_R1'	1x40 double	85.3333	1x40 double	0.8778	0.0072
50	'P_MIBC_14mm_0050_100_00U_R1'	1x189 double	91.4286	1x189 double	0.3501	0.0049
51	'P_F507_14mm_0050_100_00U_R1'	1x283 double	91.4286	1x283 double	0.3261	0.0067
52	'C_MIBC_13mm_0050_100_00U_R1'	1x99 double	98.4615	1x99 double	0.8822	0.0091
53	'C_F507_11mm_0050_100_00U_R1'	1x83 double	116.3636	1x83 double	0.6568	0.0074
54	'P_MIBC_11mm_0050_050_00U_R1'	1x1084 dou...	116.3636	1x1084 dou...	0.2382	0.0141
55	'P_F507_12mm_0050_050_00U_R1'	1x465 double	106.6667	1x465 double	0.2721	0.0079
56	'C_MIBC_12mm_0050_050_00U_R1'	1x34 double	106.6667	1x34 double	0.8162	0.0053
57	'C_F507_11mm_0050_050_00U_R1'	1x82 double	116.3636	1x82 double	0.5304	0.0054
58	'P_MIBC_12mm_0000_100_15D_R1'	1x42 double	106.6667	1x42 double	0.2688	6.8444e-04

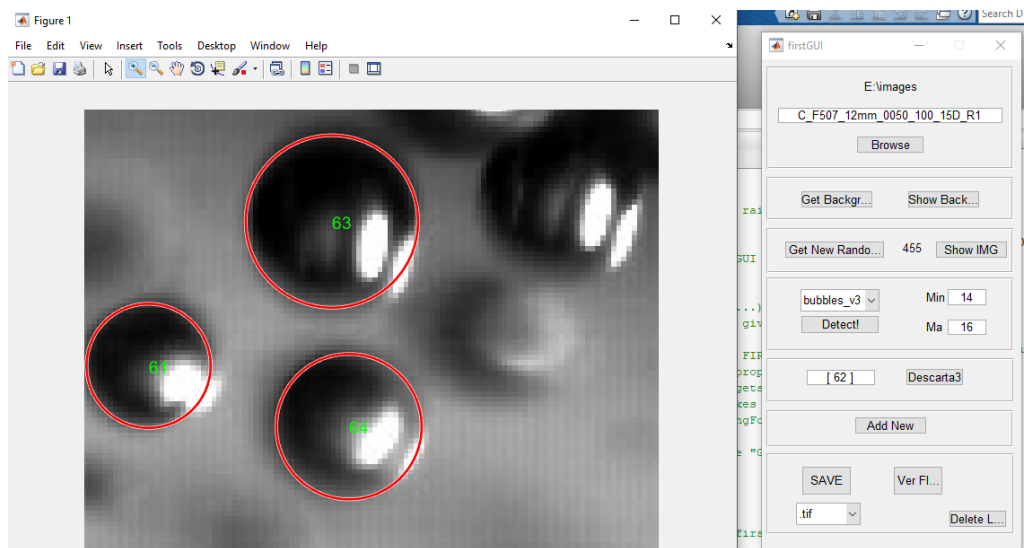
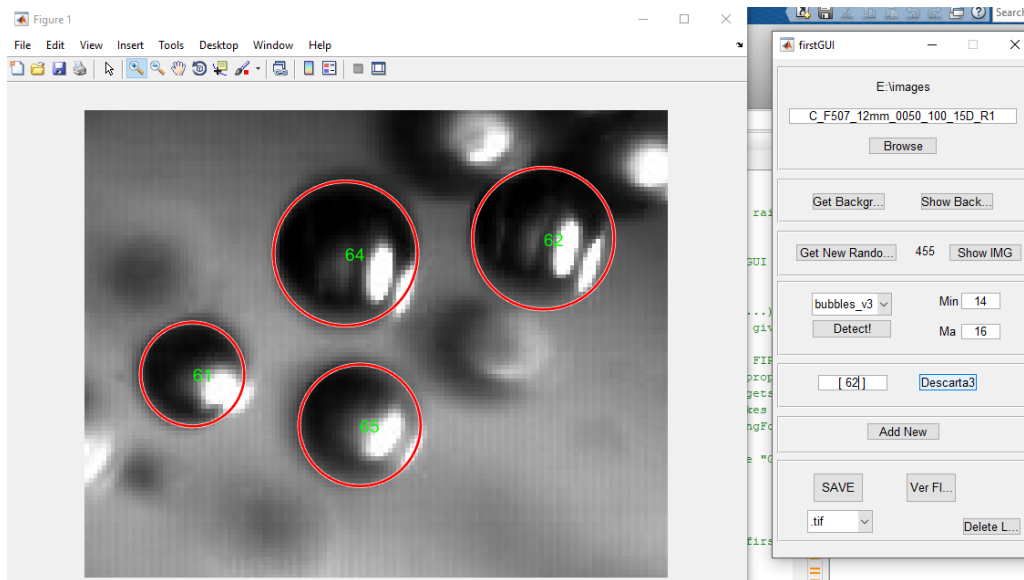
PASO 5

Si algún elemento presente en la imagen no ha sido detectado, el algoritmo provee la posibilidad de agregar dicho elemento a la base de datos. Para ello se debe marcar el centro y el borde de la burbuja (i.e., Radio de la burbuja).



PASO 6

Si se detectó erróneamente un objeto en la imagen o se agregó erróneamente un objeto a la imagen, el algoritmo provee la posibilidad de borrar el registro de dicho elemento de la base de datos. Para ello, se debe indicar el número del elemento a eliminar.



PASO 7

Se procede a guardar la imagen procesada en formato TIFF o JPG, según corresponda, y se crea un registro con los datos obtenidos del procesamiento de la imagen (i.e., el centro y radio de cada elemento detectado) en formato.mat. Si el último registró se guardó erróneamente, es posible eliminarlo de la base de datos.

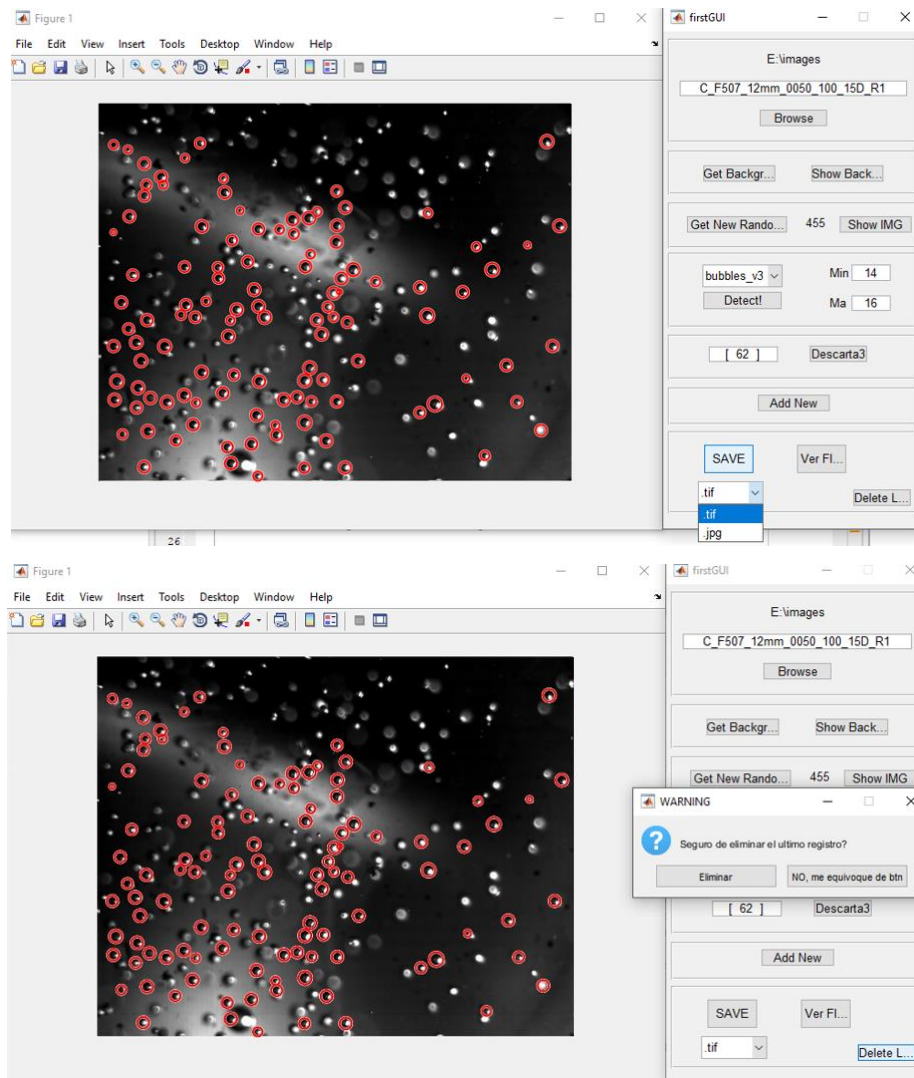


Figura 4.6 Descripción de la secuencia lógica del algoritmo Bubble Analysis de Farías-Mella®.

Ya presentada la metodología experimental que se llevó a cabo en el presente trabajo de memoria, la cual permitió caracterizar el comportamiento hidrodinámico del dispositivo de flujo descendente de laboratorio, además de presentar en detalle el algoritmo de procesamiento de imágenes que se desarrolló para la obtención de los parámetros hidrodinámicos de interés, se da paso al siguiente capítulo donde se analizan los diferentes resultados a evaluar sobre la aplicación de la rutina iterativa propuesta para la estimación del diámetro de burbuja empleando el análisis drift, finalizando con la evaluación de los parámetros hidrodinámicos obtenidos para un dispositivo de flujo descendente.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas experimentales realizadas con el objetivo de evaluar la hipótesis planteada en el presente trabajo de memoria, referente a la caracterización experimental de la hidrodinámica del enjambre de burbujas en un dispositivo de laboratorio de flujo descendente equipado con cinematografía de alta velocidad. Para esto, la introducción de los aspectos teóricos en relación a los parámetros de dispersión de gas, junto con los principales reactivos y equipos de flotación fueron abordados.

Cabe destacar, que se implementó un dispositivo de flujo descendente de laboratorio donde las variables en estudio (i.e., velocidad superficial de gas (J_g) y líquido (J_l)) fueron estimadas a partir de mediciones con equipos e instrumentos especialmente integrados en la configuración experimental, junto con el desarrollo del algoritmo Bubble Analysis de Farías-Mella® para la determinación del tamaño de burbuja (d_b), hold-up 2D (ε_g^{2D}) y flujo superficial de área de burbuja (S_b).

Además, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la rutina iterativa basada en el análisis de Drift Flux con el objetivo de predecir el diámetro de burbuja en celdas neumáticas. Dicha evaluación se realizó gracias al empleo del algoritmo Drift Flux Routine de Mella®.

5.1 Parámetros Hidrodinámicos en Dispositivo de Flujo

Descendente

Velocidad superficial de gas (J_g)

Para las pruebas experimentales se utilizó un caudal de aire fijo de 15 [mL/min] o 15 [cm³/min] y el área de la sección transversal del dispositivo de flujo descendente de laboratorio correspondió a 10 [cm²]. Con esta información es posible estimar la velocidad superficial de gas (J_g) de la siguiente forma.

$$J_g = \frac{15 \left[\frac{cm^3}{min} \right] \cdot \left[\frac{1 min}{60 s} \right]}{10 [cm^2]} = 0.025 [cm/s] \quad (5.1)$$

A pesar de que el valor de velocidad superficial de gas está por debajo de los valores típicos de operación (Ver Sección 2.1.5), se decidió trabajar en este orden de magnitud para estudiar adecuadamente un sistema disperso.

Velocidad superficial de líquido (J_l)

Para las pruebas experimentales se utilizaron dos niveles para el flujo de líquido, es decir, 50 [mL/s] para el nivel bajo y 100 [mL/s] para el nivel alto. Utilizando el área de la sección transversal del dispositivo de laboratorio correspondiente a 10 [cm²], es posible determinar la velocidad superficial de líquido (J_l), como se indica a continuación.

$$J_{l,nivel\ bajo} = \frac{50 \left[\frac{cm^3}{s} \right]}{10 [cm^2]} = 5 [cm/s] \quad (5.2)$$

$$J_{l,nivel\ alto} = \frac{100 \left[\frac{cm^3}{s} \right]}{10 [cm^2]} = 10 [cm/s] \quad (5.3)$$

Estas velocidades superficiales de líquido se encuentran dentro del rango de operación normal para dispositivos de flujo descendente de laboratorio [19] (2 – 67 [cm/s]).

Distribución de tamaño de burbuja (BSD)

Los resultados referentes a la distribución de tamaño de burbuja se exhiben mediante histogramas, donde el eje x corresponde a la clase de tamaño en [mm] y el eje y representa la frecuencia de la clase normalizada en [%]. En los histogramas se adjunta el valor promedio de la muestra señalado con una línea roja vertical y se denomina con la letra M.

Adicionalmente, se presenta la *skewness*²⁹ y la *kurtosis*³⁰. La *skewness* (denominada con la letra S en el histograma) es una medida de la asimetría de los datos alrededor del valor promedio de la muestra. Por lo tanto, un valor de *skewness* < 0 representa que los datos se distribuyen más hacia la izquierda del valor promedio que a la derecha, una *skewness* $= 0$ se ilustra a una distribución perfectamente simétrica y una *skewness* > 0 manifiesta que los datos se distribuyen más hacia la derecha del valor promedio que a la izquierda [95]. Por otro lado, la *kurtosis* (denominada con la letra K en el histograma) representa la nitidez del peak de una curva de distribución de frecuencia. Una *kurtosis* $= 3$ hace referencia a una distribución normal. Cuando los datos se encuentran concentrados en torno al valor medio, se genera un elevado peak en torno al valor central y se reportan valores de *kurtosis* > 3 . En caso contrario, cuando los datos se encuentran más alejados del valor central, se presenta un bajo grado de peak y una *kurtosis* < 3 [96]. Tanto la definición de *skewness* como la de *kurtosis* se ejemplifican en la Figura 5.1.

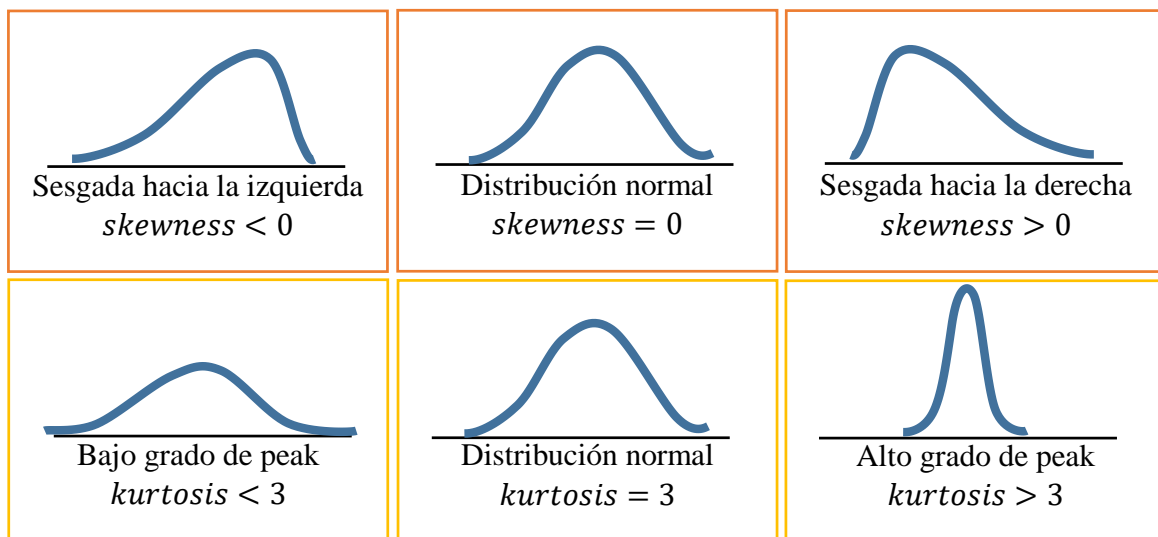


Figura 5.1 Representación esquemática de la *skewness* y *kurtosis*. Adaptado de [97].

La Figura 5.2 exhibe los resultados de las distribuciones de tamaño de burbuja obtenidas en las posiciones de muestreo *Top – Middle – Bottom* para el downcomer del dispositivo de flujo descendente de laboratorio operando con un difusor de alúmina permeable (el cual se

²⁹ <http://whatis.techtarget.com/definition/skewness>

³⁰ https://www.mathworks.com/help/symbolic/mupad_ref/stats-kurtosis.html

refiere en la figura como difusor poroso), MIBC como espumante a concentraciones de $0 - 0.05 - 0.5$ [$mmol/L$] y flujos de alimentación de líquido de $50 - 100$ [mL/s]. En referencia a la posición de muestreo, para todos los histogramas que componen la Figura 5.2, se demuestra que se produce una clasificación del tamaño de burbuja a lo largo del downcomer, reportándose burbujas de mayor tamaño en la posición *Top* (d_b entre $0.502 - 0.657$ [mm] cuando se opera con 50 [mL/s] de flujo de alimentación y d_b entre $0.618 - 0.952$ [mm] cuando se opera con 100 [mL/s] de flujo de alimentación), en contraste con los menores tamaños de burbuja en la posición *Bottom* (d_b entre $0.129 - 0.266$ [mm] cuando se opera con 50 [mL/s] de flujo de alimentación y d_b entre $0.512 - 0.522$ [mm] cuando se opera con 100 [mL/s] de flujo de alimentación), esto debido al balance de fuerzas que existe entre la velocidad superficial de gas y líquido al interior del downcomer que permite clasificar las burbujas. Por otro lado, las distribuciones de tamaño obtenidas en ausencia de espumante exhiben una población de pequeñas burbujas con diámetros entre $0 - 0.5$ [mm] que según las investigaciones de Polli *et al.*, (2002) [98] y Acuña (2007) [47], señalan que estas pequeñas burbujas son generadas por un mecanismo de ruptura de las burbujas de gran tamaño en el sistema gas-líquido, que en consecuencia permiten la formación de burbujas hijas de menor tamaño. Esta ruptura de la burbuja, mediada por coalescencia, se produce cuando la superficie de la burbuja no es lo suficientemente rígida y estable para compensar la deformación inducida por una onda anular, dando lugar a la formación de una extensión inestable que resulta en la generación de una pequeña burbuja hija [99]; y en consecuencia, la distribución de tamaño de burbuja evoluciona con el tiempo (distancia). Cuando se aumenta la concentración de espumante MIBC, se estabiliza la superficie de la burbuja, además se presentarse un incremento en valores de kurtosis, obteniéndose así distribuciones de tamaño de burbujas similares a una distribución normal (i.e., con valores de kurtosis cercanos 3).

Con respecto al flujo de alimentación de líquido, al aumentar este de 50 [mL/s] a 100 [mL/s] se produce un aumento de la población de pequeñas burbujas, que según lo reportado en la literatura por Polli *et al.*, (2002) [98] y Acuña (2007) [47] correspondería a un incremento de la formación de burbujas hijas frente a un aumento en la tasa de ruptura de la superficie de la burbuja ejercida por el flujo de alimentación. Además, al incrementarse el

flujo de alimentación se produce un desplazamiento de la distribución de tamaño de burbuja hacia la derecha, reportándose tamaños de burbuja mayores en las posiciones de muestreo *Top – Middle – Bottom*. Este efecto se atribuye a la incidencia del flujo de alimentación en el equilibrio de velocidades superficiales de líquido y gas al interior del downcomer, arrastrando así a las burbujas de mayor tamaño a posiciones inferiores en el downcomer.

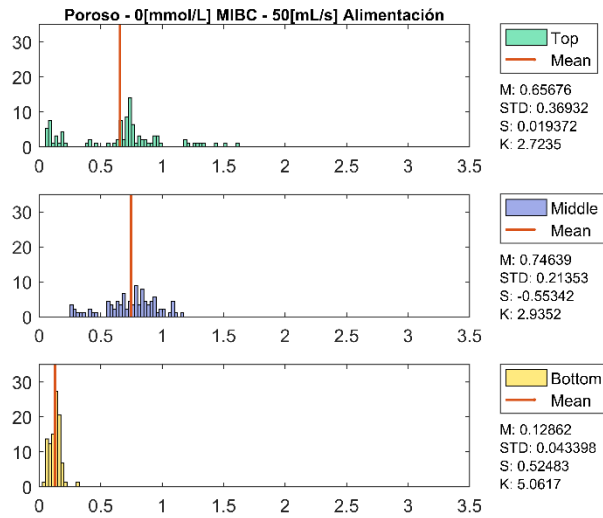
En la Figura 5.3 se presentan los resultados de las distribuciones de tamaño de burbuja obtenidas en las posiciones de muestreo *Top – Middle – Bottom* para el downcomer del dispositivo de flujo descendente de laboratorio operando con un difusor de alúmina permeable, F507 como espumante a concentraciones de 0 – 0.05 – 0.5 [mmol/L] y flujos de alimentación de líquido de 50 – 100 [mL/s]. De modo similar a lo expuesto en el caso anterior, se cree que se produce una clasificación por tamaño de burbuja a lo largo del downcomer debido al ambiente hidrodinámico que confiere este dispositivo, reportándose valores de diámetro de burbuja entre 0.657 – 0.706 [mm] cuando se opera con 50 [mL/s] de flujo de alimentación y d_b entre 0.715 – 0.952 [mm] cuando se opera con 100 [mL/s] de flujo de alimentación para la posición *Top* y diámetros de burbuja entre 0.143 – 0.217 [mm] cuando se opera con 50 [mL/s] de flujo de alimentación y d_b entre 0.497 – 0.731 [mm] cuando se opera con 100 [mL/s] de flujo de alimentación para la posición *Bottom*. En referencia al tipo y concentración de espumante utilizado, cabe destacar que el espumante F507 (polipropilenglicol) le confiere a la superficie de la burbuja una mayor rigidez y estabilidad, y en relación a la explicación propuesta en literatura por Polli *et al.*, (2002) [98] y Acuña (2007) [47] sobre la formación de burbujas hijas, se reportó una menor población de burbujas pequeñas en comparación a los ensayos realizados con MIBC. Por otro lado, al aumentar la concentración de F507 se produce una disminución en la velocidad de ascenso de la burbuja. En particular, la desaceleración que presentan las burbujas se relaciona al efecto que produce el tensoactivo F507 al concentrarse en la parte posterior de la burbuja ascendente por la acción del líquido que fluye sobre la superficie y, en consecuencia, el efecto de una fuerza opositora de gradiente de tensión superficial que aumenta el arrastre, por lo que la superficie de la burbuja se torna rígida [100] [101]. En consecuencia, los resultados presentados se encuentra en concordancia con el trabajo de Azgomi *et al.*, (2007) [58], donde se demostró que al emplear surfactantes del tipo poliglicol se presenta un retardo en la

velocidad de ascenso de la burbuja en comparación al registrado en presencia de surfactantes tipo alcohol alifático, y en acuerdo con lo reportado por Moyo, 2005 [57], el espumante tipo poliglicol (F507 en el contexto del presente estudio de memoria) presentó una elevada tasa de transporte de agua y debido a que ascienden más lentamente las burbujas se reportan valores de hold-up mayores. En relación al efecto que produce el flujo de alimentación de líquido, al aumentarse este de 50 a 100 [mL/s] se produce un desplazamiento de la distribución de tamaño de burbuja hacia la derecha, de similar magnitud a la reportada en la Figura 5.2.

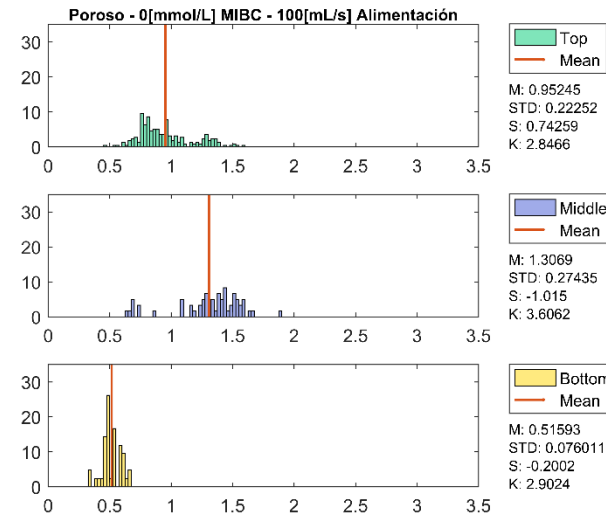
En referencia a las Figura 5.4 y Figura 5.5, se exhiben las distribuciones de tamaño de burbuja obtenidas en las posiciones de muestreo *Top – Middle – Bottom* para el downcomer del dispositivo de flujo descendente de laboratorio operando con un capilar de acero inoxidable de 400 [μm] de diámetro, utilizando MIBC y F507, respectivamente, como espumante a concentraciones de 0 – 0.05 – 0.5 [mmol/L] y flujos de alimentación de líquido de 50 – 100 [mL/s]. A pesar de que se utilizó otro tipo de inyector, se logró clasificar por tamaño las burbujas generadas al interior del dispositivo de flujo descendente de laboratorio. En relación a la presencia de la población de burbujas pequeñas, se cuantificó una menor cantidad de ellas cuando se utilizó el capilar en comparación a los resultados exhibidos cuando se utilizó un difusor de alúmina permeable. Esto se debe a que el tipo de generación para el inyector capilar actúa de forma diferente al difusor de alúmina permeable, debido a que se confina la totalidad de la masa de aire suministrada al dispositivo de laboratorio al interior de un capilar de acero, esta masa de aire se acumula y se descarga en el otro extremo del capilar, generándose así una burbuja. Los tamaños de burbuja generados con el capilar fueron hasta tres veces mayores (para el caso de la posición *Top* operando a un flujo de alimentación de 50 [mL/s]) que los reportados cuando se empleó el difusor permeable. Esto se debe, a que mientras mayor tiempo se mantenga la burbuja adosada al extremo del capilar, mayor será su tamaño, sin embargo, su crecimiento se encuentra limitado por las condiciones hidrodinámicas propias del sistema, la estabilidad de la burbuja, la rigidez de su superficie y el ambiente químico en el cual se genera (i.e., tipo de espumante, concentración, tensión superficial, entre otros). En particular, se debe tener en consideración la relevancia que presenta el tipo de espumante sobre la burbuja, que ya como se demostró anteriormente, un

espumante del tipo poliglicol le confiere mayor rigidez y estabilidad a la superficie de la burbuja en comparación a un espumante tipo alcohol alifático. Además, se destaca el efecto que posee el flujo de alimentación sobre el desprendimiento de la burbuja del extremo del capilar, ya que al aumentar el flujo de 50 a 100 [mL/s] se registra una población de burbujas de menor tamaño, debido a que se limita el tiempo de formación y crecimiento de la burbuja.

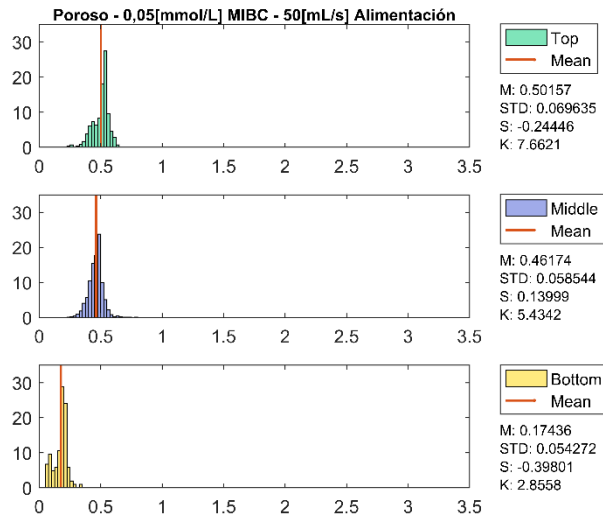
A.1



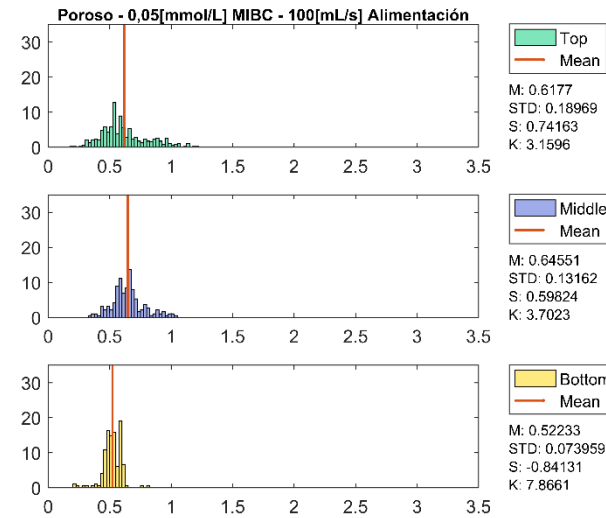
A.2



B.1



B.2



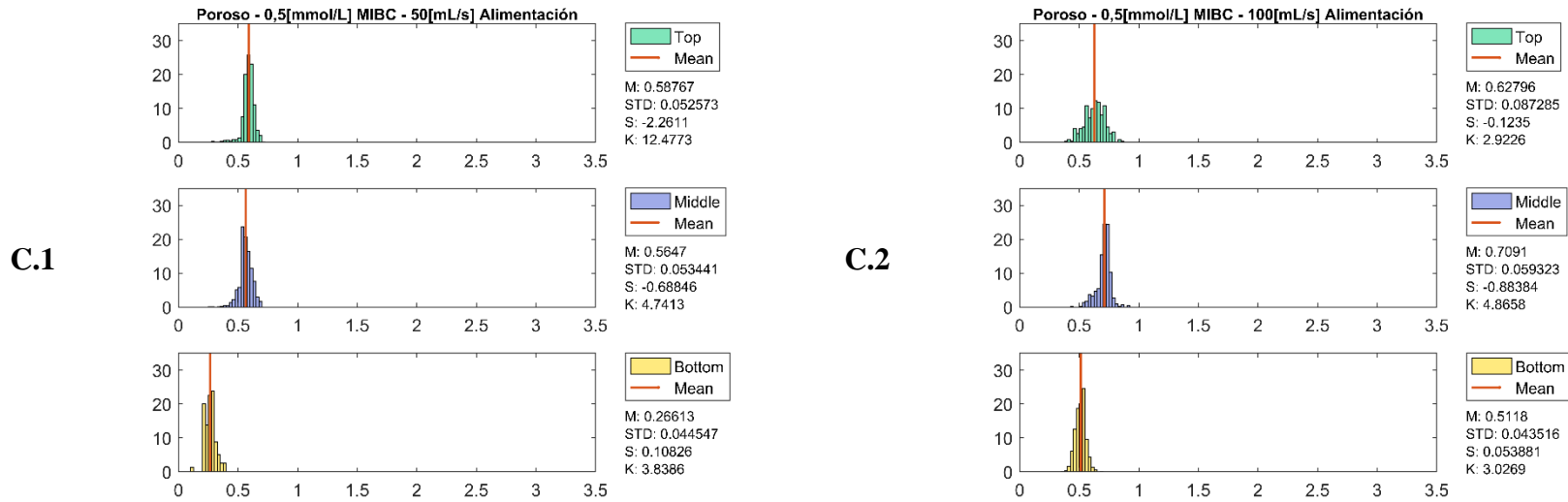
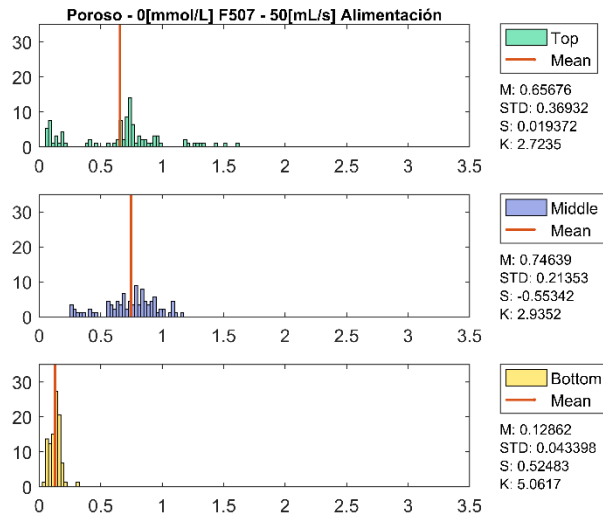
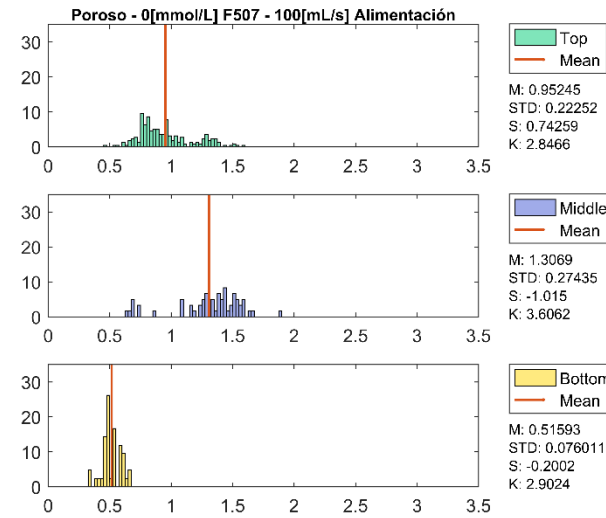


Figura 5.2 Histogramas obtenidos del análisis de las pruebas experimentales utilizando difusor de alúmina permeable (poroso) y espumante MIBC.

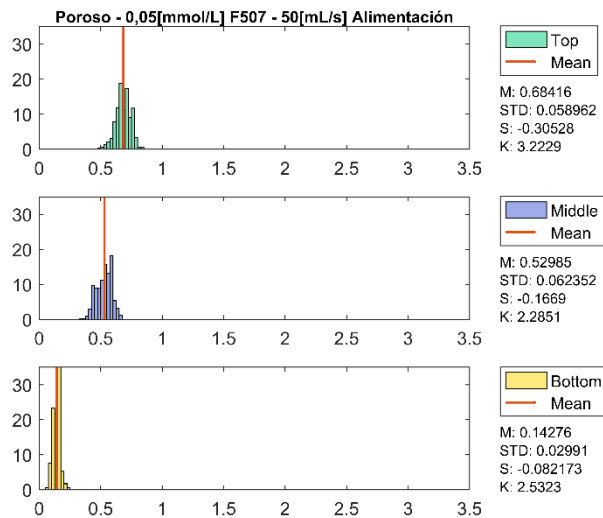
A.1



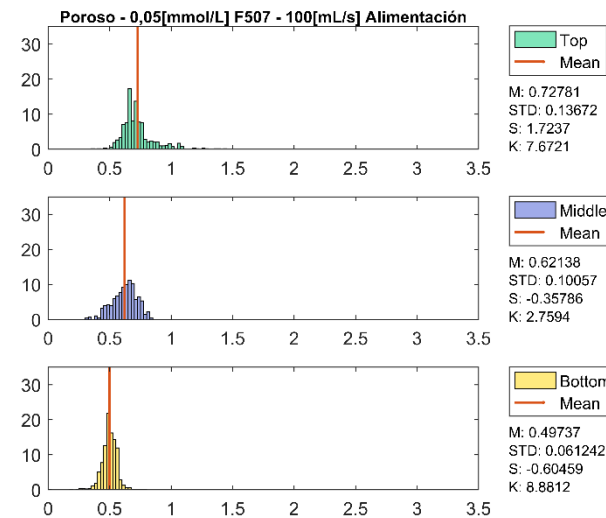
A.2



B.1



B.2



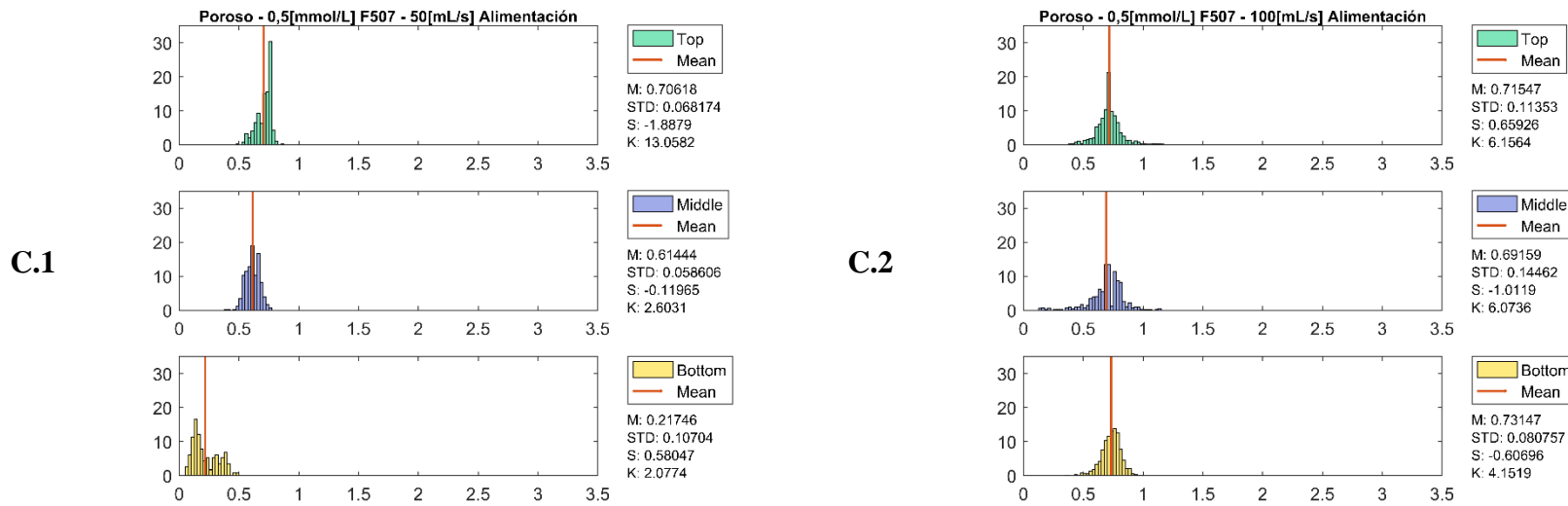
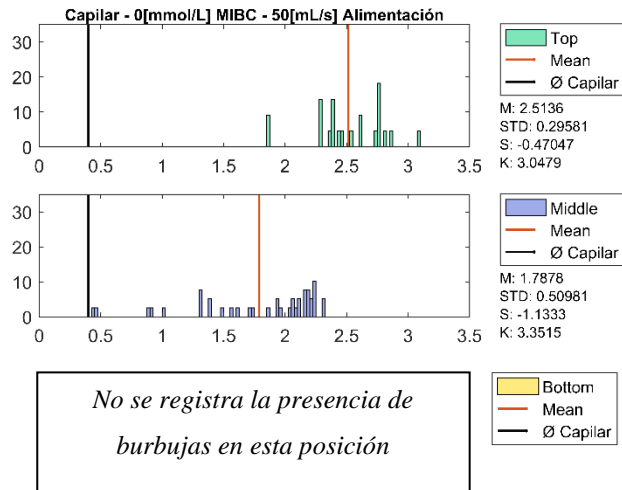
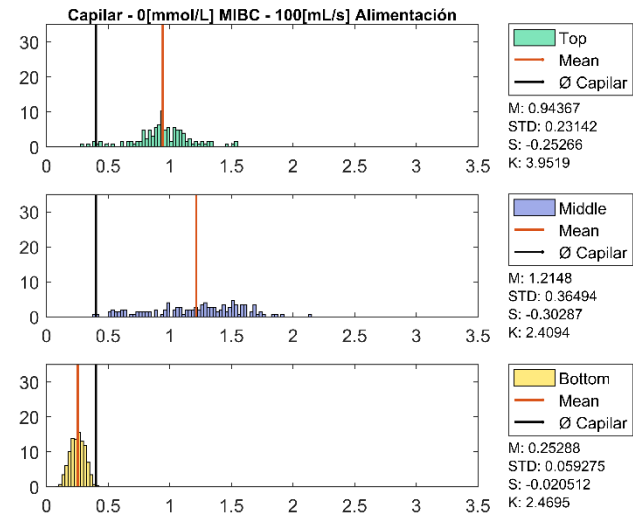


Figura 5.3 Histogramas obtenidos del análisis de las pruebas experimentales utilizando difusor de alúmina permeable (poroso) y espumante F507.

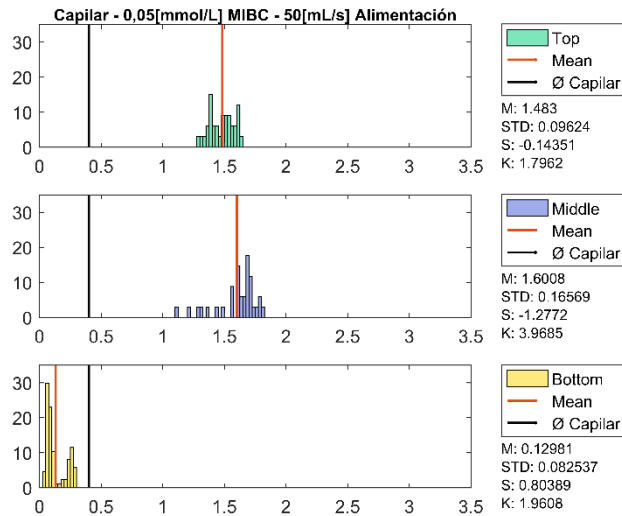
A.1



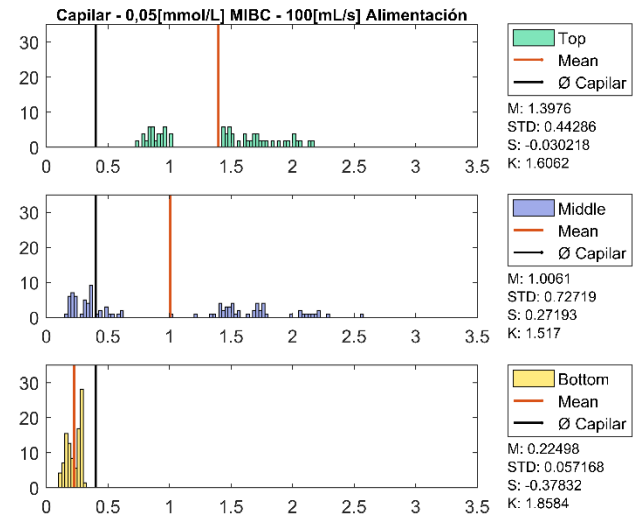
A.2



B.1



B.2



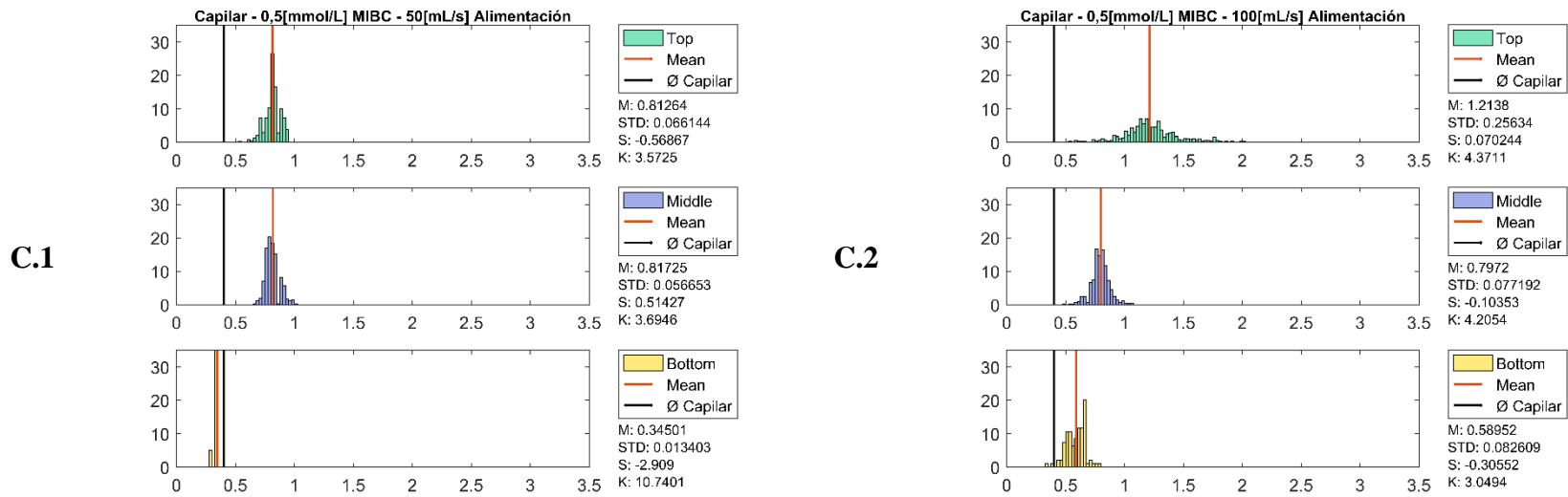
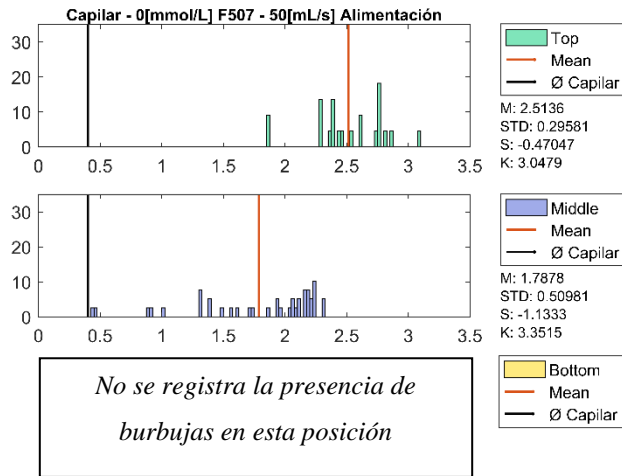
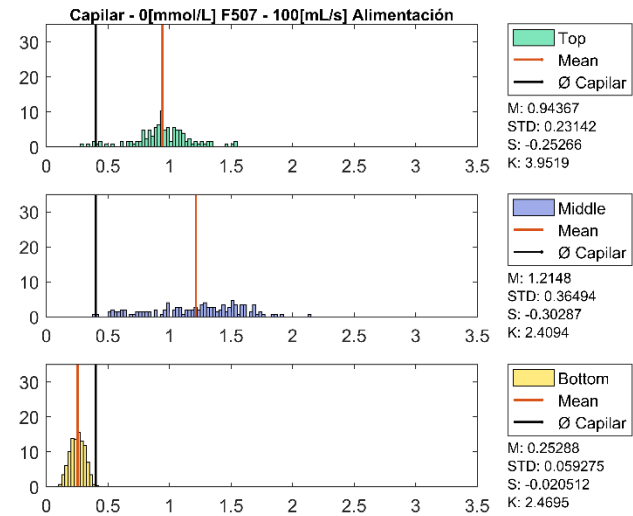


Figura 5.4 Histogramas obtenidos del análisis de las pruebas experimentales utilizando un capilar de acero inoxidable de 400 [μm] (capilar) y espumante MIBC.

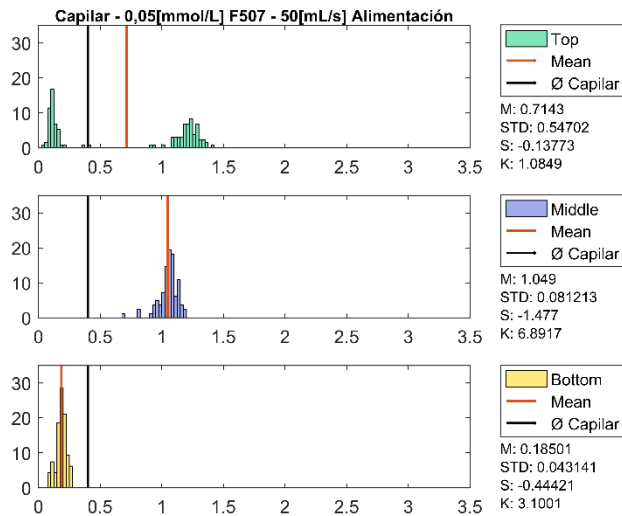
A.1



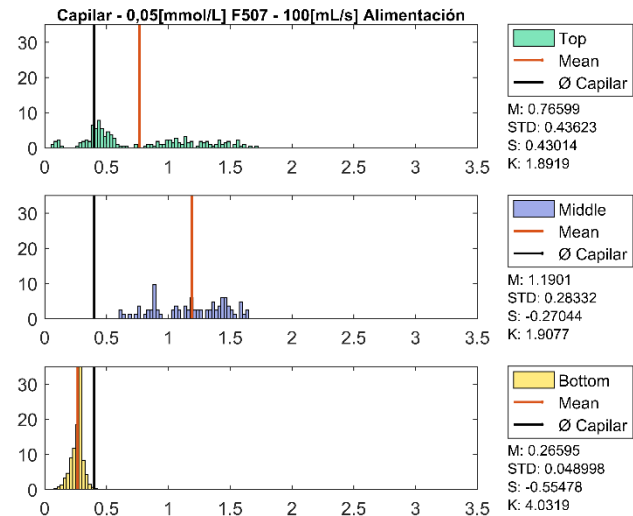
A.2



B.1



B.2



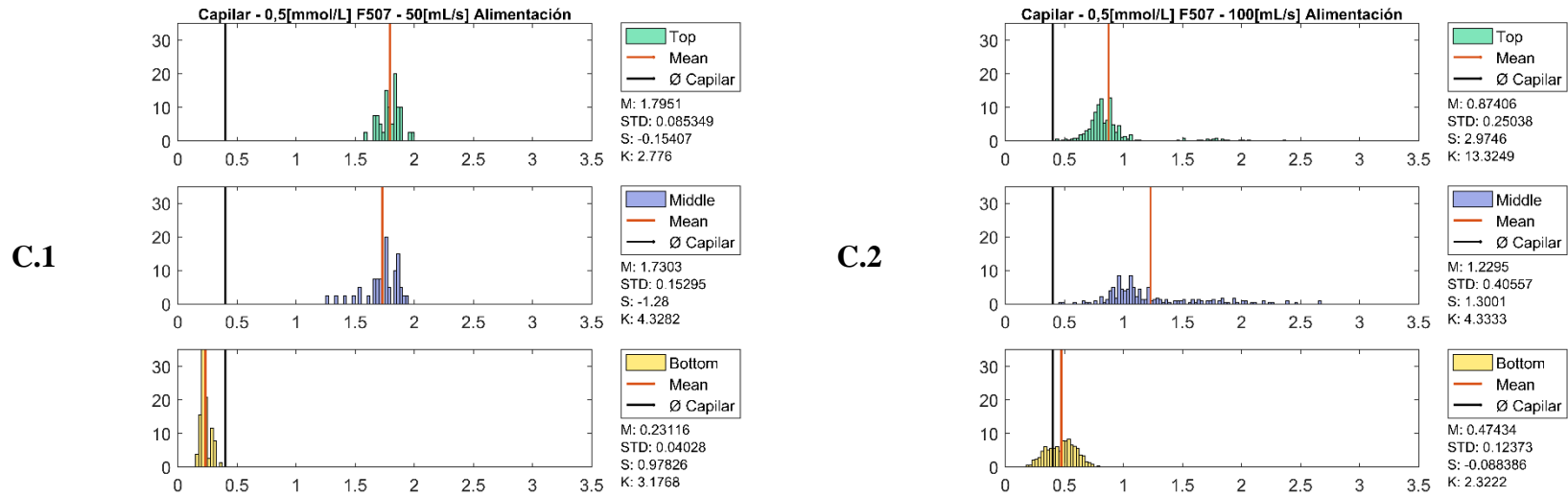


Figura 5.5 Histogramas obtenidos del análisis de las pruebas experimentales utilizando un capilar de acero inoxidable de 400 [μm] (capilar) y espumante F507.

En resumen, se presenta un análisis comparativo del tipo y concentración de espumante sobre la distribución de tamaño de burbuja en la Figura 5.6. Es posible evidenciar que se presenta un menor tamaño de burbuja al emplear MIBC que F507 para el caso del difusor de alúmina permeable esto debido a la estabilidad y rigidez que le confiere el F507 a la superficie de la burbuja. Cuando se utilizó el capilar de acero inoxidable, se reportaron mayores tamaños de burbuja en comparación al difusor de alúmina permeable. Sin embargo, para el caso del capilar el comportamiento del tipo de espumante es inverso al obtenido en el difusor permeable. Lo anterior se atribuye al efecto que ejerce el F507 sobre la superficie de la burbuja, limitando su crecimiento, y por lo tanto, se reportan diámetros de burbuja menores a los exhibidos por el espumante MIBC con el capilar.

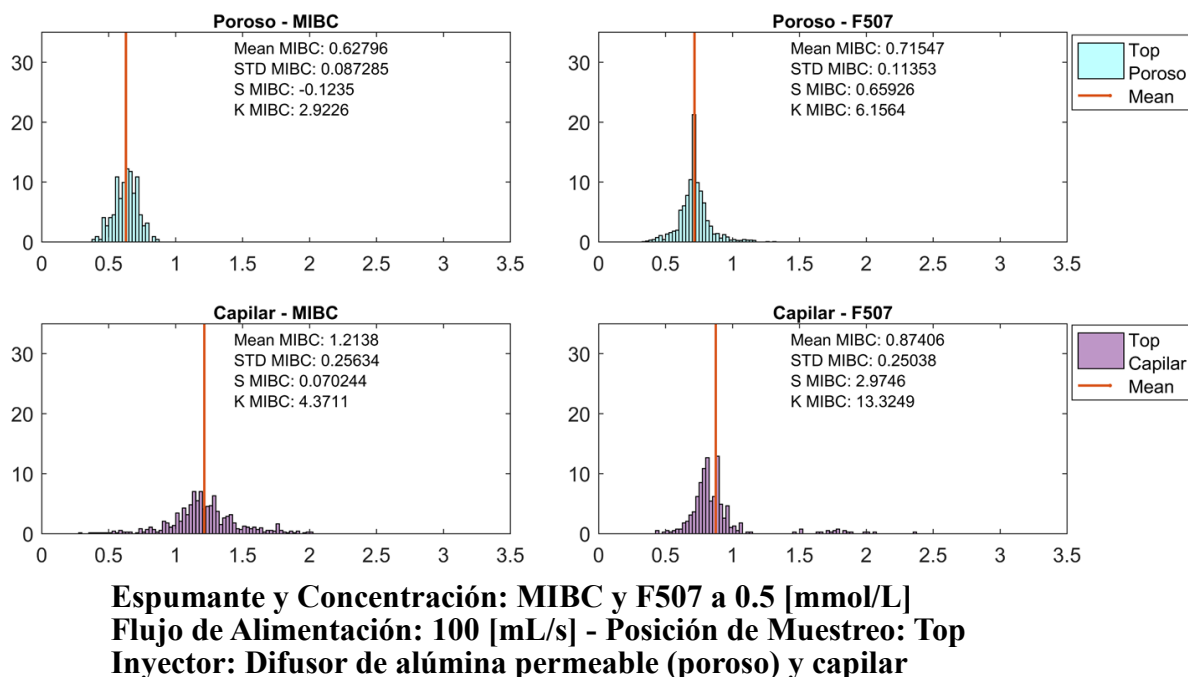


Figura 5.6 Efecto del tipo de espumante e inyector sobre la distribución de tamaño de burbuja para un dispositivo de flujo descendente de laboratorio a similares condiciones de operación.

Finalmente, el análisis de los resultados experimentales obtenidos con el equipo de laboratorio que se diseñó para esta memoria, reveló que el dispositivo de flujo descendente actúa como un clasificador del tamaño de burbujas dependiendo de la distancia al punto de inyección. Los resultados obtenidos para los dos tipos de inyectores utilizados, muestran una distribución inversa en relación al volumen de aire alimentado al interior del equipo. En

particular, el difusor permeable generó que más del 40% del volumen de aire fue estimado en la parte inferior del dispositivo de flujo descendente. Por el contrario, el capilar mostró que el más del 80% del volumen de aire alimentado fue atribuido a la parte superior del equipo. Adicionalmente, se adjuntan los valores de skewness para cada caso, corroborándose que en posiciones superiores del downcomer (*Top*) se reportan tamaños de burbuja mayores y una skewness mayor a cero (lo cual representa un sesgo hacia la derecha), en comparación con las posiciones de muestreo inferiores (*Bottom*), donde se reportan tamaño de burbujas menores y una skewness cercana a cero (distribución normal).

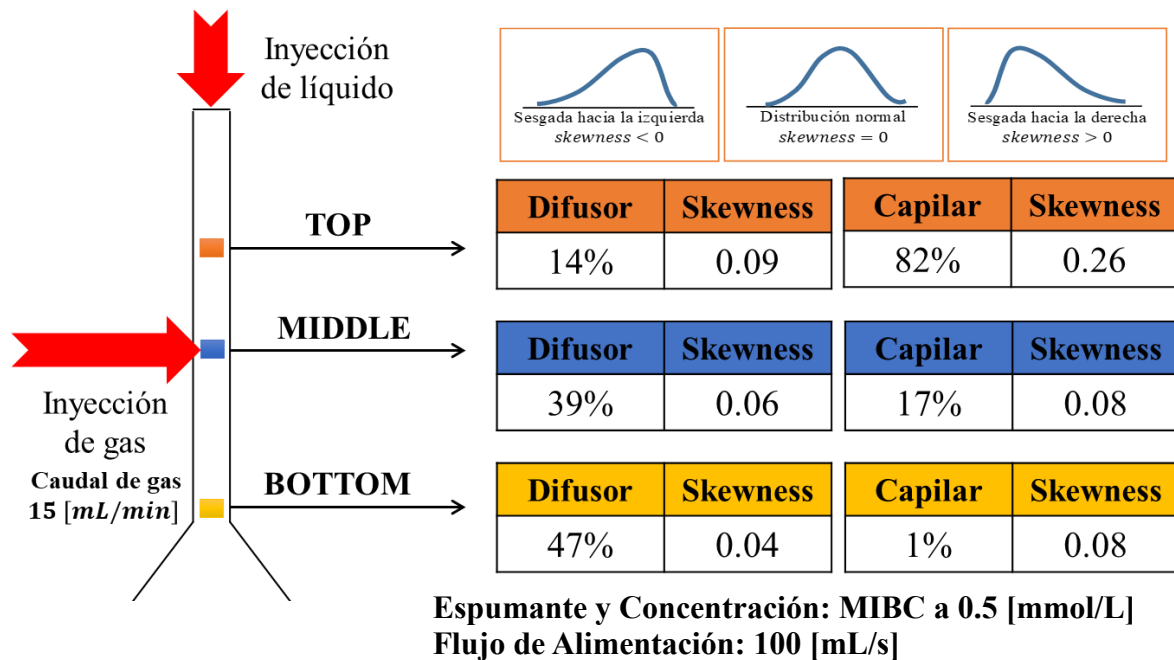


Figura 5.7 Distribución del volumen de aire al interior dispositivo de flujo descendente de laboratorio operando con espumante MIBC y difusor de alúmina permeable (poroso) o capilar.

Hold-up 2D (ϵ_g^{2D} , [%]) y flujo superficial de área de burbuja (S_b , [s^{-1}])

En relación a lo expuesto en la Sección 2.1.2 para el cálculo del hold-up 2D y la Sección 2.1.4 para la determinación del flujo superficial de área de burbuja, se presenta en la Tabla 5.1 un resumen de los resultados obtenidos con el algoritmo Bubble Analysis de Farías-

Mella®. El detalle completo de los valores obtenidos con el algoritmo se exhibe en la Sección 8.16.

Tabla 5.1 Resultados hold-up 2D y S_b para pruebas experimentales donde se utilizó un difusor de alúmina permeable, 0.5 [mmol/L] de MIBC y F507 en un rango de 50 – 100 [mL/s] de flujo de alimentación, respectivamente.

Nombre Test	d_{32}	ε_g^{2D} [%]	S_b [s^{-1}]
'P_MIBC_14mm_0500_100_05U_R1'	0.6516	0.7787	0.2302
'P_F507_14mm_0500_100_05U_R1'	0.7525	5.5660	0.1993
'P_MIBC_14mm_0500_100_00U_R1'	0.7186	2.0239	0.2087
'P_F507_16mm_0500_100_00U_R1'	0.7434	2.5348	0.2018
'P_MIBC_13mm_0500_100_15D_R1'	0.5192	3.5690	0.2889
'P_F507_14mm_0500_100_15D_R1'	0.7485	5.3975	0.2004

Es posible apreciar en la Tabla 5.1 que los valores de hold-up obtenidos se encuentran fuera del rango normal de operación para dispositivos de flujo descendente (generalmente entre 40 y 60%), esto se debe en parte al pequeño caudal de aire con el que se alimentó al dispositivo de laboratorio, sumado al error estereológico que conlleva la estimación del hold-up 2D. Sin embargo, los valores reportados para hold-up 2D utilizando MIBC y F507 se encuentran en concordancia con la investigación de Moyo, 2005 [57], obteniéndose valores mayores de hold-up 2D cuando se utilizó F507 en comparación a MIBC.

De la misma forma, los valores reportados para el flujo superficial de área de burbuja se encuentran alejados de los reportados en celdas de flujo descendente (Rango S_b Celda Jameson entre 50 – 90 [s^{-1}]) debido al valor de $J_g = 0.025$ [cm/s] utilizado en las pruebas experimentales.

5.2 Análisis de Drift Flux

En esta sección se evaluó la aplicación de la rutina iterativa propuesta para la estimación del diámetro de burbuja mediante el análisis de Drift Flux en celdas neumáticas, particularmente para una columna de flotación operando en forma contracorriente y un dispositivo de flujo descendente. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la rutina para cada configuración, respectivamente.

Rutina iterativa aplicada a una columna operando de forma contracorriente

Con el propósito de evaluar la rutina iterativa propuesta se utilizaron los datos experimentales de la investigación de Yianatos *et al.*, 1998 [85] presentados en la Sección 8.17 (i.e., velocidad superficial de gas, velocidad superficial de líquido y hold-up de gas), empleando esta información como input para la rutina iterativa.

En la Figura 5.8 se exhibe una comparación entre el diámetro medido en las pruebas experimentales realizadas en la investigación de Yianatos *et al.*, 1998 [85] y el diámetro de burbuja estimado con la rutina iterativa propuesta en esta memoria (ver Sección 3.2). Se observa que existe una buena correlación entre los valores medidos y los valores estimados usando la rutina iterativa. Notar que la correlación propuesta pasa por el origen con una pendiente muy cercana a uno (0.9985) y un coeficiente de regresión de 0.9282. Esto es indicativo de una aceptable paridad entre las medidas experimentales y los datos calculados. Adicionalmente, es posible apreciar que los datos se encuentran dentro de una variabilidad del $\pm 12\%$, siendo un error aceptable para la estimación del diámetro de burbuja y demostrándose así que la rutina iterativa es aplicable a sistemas de columnas de flotación operando de forma contracorriente.

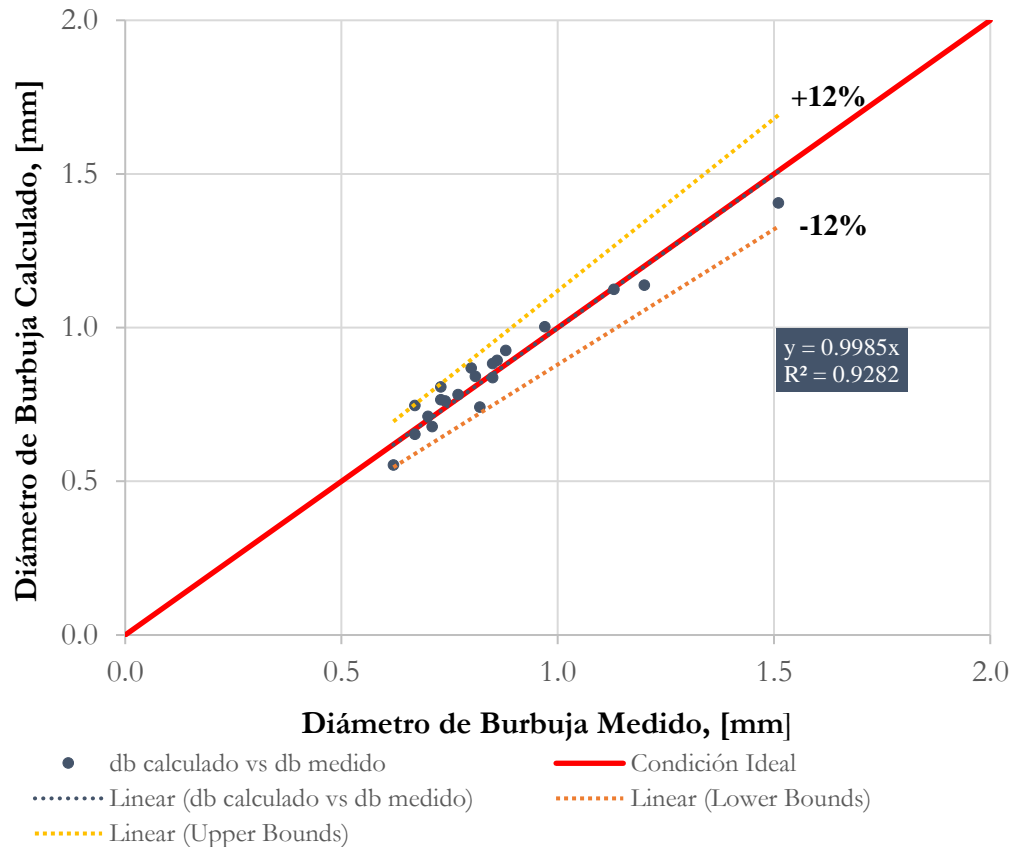


Figura 5.8 Comparación entre el diámetro medido experimentalmente y el diámetro calculado mediante la rutina iterativa propuesta para una columna de flotación contracorriente.

Además, es posible clasificar por tipo de espumante los datos experimentales expuestos en la Figura 5.8, tal como se ilustra en la Figura 5.9. Esta última figura evidencia el efecto del tipo de espumante sobre la estimación del diámetro de burbuja mediante la metodología propuesta. Notar que en los datos correspondientes a los menores valores de diámetro de burbuja se empleó una mayor concentración de espumante en comparación con los valores de diámetro de burbuja más elevados, donde se utilizó una concentración de surfactante menor o ausencia de este. En particular, cuando se utilizaron espumantes del tipo poliglicol (Dowfroth 250C) y alcoxi (Trietoxi Butano o TEB), se obtuvo una subestimación del diámetro de burbuja para los casos de concentración de espumante mínima y máxima. En relación al espumante tipo alcohol alifático (MIBC), para todos los datos experimentales que se utilizaron para el desarrollo y aplicación de la metodología propuesta, se obtuvo una

sobreestimación del diámetro de la burbuja. Es por ello, que se propone incluir el efecto del tipo y concentración del surfactante en las ecuaciones del análisis de Drift Flux, específicamente en la función de coeficiente de roce.

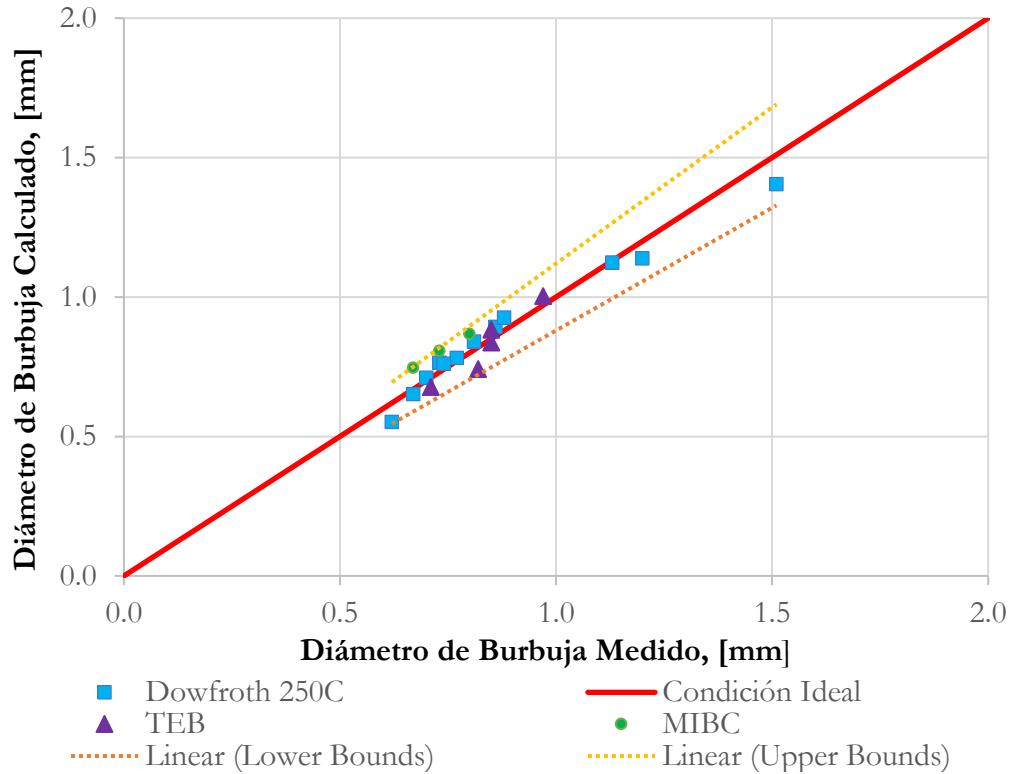


Figura 5.9 Efecto del tipo de espumante sobre la estimación del diámetro de burbuja según la metodología propuesta.

Consecuentemente, este análisis de comparación de datos extraídos de la literatura corrobora la robustez del método propuesto. Por lo tanto, a continuación se utilizará esta metodología para evaluar las características hidrodinámicas del dispositivo de flujo descendente.

Evaluación de la rutina iterativa aplicada a un dispositivo de flujo descendente (i.e., Celda Jameson de laboratorio)

Con el propósito de evaluar la rutina iterativa propuesta se utilizaron los datos experimentales de la investigación de Vicencio (2010) [102] presentados en la Sección 8.18 para una Celda Jameson de laboratorio. En la Figura 5.10 se exhibe una comparación entre el diámetro medido en las pruebas experimentales realizadas en la investigación de Vicencio (2010) [102] y el diámetro de burbuja estimado con la rutina iterativa propuesta en esta memoria. Se puede observar que los datos experimentales no son descritos correctamente por la rutina iterativa, como lo indica la pendiente de la recta que pasa por cero (0.3684) y el coeficiente de correlación R^2 equivalente a -0.18, indicando que no existe correlación entre el diámetro de burbuja medido y el diámetro de burbuja calculado mediante la metodología propuesta.

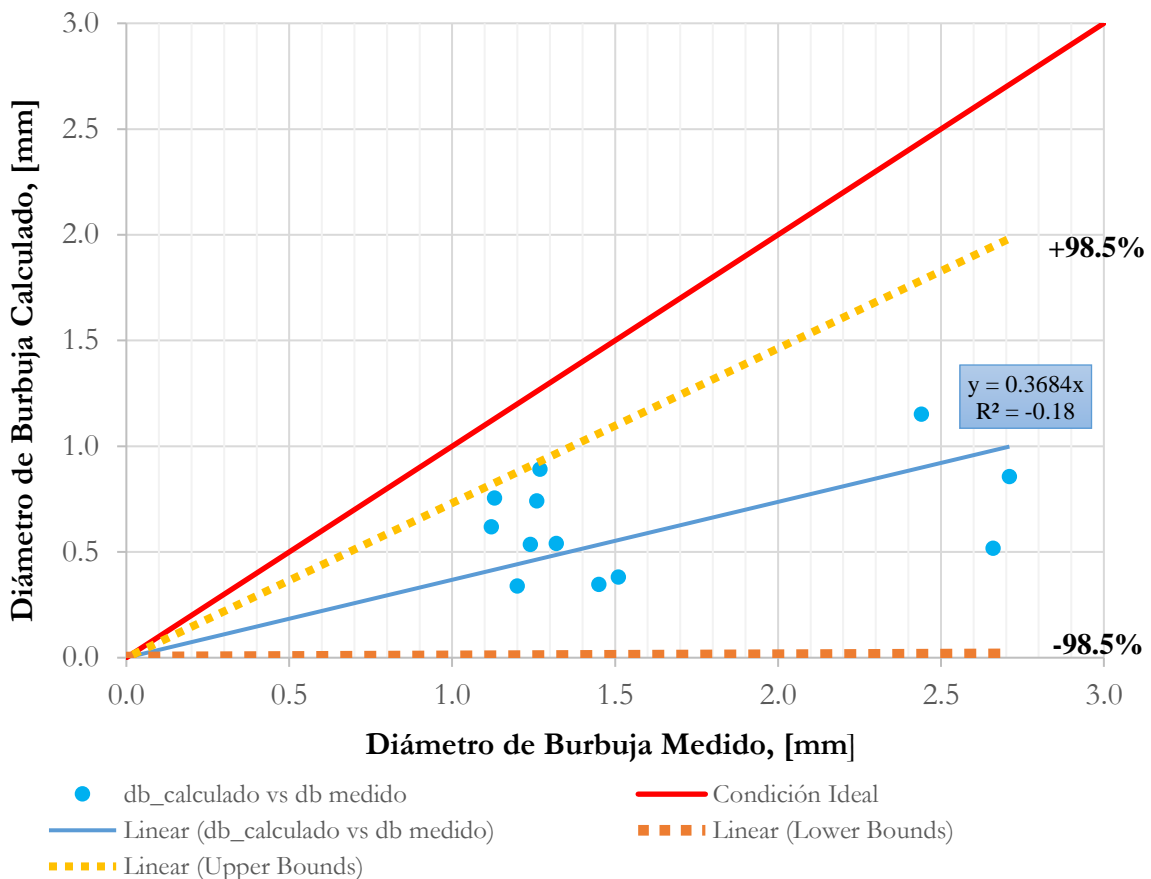


Figura 5.10 Comparación entre el diámetro medido experimentalmente y el diámetro calculado mediante la rutina iterativa propuesta para un dispositivo de flujo descendente.

Además, es posible apreciar que los datos se encuentran dentro de una variabilidad del $\pm 98.5\%$, por lo que la rutina iterativa arroja valores muy lejanos a los diámetros de burbuja medido. Por lo tanto, se recomienda re-evaluar las ecuaciones implicadas en el análisis de Drift Flux para ser aplicadas a dispositivos de flujo descendente, con tal de integrar el efecto hidrodinámico que presenta este tipo de tecnología, en particular incluir el efecto de zona de alta turbulencia generada en el downcomer, además del efecto del tipo y concentración del surfactante en la función para el coeficiente de roce y la exploración de nuevas funciones para el parámetro m .

De esta forma, ya presentados los resultados de esta investigación, damos paso al capítulo de conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

A continuación, se presentan las principales conclusiones extraídas de este trabajo:

Se caracterizó la hidrodinámica del enjambre de burbujas en ductos confinados y se corroboró la hipótesis del presente estudio, debido que el dispositivo de flujo descendente actúa como un clasificador de tamaño de burbujas gracias al ambiente hidrodinámico que proporciona este tipo de tecnología. Esto se debe principalmente, a la existencia de un equilibrio entre las velocidades superficiales de líquido y gas en el downcomer.

Se implementó un dispositivo de laboratorio de flujo descendente equipado con cinematografía de alta velocidad y se desarrolló un algoritmo de procesamiento de imágenes para la obtención del tamaño de burbuja, hold-up 2D y flujo superficial de área de burbuja.

El análisis de los resultados referentes a la distribución de tamaño de burbujas obtenidas para un dispositivo de flujo descendente de laboratorio en función de los aspectos hidrodinámicos del enjambre de burbujas generado en sistemas confinados reveló lo siguiente:

- En posiciones superiores del downcomer se registraron mayores tamaños de burbuja en comparación a las posiciones inferiores.
- Se evaluó la estabilidad y rigidez que le confiere el surfactante a la superficie de la burbuja, donde el espumante del tipo poliglicol le confirió a la burbuja una mayor estabilidad, resistencia a la ruptura en el sistema de flotación, y, en consecuencia, se reportó una menor formación de burbujas más pequeñas.
- Al aumentar el flujo de alimentación de líquido, se indujo a una ruptura mayor de las burbujas de gran tamaño asistida por el fenómeno de coalescencia, Además, al incrementar el flujo de alimentación de líquido se producen distribuciones de tamaño mayores, desplazándose las curvas de distribución de tamaño de burbuja hacia la derecha.

- En referencia al tipo de inyector, el tamaño de burbuja reportado cuando se utilizó el capilar fue mayor al reportado cuando se utilizó el difusor permeable, sin embargo, la población de burbujas pequeñas disminuyó.
- En cuanto a la operación del dispositivo de flujo descendente, no se registró la presencia de burbujas con un tamaño sobre los 3.5 [mm].

Se estableció una metodología para la estimación del diámetro de burbuja empleando el análisis de Drift Flux aplicable a columnas de flotación operando en forma contracorriente y se reportó el efecto del tipo y concentración del espumante sobre la estimación del diámetro de burbuja mediante esta metodología. En particular, cuando se utilizaron espumantes del tipo poliglicol (Dowfroth 250C) y alcoxi (Trietoxi Butano o TEB), se obtuvo una subestimación del diámetro de burbuja para los casos de concentración de espumante mínima y máxima. En relación al espumante tipo alcohol alifático (MIBC), para todos los datos experimentales que se utilizaron para el desarrollo y aplicación de la metodología propuesta, se obtuvo una sobreestimación del diámetro de la burbuja. Es por ello, que se propone incluir el efecto del tipo y concentración del surfactante en las ecuaciones del análisis de Drift Flux, específicamente en la función de coeficiente de roce.

Finalmente, el análisis de los resultados experimentales obtenidos con el equipo de laboratorio que se diseñó para esta memoria, reveló que el dispositivo de flujo descendente actúa como un clasificador del tamaño de burbujas dependiendo de la distancia al punto de inyección. Los resultados obtenidos para los dos tipos de inyectores utilizados, muestran una distribución inversa en relación al volumen de aire alimentado al interior del equipo. En particular, el difusor permeable generó que más del 40% del volumen de aire fue estimado en la parte inferior del dispositivo de flujo descendente. Por el contrario, el capilar mostró que el más del 80% del volumen de aire alimentado fue atribuido a la parte superior del equipo.

Habiendo extraído las principales conclusiones de este trabajo de titulación, a continuación, se listan las actividades que se recomiendan llevar a cabo con el propósito de avanzar aspectos no cubiertos en esta investigación.

6.2 Recomendaciones

Para trabajos futuros se recomienda realizar una caracterización del comportamiento hidrodinámico en celdas de flujo descendente piloto y de escala industrial para contrastar los datos expuestos en el presente documento, además de explorar otros rangos de velocidad superficial de gas, velocidad superficial de líquido y hold-up de gas en la operación de estos equipos.

Se recomienda evaluar la aplicación del algoritmo Bubble Analysis de Farías-Mella® y la obtención de la distribución de tamaño de burbuja empleando una sola fotografía que sea representativa a la muestra en su totalidad, reemplazando de esta forma el muestreo aleatorio que se aplica actualmente en el algoritmo. Para hallar la fotografía que es representativa de la muestra, se debe comparar todas las fotografías que componen la muestra con una imagen que representa el promedio de las intensidades de cada pixel para la totalidad de la muestra. Luego, la fotografía más cercana a la imagen construida por el promedio de las intensidades será elegida como la fotografía representativa de la muestra, a la cual se le aplicará el algoritmo de procesamiento de imágenes para la detección de objetos (i.e., en este caso burbujas) y la estimación de la distribución de tamaño de burbuja.

Se recomienda evaluar la aplicación del algoritmo Drift Flux Routine de Mella® en dispositivos de flujo descendente, integrando en las ecuaciones del análisis de Drift Flux el efecto hidrodinámico que presenta este tipo de tecnología, el efecto del tipo y concentración del surfactante sobre el coeficiente de roce y la exploración de nuevas funciones para el parámetro m .

Como resultado del análisis de los parámetros hidrodinámicos obtenidos para el dispositivo de flujo descendente, se recomendó la introducción de un nuevo sistema de flotación llamado “sleeve”, el cual consistiría en un downcomer con un difusor adosado a la parte inferior, que gracias al control de los flujos de alimentación de líquido y gas podría diseñar distribuciones de tamaño de burbujas específicas para una aplicación dada.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Pryor, *Mineral Processing*, Third Edition, Elsevier Applied Science Publishers, 1965, pp. 1 -13.
- [2] D. Subba Rao, *Mineral Beneficiation - A Concise Basic Course*, 2011, pp. 99 - 107.
- [3] B. Wills y J. Finch, *Wills' Mineral Processing Technology*, Eighth Edition: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Butterworth-Heinemann, 2015.
- [4] S. Ata, «Phenomena in the froth phase of flotation — A review,» *International Journal of Mineral Processing*, Vols. %1 de %2102 - 103, pp. 1 - 12, 2012.
- [5] D. Subba Rao y T. Gouricharan, *Coal Processing and Utilization*, First Edition, CRC Press, 2016.
- [6] R. Araya, C. Gomez, J. Finch, L. Huynh y M. Young, «Characterization of frother effects on gas dispersion in a Jameson cell,» de *XXVII International Mineral Processing Congress IMPC*, 2014.
- [7] G. Harbort y D. Clarke, «Fluctuations in the popularity and usage of flotation columns – An overview,» *Minerals Engineering*, vol. 100, pp. 17 - 30, 2017.
- [8] M. Ishii y T. Hibiki, *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*, Springer US, 2006.
- [9] J. Finch y G. Dobby, *Column Flotation*, 1990.
- [10] J. Yianatos y L. Vinnett, *Flotación de Minerales - Fundamentos, Tecnología y Aplicación*, 2015.

- [11] S. Schwarz y D. Alexander, «Gas dispersion measurements in industrial flotation cells,» *Minerals Engineering*, pp. 554 - 560, 2005.
- [12] L. Vinnett, J. Yianatos y M. Álvarez, «Gas dispersion measurements in mechanical flotation cells: Industrial experience in Chilean concentrators,» *Minerals Engineering*, pp. 12 - 15, 2013.
- [13] G. Evans, B. Atkinson y G. Jameson, «The Jameson Cell,» de *Flotation Science and Engineering*, K. Matis., Marcel Dekker, 1995, pp. 331-363.
- [14] O. Şahbaz, A. Uçar y B. Öteyaka, «Effect of APR on Flotation in the Jameson Cell and Determining the Contact Angle,» de *XIII International Mineral Processing Symposium*, Bodrum, Turkey, 2012.
- [15] B. Gorain, J. Franzidis y E. Manlapig, «Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 1: Effect on bubble size distribution,» *Minerals Engineering*, vol. 8, n° 6, pp. 615-635, 1995.
- [16] J. Yianatos, «Column Flotation: Modelling and Technology,» de *International Colloquium: Developments in Froth Flotation, Volume II*, Cape Town, 1989.
- [17] Glencore Technology, «Jameson Cell - Rising to the Challenge,» 2015. [En línea]. Available: http://www.jamesoncell.com/EN/Downloads/Documents/brochure_en.pdf. [Último acceso: 12 09 2017].
- [18] B. Atkinson, «Hydrodynamic characteristics of a plunging jet reactor,» Ph.D. thesis, University of Newcastle, Australia, 1994.
- [19] P. Quijanes, «Instrumentación, monitoreo y control de una celda Jameson L-150,» Tesis de Magíster, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2015.
- [20] M. Maldonado, A. Pinto, L. Magne, C. Gomez y J. Finch, «Gas holdup estimation using Maxwell equation in flotation systems: Revisited,» *Minerals Engineering*, vol. 98, pp. 9-13, 2016.

- [21] J. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Volume I, Oxford: Clarendon Press, 1873.
- [22] J. Nasset, J. Hernandez-Aguilar, C. Acuña, C. Gomez y J. Finch, «Some gas dispersion characteristics of mechanical flotation machines,» *Minerals Engineering*, vol. 19, pp. 807-815, 2006.
- [23] A. Power, J. Franzidis y E. Manlapig, «The characterisation of hydrodynamic conditions in industrial flotation cells,» de *7th Mill Operators Conference (MOC)*, Kalgoorlie, WA, 2000.
- [24] C. Acuña y J. Finch, «Tracking velocity of multiple bubbles in a swarm,» *International Journal of Mineral Processing*, vol. 94, pp. 147-158, 2010.
- [25] E. Weibel, *Stereological Methods. Volume I: Practical Methods for Biological Morphometry*, London: Academic Press, 1979.
- [26] «Outotec,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.outotec.com/globalassets/newsletters/output/2012-1/tankcell-e500.pdf>. [Último acceso: 27 09 2017].
- [27] J. Finch, J. Xiao, C. Hardie y C. Gomez, «Gas dispersion properties: Bubble surface area flux and gas holdup,» *Minerals Engineering*, vol. 13, n° 4, pp. 365-372, 2000.
- [28] J. Leiva, L. Vinnett, F. Contreras y J. Yianatos, «Estimation of the actual bubble surface area flux in flotation,» *Minerals Engineering*, vol. 23, pp. 888 - 894, 2010.
- [29] Z. Wei, J. Nasset y J. Finch, «Correspondence of bubble size and frother partitioning in flotation,» *Journal of Central South University*, p. 2383–2390, 2014.
- [30] B. Gorain, J. Franzidis y E. Manlapig, «Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 4: Effect of bubble surface area flux on flotation performance,» *Minerals Engineering*, vol. 10, n° 4, pp. 367-379, 1997.
- [31] G. Jameson, S. Nam y M. Young, «Physical factors affecting recovery rates in flotation,» *Minerals Science and Engineering*, vol. 9, n° 3, pp. 103-108, 1977.

- [32] R. Araya, L. Huynh, M. Young y K. Arbuero, «Solving challenges in copper cleaning circuits with the Jameson Cell,» de *Procemin*, Santiago, 2013.
- [33] C. Acuña, P. Ramirez y M. Vera, «Development and evaluation of a new bubble generating device based on impinging jetting for columns flotation,» de *28th International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Québec, 2016.
- [34] A. Gupta y D. Yan, *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*, Elsevier Science, 2006.
- [35] C. Zhao, J. Chen, B. Wu y X. Long, «Density functional theory study on natural hydrophobicity of sulfide surfaces,» *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, n° 2, pp. 491-498, 2014.
- [36] A. López y J. Reyes, «Flotación de calcopirita, pirita y molibdenita en minerales de cobre tipo pórfido,» de *X Simposio sobre Procesamiento de Minerales*, Chillán, 2005.
- [37] R. Smart, A. Gerson, B. Hart, D. Beattie y C. Young, «Innovations in measurement of mineral structure and surface chemistry in flotation: past, present, and future-Mineral Processing and Extractive Metallurgy. Surface Science Western,» [En línea]. Available: http://www.surfacesciencwestern.com/wp-content/uploads/smesp14_hart.pdf. [Último acceso: 16 09 2017].
- [38] S. Bulatovic, *Handbook of Flotation Reagents - Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores*, Elsevier Science & Technology Books, 2007.
- [39] M. Fuerstenau, G. Jameson y R. Yoon, *Froth Flotation: A Century of Innovation*, Littleton: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2007.
- [40] Y. Orozco, «Estudio del efecto del tipo y concentración de espumante en la selectividad del proceso de flotación a escala laboratorio,» Universidad de Chile, Santiago, 2012.

- [41] A. Vidyadhar y K. Hanumantha Rao, «Adsorption mechanism of mixed cationic/anionic collectors in feldspar-quartz flotation system,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 306, pp. 195-204, 2007.
- [42] E. Urra, «Adición de un nuevo colector en el banco de flotación primaria – cuantificación contextual del mejoramiento potencial en el desempeño de la flotación en las concentradoras “laguna seca” y “los colorados”,» Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2016.
- [43] B. Somasundaran y B. Moudgil, *Reagents in Mineral Technology*, New York: CRC Press, 1987.
- [44] S. Ramachandra, *Surface Chemistry of Froth Flotation, Volume I: Fundamentals*, New York: Springer Science+Business Media, LLC , 2004.
- [45] K. Dill y S. Bromberg, *Molecular Driving Forces: Statistical Thermodynamics in Biology Chemistry, Physics, and Nanoscience*, II Edition, New York: Garland Science, Taylor & Francis Group, LLC, 2011.
- [46] A. Vilinska, A. Fredriksson, G. Adolfsson y K. Hanumantha, «Frothing phenomena in phosphate gangue flotation from magnetite fines with fatty acid based collector and MIBC frother,» *The Open Mineral Processing Journal*, vol. 6, pp. 1-12 , 2013.
- [47] C. Acuña, «Measurement techniques to characterize bubble motion in swarms,» McGill University, Montreal, 2007.
- [48] N. Vargaftik, B. Volkov y L. Voljak, «International tables of surface tension of water,» *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 12, n° 3, pp. 817-820, 1983.
- [49] F. Melo y J. Laskowski, «Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation,» *Minerals Engineering*, vol. 19, n° 6-8, pp. 766-773, 2006.

- [50] B. Comley, P. Harris, D. Bradshaw y M. Harris, «Frother characterisation using dynamic surface tension measurements,» *International Journal of Mineral Processing*, vol. 64, nº 2-3, pp. 81-100, 2002.
- [51] J. Finch, J. Nisset y C. Acuña, «Role of frother on bubble production and behaviour in flotation,» *Minerals Engineering*, vol. 21, pp. 949-957, 2008.
- [52] H. Khoshdast y A. Sam, «Flotation Frothers: Review of Their Classifications, Properties and Preparation,» *The Open Mineral Processing Journal*, vol. 4, pp. 25-44, 2011.
- [53] E. Manev y R. Pugh, «Frother/collector interactions in thin froth films and flotation,» *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 70, pp. 289-295, 1993.
- [54] J. Laskowski, «Frothers and Flotation Froth,» *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 12, pp. 61-89, 1992.
- [55] J. Leja, *Surface Chemistry of Froth Flotation*, New York: Plenum Press, 1982.
- [56] Y. Tan y J. Finch, «Frother structure-property relationship: Aliphatic alcohols and bubble rise velocity,» *Minerals Engineering*, Vols. %1 de %296-97, pp. 33-38, 2016.
- [57] P. Moyo, «Characterization of frothers by water carrying rate,» McGill University, Montreal, 2005.
- [58] F. Azgomi, C. Gómez y J. Finch, «Characterizing Frothers using Gas Hold-Up,» *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 46, nº 3, pp. 237-242, 2007.
- [59] Y. Cho y J. Laskowski, «Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability,» *International Journal of Mineral Processing*, vol. 64, pp. 69-80, 2002.
- [60] J. Nisset, J. Finch y C. Gomez, «Operating variables affecting the bubble size in forced-air mechanical flotation machines,» de *9th Mill Operators' Conference, AusIMM*, Fremantle, 2007.

- [61] W. Zhang, J. Nasset y J. Finch, «Effect of some operational variables on bubble size in a pilot-scale mechanical flotation machine,» *Journal of Central South University of Technology*, vol. 21, pp. 1077-1084, 2014.
- [62] W. Kracht y J. Finch, «Using sound to study bubble coalescence,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 332, pp. 237-245, 2009.
- [63] B. Gorain, J. Franzidis y E. Manlapig, «Flotation Cell Design: Application of Fundamental Principles,» *Academic Press*, pp. 1502-1512, 2000.
- [64] Y. Shah, B. Kelkar, S. Godbole and W. Deckwer, "Design parameters estimations for bubble column reactors," *AIChE Journal*, vol. 28, no. 3, p. 353–379, 1982.
- [65] «Mining Mill Operator Training,» 16 10 2017. [En línea]. Available: <https://millops.community.uaf.edu/files/2016/10/145-5-34-OutotecTankCell.png>.
- [66] R. Imhof, «Pneumatic flotation – A modern alternative,» *Aufbereitungs Technik*, vol. 29, n° 8, pp. 451-458, 1988.
- [67] R. Núñez, «Diagnóstico y análisis estratégico del negocio equipos de flotación,» Universidad de Chile, Santiago, 2014.
- [68] «Metso,» [En línea]. Available: <http://www.metso.com/es/productos/separacion/columnas-de-flotacion-de-alta-recuperacion-microcel/>. [Último acceso: 28 09 2018].
- [69] «Eriez Flotation,» [En línea]. Available: <https://www.eriezflotation.com/flotation/column-flotation/>. [Último acceso: 28 09 2018].
- [70] S. Lu, R. Pugh y E. Forsberg, *Interfacial Separation of Particles, Volume 5, Países Bajos: Elsevier Science*, 2005.
- [71] «Jameson Cell - Rising to the challenge: Operating Principles,» [En línea]. Available: <http://www.jamesoncell.com/EN/OperatingPrinciples/Pages/OperatingPrinciples.aspx>. [Último acceso: 24 09 2017].

- [72] «Jameson Cell - Rising to the challenge: Applications,» [En línea]. Available: <http://www.jamesoncell.com/EN/Applications/Pages/Applications.aspx>. [Último acceso: 24 09 2017].
- [73] «Maelgwyn Mineral Services Limited (MMS),» [En línea]. Available: <http://www.maelgwyn.com/technology/pneumatic-flotation-imhoflot/>. [Último acceso: 24 09 2017].
- [74] S. Sánchez-Pino, R. Imhof, S. Sánchez-Baquedano y F. Rojos-Tapia, «Pneumatic flotation technology – Experience in the chilean mining industry,» de *Copper 2003*, Montreal, 2003.
- [75] Maelgwyn Mineral Services Limited, «Imhoflot Pneumatic Flotation Brochure,» Micrographics, Cardiff Bay, 2006.
- [76] M. Battersby, R. Battersby, S. Flatman, R. Imhof, H. Sprenger y T. Bragado, «Recovery Of Ultra-Fines using Imhoflot Pneumatic Flotation- Two Pilot Case Studies recovering Nickel and Zinc from Tailings Streams,» de *MEI Flotation 12 Conference*, Cape Town, 2011.
- [77] M. Battersby, M. Fletcher, R. Imhof, A. Singh y F. Puder, «The advantages of the Imhoflot G-cell pneumatic flotation process with centrifugal froth removal – two case studies,» de *Randol Innovations in Metallurgy Conference*, Perth, 2005.
- [78] R. Imhof, M. Fletcher, A. Vathavooran y A. Singh, «Application of IMHOFLOT G-Cell centrifugal flotation technology,» de *SAIMM Flotation Cell Technology Conference*, Johannesburg, 2007.
- [79] G. Jameson, «Intensive Cells: Design,» de *II Fotation*, Academic Press, 2000, pp. 1541-1548.
- [80] M. C. & M. T. GMBH, «Pneufлот® Flotation Technology,» 2011. [En línea]. Available: http://www.mbe-cmt.com/fileadmin/user_upload/Download_Produktflyer/mbe_pneufлот_e_RZ_120305.pdf. [Último acceso: 25 09 2017].

- [81] «MBE Coal & Minerals technology GMBH,» [En línea]. Available: <http://www.mbe-cmt.com/index.php?id=49>. [Último acceso: 25 09 2017].
- [82] W. Jaspers, L. Markworth y O. Handy, «Advances in flotation technology – The way to make the sorting process flexible for future applications,» de *Minerals Engineering Conferences on Flotation'07*, Cape Town, 2007.
- [83] G. Wallis, *One Dimensional Two-Phase Flow*, New York: McGrawHill, 1969.
- [84] M. Xu y J. Finch, «Simplification of bubble size estimation in a bubble swarm,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 140, n° 1, pp. 298-299, 1990.
- [85] J. Yianatos, J. Finch, G. Dobby y M. Xu, «Bubble size estimation in a bubble swarm,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 126, n° 1, pp. 37-44, 1988.
- [86] L. Schiller y A. Neumann, «Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwekraftaubereitung,» *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, vol. 77, n° 12, pp. 318-320, 1933.
- [87] J. Masliyah, «Hindered settling in a multi-species particle system,» *Chemical Engineering Science*, vol. 34, n° 9, pp. 1166-1168, 1979.
- [88] L. Lapidus y J. Elgin, «Mechanics of vertical-moving fluidized systems,» *American Institute of Chemical Engineers*, vol. 3, n° 1, pp. 63-68, 1957.
- [89] Y. Shah, B. Kelkar, S. Godbole y W. Deckwer, «Design parameters estimations for bubble column reactors,» *American Institute of Chemical Engineers*, vol. 28, n° 3, pp. 353-379, 1982.
- [90] J. Richardson y W. Zaki, «Transactions of the Institution of Chemical Engineers,» vol. 32, n° 35, 1954.
- [91] R. Perry y D. Green, *Perry's Chemical Engineering Handbook*, New York: McGraw-Hill, 1984.

- [92] S. Banisi y J. Finch, «Technical Note: Reconciliation of bubble size estimation methods using drift flux analysis,» *Minerals Engineering*, vol. 7, n° 12, pp. 1555-1559, 1994.
- [93] Fastec Imaging Corporation, «TroubleShooter, TroubleShooter RS and Ranger High-Speed Cameras - Operator's Manual,» 2005.
- [94] C. Acuña, L. Vinnet y S. How Kuan, «Improving image analysis of online bubble size measurements with enhanced algorithms,» de *12th International Mineral Processing Conference - Procemin*, Santiago, 2016.
- [95] Mathworks, «Skewness,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/stats/skewness.html>. [Último acceso: 31 12 2017].
- [96] Mathworks, «Kurtosis,» [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/help/stats/kurtosis.html>. [Último acceso: 31 12 2017].
- [97] «Janzengroup,» [En línea]. Available: <http://www.janzengroup.net/stats/lessons/descriptive.html>. [Último acceso: 04 01 2018].
- [98] M. Polli, M. Di Stanislao, R. Bagatin, E. Abu Bakr y M. Masic, «Bubble size distribution in the sparger region of bubble columns,» *Chemical Engineering Science*, vol. 57, n° 1, pp. 197-205, 2002.
- [99] K. Tse, T. Martin, C. McFarlane y A. Nienow, «Small bubble formation via a coalescence dependent break-up mechanism,» *Chemical Engineering Science*, vol. 58, n° 2, pp. 275-286, 2003.
- [100] R. Clift, J. Grace y M. Weber, *Bubbles, Drops, and Particles*, New York: Dover Publications Inc, 2005.
- [101] S. Dukhin, R. Miller y G. Loglio, «Physico-chemical hydrodynamics of rising bubbles,» de *Drops and Bubbles in Interfacial Research*, Elsevier Science, 1998.
- [102] L. Vicencio, «Puesta en operación y caracterización hidrodinámica de celda jameson,» Universidad Católica del Norte, Antofagasta, 2010.

- [103] FLSmidth, «Flotation Technology,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.flsmidth.com/~//media/PDF%20Files/Liquid-Solid%20Separation/Flotation/Wemco11brochure.ashx>.
- [104] P. Diaz-Penafiel y G. Dobby, «Kinetic studies in flotation columns: bubble size effect,» *Minerals Engineering*, vol. 7, n° 4, pp. 465-478, 1994.
- [105] J. Yianatos, «Fluid Flow and Kinetic Modelling in Flotation Related Processes: Columns and Mechanically Agitated Cells—A Review,» *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 85, n° 12, pp. 1591-1603, 2007.
- [106] E. Britannica, «Encyclopædia Britannica,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/surfactant>. [Último acceso: 13 09 2017].
- [107] «ChemicalSafetyFacts.org,» [En línea]. Available: <https://www.chemicalsafetyfacts.org/surfactants/>. [Último acceso: 13 09 2017].
- [108] M. Hirsch, «Prospector®,» [En línea]. Available: <https://knowledge.ulprospector.com/3106/pc-surface-active-agents-surfactants/>. [Último acceso: 13 09 2017].
- [109] «MIT News,» [En línea]. Available: <http://news.mit.edu/2013/hydrophobic-and-hydrophilic-explained-0716>. [Último acceso: 14 09 2017].
- [110] G. Dobby y J. Finch, «Particle Collection in Columns—Gas Rate and Bubble Size Effects,» *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 25, n° 1, pp. 9-13, 1986.
- [111] J. Nessel y J. Finch, «Correcting bubble size measurement for frother concentration in the McGill bubble size analyzer,» de *Materials Science & Technology 2013: Water and Energy in Mineral Processing*, Montreal, 2013.
- [112] G. Dobby, J. Yianatos y J. Finch, «Estimation of bubble diameter in flotation columns from drift flux analysis,» *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 27, n° 2, pp. 85-90, 1988.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

8.1 Análisis de sensibilidad unidimensional para el flujo volumétrico de líquido $Q_l [m^3/s]$

Nomenclatura	Descripción	Unidad	Valor
Q_l	Flujo volumétrico de líquido	[m ³ /s]	0.00032
$d_{downcomer}$	Diámetro downcomer	[m]	0.025
A_d	Área de la sección transversal del downcomer	[m ²]	0.000490874
P_o	Presión en espacio de la cabeza	[Pa]	-20000
ρ_l	Densidad del líquido	[kg/m ³]	1000
L	Distancia entre los sensores de presión P2 y P3	[m]	0.65
g	Aceleración de gravedad	[m/s ²]	9.8
L_d	Largo del downcomer	[m]	2.62
C_1	Constante adimensional	[-]	2360000
σ_l	Tensión superficial del líquido	[kg/s ²]	0.07275
v_j	Velocidad media del jet	[m/s]	160.1828188
Q_g	Flujo volumétrico de gas	[m ³ /s]	0.00028
C_2	Constante empírica adimensional	[-]	0.37
J_l	Velocidad superficial de líquido, downcomer	[m/s]	0.656108826
J_g	Velocidad superficial de gas, downcomer	[m/s]	0.567016011
z_1	Altura vertical, sobre la cota de referencia para punto de muestreo 1	[m]	$z_1=z_2$
d_{TK}	Diámetro tanque de separación	[m]	0.15
A_2	Área de la sección transversal del tanque de separación	[m ²]	0.017671459
z_2	Altura vertical, sobre la cota de referencia para punto de muestreo 2	[m]	$z_1=z_2$
P_{atm}	Presión atmosférica	[Pa]	101325
h_3	Altura de la columna de agua en el punto de muestreo 3	[m]	0.4
h_i	Altura de inmersión del downcomer	[m]	0.88
P_1	Presión en la descarga final del downcomer	[Pa]	109949
d_{tobera}	Diámetro tobera	[m]	0.0016
A_{tobera}	Área tobera	[m ²]	2.01062E-06

0.74	Qg (l/min)	1.24	3.72	6.68	9.64	12.6	15.56	18.52	21.48	24.44	27.4	30.36	33.32	36.28
0.5	Ql (l/min)	6.20	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00	30.00
	APR	0.20	0.47	0.67	0.80	0.90	0.97	1.03	1.07	1.11	1.14	1.17	1.19	1.21

Análisis sensibilidad unidimensional: rango de Ql y efecto en hold-up downcomer														
		Ql (l/min)												
Eg downcomer	-0.0411401	6.2	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Qg (L/min)	16.7	-393.03	-348.32	-302.69	-252.19	-194.37	-128.42	-54.02	28.98	120.62	220.95	329.99	447.75	574.23

Análisis sensibilidad unidimensional: rango de Ql y efecto en hold-up TK														
		Ql (l/min)												
Eg TK	22.777499	6.2	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Qg (L/min)	16.7	25.81	25.58	25.25	24.85	24.38	23.84	23.22	22.54	21.78	20.95	20.04	19.07	18.02

8.2 Relación entre la concentración de gas, velocidad superficial de gas y tamaño de burbuja

A continuación, se presenta los datos utilizados para la construcción de la Figura 2.11.

		Jg										
		0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.4
Eg	4	1.3636	1.9091	2.4545	3.0000	3.5455	4.0909	4.6364	5.1818	5.7273	6.2727	6.5455
	5	1.0909	1.5273	1.9636	2.4000	2.8364	3.2727	3.7091	4.1455	4.5818	5.0182	5.2364
	6	0.9091	1.2727	1.6364	2.0000	2.3636	2.7273	3.0909	3.4545	3.8182	4.1818	4.3636
	7	0.7792	1.0909	1.4026	1.7143	2.0260	2.3377	2.6494	2.9610	3.2727	3.5844	3.7403
	8	0.6818	0.9545	1.2273	1.5000	1.7727	2.0455	2.3182	2.5909	2.8636	3.1364	3.2727
	9	0.6061	0.8485	1.0909	1.3333	1.5758	1.8182	2.0606	2.3030	2.5455	2.7879	2.9091
	10	0.5455	0.7636	0.9818	1.2000	1.4182	1.6364	1.8545	2.0727	2.2909	2.5091	2.6182
	11	0.4959	0.6942	0.8926	1.0909	1.2893	1.4876	1.6860	1.8843	2.0826	2.2810	2.3802
	12	0.4545	0.6364	0.8182	1.0000	1.1818	1.3636	1.5455	1.7273	1.9091	2.0909	2.1818
	13	0.4196	0.5874	0.7552	0.9231	1.0909	1.2587	1.4266	1.5944	1.7622	1.9301	2.0140
	14	0.3896	0.5455	0.7013	0.8571	1.0130	1.1688	1.3247	1.4805	1.6364	1.7922	1.8701
	15	0.3636	0.5091	0.6545	0.8000	0.9455	1.0909	1.2364	1.3818	1.5273	1.6727	1.7455
	16	0.3409	0.4773	0.6136	0.7500	0.8864	1.0227	1.1591	1.2955	1.4318	1.5682	1.6364
	17	0.3209	0.4492	0.5775	0.7059	0.8342	0.9626	1.0909	1.2193	1.3476	1.4759	1.5401
	18	0.3030	0.4242	0.5455	0.6667	0.7879	0.9091	1.0303	1.1515	1.2727	1.3939	1.4545
	19	0.2871	0.4019	0.5167	0.6316	0.7464	0.8612	0.9761	1.0909	1.2057	1.3206	1.3780
	20	0.2727	0.3818	0.4909	0.6000	0.7091	0.8182	0.9273	1.0364	1.1455	1.2545	1.3091
	21	0.2597	0.3636	0.4675	0.5714	0.6753	0.7792	0.8831	0.9870	1.0909	1.1948	1.2468



Diámetro de Burbuja

8.3 Datos experimentales del efecto del tipo y concentración del espumante sobre la tensión superficial

Datos obtenidos de Vilinska *et al.*, 2013 [46], Acuña, 2007 [47] y Vargaftik *et al.*, 1983 [48].

Agua (20°C, 1 atm)	0	72.75
MIBC	0	72.01970443
Polyglycol	0.01	72
Polyglycol	0.04	63
N-Pentanol	0.2	54
MIBC	0.41	71.58
MIBC	0.98	70.54
MIBC	1.92	68.33
MIBC	2.94	66.85
MIBC	4.91	64.19
N-Pentanol	6	45
Polyglycol	6	54
MIBC	7.32	61.97
MIBC	9.82	57.98
MIBC	12.19	55.02
MIBC	14.68	53.84
MIBC	19.59	50.30
MIBC	24.46	49.56
MIBC	29.36	48.37

8.4 Efecto de la dosificación de espumante en la curva hold-up y velocidad superficial de gas.

Datos extraídos de Finch *et al.*, 1990 [9].

Line #1	0 ppm	Line #2	5 ppm	Line #3	10 ppm	Line #4	15 ppm
0.15	0.51	0.14	1.12	0.14	1.32	0.13	1.53
0.29	1.22	0.28	2.14	0.28	2.24	0.28	3.05
0.67	2.95	0.65	4.38	0.65	5.19	0.66	6.52
1.09	4.99	1.08	6.52	1.07	8.15	1.06	10.79
1.46	6.82	1.46	8.66	1.45	11.00	1.44	13.95
1.80	8.96	1.80	11.30	1.80	13.65	1.78	17.92
2.12	10.90	2.12	12.93	2.11	15.68	2.12	19.96
2.48	13.03	2.49	14.97	2.48	18.64	2.45	23.01
2.75	14.87	2.74	17.52	2.74	21.49	2.73	26.48
3.08	17.11	3.06	19.55	3.06	25.56	3.06	30.14
3.46	18.94	3.44	21.89	3.47	27.49	3.45	33.50
3.80	20.98	3.78	24.95	3.78	30.55	3.77	34.01
4.17	22.61	4.14	27.60	4.11	31.98		
4.44	23.73	4.43	30.14	4.44	34.73		

8.5 Procedimiento gráfico para la estimación de la CCC

Data experimental utilizada en el procedimiento gráfico para la estimación de la CCC propuesto por Cho y Laskowski (2002) [59], extraída de Wills *et al.*, 2015 [3].

Concentración de Espumante [ppm]	Diámetro Sauter [mm]
0	3.66972
2.32081	2.04488
4.83156	1.36063
7.48324	1.06651
9.91218	0.909674
14.9131	0.848511
24.9861	0.88685

8.6 Efecto de la dosificación y naturaleza química del espumante sobre el diámetro de burbuja

Data experimental extraída de Finch *et al.*, 2008 [51] y Zhang *et al.*, 2014 [61].

PENTANOL		MIBC		F150		DF250	
Line #1		Line #2		Line #4		Line #3	
0.00	4.34	0.01	3.72	0.00	3.70	0.00	3.70
2.37	3.29	2.43	2.36	2.29	1.31	2.61	2.07
4.79	2.90	4.84	1.55	4.93	0.97	4.99	1.35
7.34	2.50	7.43	1.05	7.35	1.12	7.60	1.11
9.81	2.21	9.88	0.94	9.78	0.97	9.94	0.92
14.82	1.43	14.87	0.88	14.84	1.06	15.11	0.90
24.85	0.92	24.93	0.86	25.02	0.82	25.00	1.00
39.80	0.77						

Table 1 Frother families and range of surfactants (n , m and HLB) used in this work

Frother family	Chemical structure	n	m	HLB
Aliphatic alcohols	$\overbrace{C_n H_{2n+1}}^{\text{alkyl group}} \underbrace{OH}_{\text{hydroxyl group}}$	3–8	—	5–7.5
Polypropylene glycols (PPG)	$\overbrace{H(OC_3H_6)_m}^{\text{Propylene oxide group}} \underbrace{OH}_{\text{hydroxyl group}}$	0	3–17	7.4–9.3
Polypropylene glycol alkyl ethers (PPGAE)	$\overbrace{C_n H_{2n+1}}^{\text{alkyl group}} \overbrace{(OC_3H_6)_m}^{\text{Propylene oxide group}} \underbrace{OH}_{\text{hydroxyl group}}$	1, 3, 4	1–7	6.5–8.3

Table 2 Commercial frothers used in this work

Frother Family	Commercial frother type	Supplier	n	m	Relative molecular mass	HLB
Aliphatic alcohols	FX120-01	Flottec	6	—	102	6.05
Polypropylene glycol (PPG)	F150	Flottec	0	7	425	8.625
Polypropylene glycol alkyl ether (PPGAE)	DowFroth 250	Dow Chemical	1	4	264	7.83
	DowFroth 1012	Dow Chemical	1	6.7	398	7.48
	FX160-01	Flottec	1	3.8	251	7.86
	FX160-05	Flottec	3	2.5	207	7.11
	F160	Flottec	4	2.5	217	6.63

8.7 Impacto de la dosificación de MIBC en la reducción de área

Detalle del cálculo la reducción porcentual del área debido a la coalescencia de las burbujas.

v control celda Laboratorio (m3)	0.8				
Jg (cm/s)	0.5	CONSTANTE			
		$S_b = \frac{6 \cdot J_g}{d_b}$	$\varepsilon_g = \frac{S_b}{5.5}$	$V_{tb} = \varepsilon_g \cdot V_{control}$	$A_b = \pi \cdot (d_b)^2$
Concentración Espumante [ppm]	d32 [mm]			V total bubbles	A single bubbles (m2)
0.01	3.72	8.054347826	1.464426877	0.011715415	4.35845E-05
2.43	2.36	12.72103004	2.312914553	0.018503316	1.74722E-05
4.84	1.55	19.37254902	3.52228164	0.028178253	7.53388E-06
7.43	1.05	28.5	5.181818182	0.041454545	3.48099E-06
9.88	0.94	31.87096774	5.794721408	0.046357771	2.78357E-06
14.87	0.88	34.06896552	6.194357367	0.049554859	2.43598E-06
24.93	0.86	34.87058824	6.340106952	0.050720856	2.32527E-06
n	0.25				
		$S_b = \frac{6 \cdot J_g}{d_b}$	$\varepsilon_g = \frac{S_b}{5.5}$	$C_{AHU} = \frac{\varepsilon_g}{J_g}$	$\varepsilon_g = C_{AHU} \cdot J_g$
Concentración Espumante [ppm]	d32 [mm]				
0.01	3.72	8.054347826	1.464426877	2.928853755	1.464426877
2.43	2.36	12.72103004	2.312914553	4.625829107	2.312914553
4.84	1.55	19.37254902	3.52228164	7.04456328	3.52228164
7.43	1.05	28.5	5.181818182	10.36363636	5.181818182
9.88	0.94	31.87096774	5.794721408	11.58944282	5.794721408
14.87	0.88	34.06896552	6.194357367	12.38871473	6.194357367
24.93	0.86	34.87058824	6.340106952	12.6802139	6.340106952

$V_b = \left(\frac{1}{6}\right) \cdot \pi \cdot (d_b)^3$ V single bubbles (m3)	$N = \frac{V_{tb}}{V_b}$ Nro total bubbles	$A_{tb} = N \cdot A_b$ A total Bubbles (m2)
2.70565E-08	432,998.54	18.8720055
6.86745E-09	2,694,350.08	47.07624883
1.94447E-09	14,491,454.75	109.176918
6.107E-10	67,880,393.47	236.2909091
4.36693E-10	106,156,334.45	295.4934065
3.57508E-10	138,611,957.83	337.656556
3.33415E-10	152,125,495.35	353.7332142

$C_{J_g} = \frac{d_b}{(J_g)^n}$	$d_b = C_{J_g} \cdot J_g^n$	
0.442943541	0.372469636	3.724696356
0.280450666	0.23582996	2.358299595
0.184158592	0.1548583	1.548582996
0.125179696	0.105263158	1.052631579
0.111939536	0.094129555	0.941295547
0.104717631	0.08805668	0.880566802
0.102310329	0.086032389	0.860323887

$\Delta A = \frac{A_{tb,25ppm} - A_{tb,i}}{A_{tb,25ppm}}$ % Reducción	$\Delta N = N_{i+1} - N_i$ Nro burbujas que coalescen (millones de burbujas)
94.6649043	2.26
86.69159498	11.80
69.13580247	53.39
33.20081361	38.28
16.46433114	32.46
4.54485401	13.51
0	-

8.8 Impacto de la dosificación y naturaleza química de los espumantes en la reducción de área superficial de burbuja disponible para flotación

v control celda Laboratorio (m3)	0.8					
Jg (cm/s)	0.5	CONSTANTE				
Concentración Espumante [ppm]	d32 [mm]	$S_b = \frac{6 \cdot J_g}{d_b}$	$\varepsilon_g = \frac{S_b}{5.5}$	$V_{tb} = \varepsilon_g \cdot V_{control}$	$A_b = \pi \cdot (d_b)^2$	$V_b = \left(\frac{1}{6}\right) \cdot \pi \cdot (d_b)^3$
				V total bubbles	A single bubbles (m2)	V single bubbles (m3)
0.00	4.34	6.916256158	1.25750112	0.010060009	5.91085E-05	4.27316E-08
2.37	3.29	9.116883117	1.657615112	0.013260921	3.40173E-05	1.86562E-08
4.79	2.90	10.36162362	1.883931567	0.015071453	2.63352E-05	1.27081E-08
7.34	2.50	12	2.181818182	0.017454545	1.9635E-05	8.18123E-09
9.81	2.21	13.56521739	2.466403162	0.019731225	1.53652E-05	5.66346E-09
14.82	1.43	20.95522388	3.810040706	0.030480326	6.43884E-06	1.53633E-09
24.85	0.92	32.65116279	5.936575053	0.0474926	2.65213E-06	4.06131E-10
39.80	0.77	39	7.090909091	0.056727273	1.85893E-06	2.38324E-10
0.01	3.72	8.054347826	1.464426877	0.011715415	4.35845E-05	2.70565E-08
2.43	2.36	12.72103004	2.312914553	0.018503316	1.74722E-05	6.86745E-09
4.84	1.55	19.37254902	3.52228164	0.028178253	7.53388E-06	1.94447E-09
7.43	1.05	28.5	5.181818182	0.041454545	3.48099E-06	6.107E-10
9.88	0.94	31.87096774	5.794721408	0.046357771	2.78357E-06	4.36693E-10
14.87	0.88	34.06896552	6.194357367	0.049554859	2.43598E-06	3.57508E-10
24.93	0.86	34.87058824	6.340106952	0.050720856	2.32527E-06	3.33415E-10
0.00	3.70	8.109090909	1.474380165	0.011795041	4.2998E-05	2.65122E-08
2.61	2.07	14.46486486	2.62997543	0.021039803	1.35134E-05	4.6711E-09
4.99	1.35	22.3	4.054545455	0.032436364	5.68568E-06	1.27482E-09
7.60	1.11	27.03030303	4.914600551	0.039316804	3.86982E-06	7.1583E-10
9.94	0.92	32.63414634	5.933481153	0.047467849	2.6549E-06	4.06767E-10
15.11	0.90	33.45	6.081818182	0.048654545	2.52697E-06	3.7724E-10
25.00	1.00	30.06741573	5.46680286	0.043734423	3.12752E-06	5.20085E-10
0.00	3.70	8.101694915	1.473035439	0.011784284	4.30765E-05	2.65849E-08
2.29	1.31	22.944	4.171636364	0.033373091	5.37099E-06	1.17046E-09
4.93	0.97	30.83870968	5.607038123	0.044856305	2.97303E-06	4.8203E-10
7.35	1.12	26.80373832	4.873406967	0.038987256	3.93552E-06	7.34136E-10
9.78	0.97	30.83870968	5.607038123	0.044856305	2.97303E-06	4.8203E-10
14.84	1.06	28.3960396	5.162916292	0.04130333	3.50652E-06	6.17432E-10
25.02	0.82	36.76923077	6.685314685	0.053482517	2.09133E-06	2.84386E-10

$N = \frac{V_{tb}}{V_b}$ Nro total bubbles	$A_{tb} = N \cdot A_b$ A total Bubbles (m2)	Coalescence bubble rate (MM bubbles/s)	
235,423.16	13.91551978	0.48	Pentanol
710,804.98	24.17965317	0.48	
1,185,976.71	31.2329437	0.95	
2,133,486.48	41.89090909	1.35	
3,483,950.24	53.53167211	16.36	
19,839,655.71	127.7444096	97.10	
116,939,038.83	310.1377256	121.09	
238,025,419.44	442.4727273	0	
432,998.54	18.8720055	2.26	MIBC
2,694,350.08	47.07624883	11.80	
14,491,454.75	109.176918	53.39	
67,880,393.47	236.2909091	38.28	
106,156,334.45	295.4934065	32.46	
138,611,957.83	337.656556	13.51	
152,125,495.35	353.7332142	0	
444,890.97	19.12941247	4.06	DF-250
4,504,249.45	60.86758271	20.94	
25,443,940.03	144.6661818	29.48	
54,924,810.73	212.5490275	61.77	
116,695,453.98	309.8145476	12.11	
128,809,946.38	325.4989091	(44.72)	
84,090,962.00	262.9962149	0	
443,270.11	19.09453396	28.07	F-150
28,512,903.68	153.1424396	64.54	
93,057,140.84	276.6621133	(39.95)	
53,106,342.04	209.0008401	39.95	
93,057,140.84	276.6621133	(26.16)	
66,895,361.33	234.5702008	121.17	
188,062,882.44	393.3022055	0	

8.9 Impacto de la dosificación y proporción de la mezcla de espumantes del tipo Pentanol y MIBC sobre el diámetro de burbuja

PENTANOL		MIBC		1:01		1:03		3:01	
Line #1		Line #2		Line #3		Line #4		Line #5	
0.00	4.34	0.01	3.72	0.01	4.03	0.01	3.88	0.00	4.18
2.37	3.29	2.43	2.36	2.40	2.82	2.42	2.59	2.39	3.06
4.79	2.90	4.84	1.55	4.82	2.22	4.83	1.89	4.81	2.56
7.34	2.50	7.43	1.05	7.39	1.78	7.41	1.41	7.36	2.14
9.81	2.21	9.88	0.94	9.84	1.58	9.86	1.26	9.82	1.89
14.82	1.43	14.87	0.88	14.84	1.16	14.85	1.02	14.83	1.29
24.85	0.92	24.93	0.86	24.89	0.89	24.91	0.87	24.87	0.90
39.80	0.77								

8.10 Impacto de la dosificación y proporción de la mezcla de espumantes del tipo Pentanol y MIBC sobre el área superficial de burbuja disponible para flotación

v control celda Laboratorio (m3)	0.8	CONSTANTE			
Jg (cm/s)	0.5				
Concentración Espumante [ppm]	d32 [mm]	$S_b = \frac{6 \cdot J_g}{d_b}$	$\varepsilon_g = \frac{S_b}{5.5}$	$V_{tb} = \varepsilon_g \cdot V_{control}$	$A_b = \pi \cdot (d_b)^2$
				V total bubbles	A single bubbles (m2)
0.00	4.34	6.916256158	1.25750112	0.010060009	5.91085E-05
2.37	3.29	9.116883117	1.657615112	0.013260921	3.40173E-05
4.79	2.90	10.36162362	1.883931567	0.015071453	2.63352E-05
7.34	2.50	12	2.181818182	0.017454545	1.9635E-05
9.81	2.21	13.56521739	2.466403162	0.019731225	1.53652E-05
14.82	1.43	20.95522388	3.810040706	0.030480326	6.43884E-06
24.85	0.92	32.65116279	5.936575053	0.0474926	2.65213E-06
39.80	0.77	39	7.090909091	0.056727273	1.85893E-06
0.01	3.72	8.054347826	1.464426877	0.011715415	4.35845E-05
2.43	2.36	12.72103004	2.312914553	0.018503316	1.74722E-05
4.84	1.55	19.37254902	3.52228164	0.028178253	7.53388E-06
7.43	1.05	28.5	5.181818182	0.041454545	3.48099E-06
9.88	0.94	31.87096774	5.794721408	0.046357771	2.78357E-06
14.87	0.88	34.06896552	6.194357367	0.049554859	2.43598E-06
24.93	0.86	34.87058824	6.340106952	0.050720856	2.32527E-06
0.01	4.03	7.442042126	1.353098568	0.010824789	5.10515E-05
2.40	2.82	10.62154091	1.931189257	0.015449514	2.50621E-05
4.82	2.22	13.50170821	2.454856039	0.019638848	1.55101E-05
7.39	1.78	16.88888889	3.070707071	0.024565657	9.91266E-06
9.84	1.58	19.03049759	3.460090471	0.027680724	7.80714E-06
14.84	1.16	25.94941634	4.718075699	0.037744606	4.19892E-06
24.89	0.89	33.72439949	6.131708999	0.049053672	2.48602E-06
0.01	3.88	7.736098021	1.406563276	0.011252506	4.72442E-05
2.42	2.59	11.57686883	2.104885242	0.016839082	2.10965E-05
4.83	1.89	15.91290731	2.893255875	0.023146047	1.11659E-05
7.41	1.41	21.20930233	3.856236786	0.030849894	6.2855E-06
9.86	1.26	23.83115578	4.332937414	0.034663499	4.97854E-06
14.85	1.02	29.45996687	5.356357613	0.042850861	3.25783E-06
24.91	0.87	34.28791774	6.234166861	0.049873335	2.40497E-06
0.00	4.18	7.169522274	1.303549504	0.010428396	5.50062E-05
2.39	3.06	9.811862069	1.783974922	0.014271799	2.9369E-05
4.81	2.56	11.72507005	2.131830918	0.017054647	2.05666E-05
7.36	2.14	14.03076923	2.551048951	0.020408392	1.43625E-05
9.82	1.89	15.83967936	2.879941702	0.023039534	1.12694E-05
14.83	1.29	23.18644068	4.215716487	0.033725732	5.25925E-06
24.87	0.90	33.17910448	6.03256445	0.048260516	2.5684E-06

$V_b = \left(\frac{1}{6}\right) \cdot \pi \cdot (d_b)^3$ V single bubbles (m3)	$N = \frac{V_{tb}}{V_b}$ Nro total bubbles	$A_{tb} = N \cdot A_b$ A total Bubbles (m2)	$\Delta A = \frac{A_{tb,25ppm} - A_{tb,i}}{A_{tb,25ppm}}$ % Reducción	
4.27316E-08	235,423.16	13.91551978	96.85505593	Pentanol
1.86562E-08	710,804.98	24.17965317	94.5353348	
1.27061E-08	1,185,976.71	31.2329437	92.94127259	
8.18123E-09	2,133,486.48	41.89090909	90.53254438	
5.66346E-09	3,483,950.24	53.53167211	87.90170132	
1.53633E-09	19,839,655.71	127.7444096	71.12942749	
4.06131E-10	116,939,038.83	310.1377256	29.90805841	
2.38324E-10	238,025,419.44	442.4727273	0	
2.70565E-08	432,998.54	18.8720055	94.6649043	MIBC
6.86745E-09	2,694,350.08	47.07624883	86.69159498	
1.94447E-09	14,491,454.75	109.176918	69.13580247	
6.107E-10	67,880,393.47	236.2909091	33.20081361	
4.36693E-10	106,156,334.45	295.4934065	16.46433114	
3.57508E-10	138,611,957.83	337.656556	4.54485401	
3.33415E-10	152,125,495.35	353.7332142	0	
3.42994E-08	315,597.39	16.11170647	95.13037187	1(Pentanol):1(MIBC)
1.17978E-08	1,309,528.69	32.81952912	90.08057263	
5.74376E-09	3,419,162.83	53.0315999	83.97164378	
2.93467E-09	8,370,843.55	82.97732884	74.9207984	
2.05122E-09	13,494,770.00	105.3555894	68.15715686	
8.09058E-10	46,652,539.30	195.890097	40.79386138	
3.68578E-10	133,088,892.79	330.8611262	0	
3.05349E-08	368,512.96	17.41009821	94.9094852	1(Pentanol):3(MIBC)
9.11148E-09	1,848,116.57	38.98876855	88.6001273	
3.50844E-09	6,597,251.55	73.66418013	78.46143114	
1.48178E-09	20,819,507.03	130.8609469	61.73774674	
1.04454E-09	33,185,268.30	165.2142504	51.69323134	
5.52924E-10	77,498,612.54	252.4769885	26.17859873	
3.50703E-10	142,209,745.12	342.0105608	0	
3.83612E-08	271,847.78	14.95332353	95.33070711	3(Pentanol):1(MIBC)
1.49661E-08	953,609.68	28.00658538	91.25472342	
8.77033E-09	1,944,583.94	39.99338697	87.51175035	
5.11821E-09	3,987,409.49	57.26908661	82.11727725	
3.55732E-09	6,476,650.40	72.987765	77.20899628	
1.13412E-09	29,737,280.81	156.3959364	51.16413871	
3.87051E-10	124,687,681.92	320.2481379	0	

8.11 Modelación de la tasa de transporte de agua

Datos extraídos de Moyo, 2005 [57].

Datos originales Pamela Moyo							
PENTANOL		MIBC		DF-250		F-150	
Line #1		Line #2		Line #3		Line #2	
21.88	0.01	33.77	0.40	18.05	0.04	14.30	0.08
22.54	0.02	30.07	0.33	19.56	0.08	13.84	0.11
23.62	0.03	30.32	0.32	21.04	0.12	16.96	0.12
24.02	0.03	28.79	0.31	23.73	0.20	17.30	0.20
26.30	0.09	27.85	0.26	23.80	0.24	19.62	0.19
26.86	0.08	26.78	0.21	25.29	0.27	22.02	0.27
27.63	0.09	23.62	0.16			22.89	0.33
28.20	0.15	24.32	0.13				
28.95	0.17	23.77	0.10				
29.37	0.15	23.23	0.09				
30.67	0.24	23.02	0.11				
31.33	0.23	20.94	0.10				
32.31	0.26	22.36	0.06				
		20.26	0.08				
		20.80	0.04				
		20.33	0.02				
		19.76	0.02				
		18.74	0.02				
		19.03	0.04				
		18.80	0.04				
		18.04	0.02				
		17.47	0.03				

		v control celda Laboratorio (m3)	0.8						
		Jg (cm/s)	0.5						
Concentración Espumante [ppm]	d1 original [mm]	d1 [mm]	$S_b = \frac{6 \cdot J_g}{d_b}$	$\epsilon_g = \frac{S_b}{5.5}$	$V_{tb} = \epsilon_g \cdot V_{control}$	$A_b = \pi \cdot (d_b)^2$	$V_{b,d1} = \left(\frac{1}{6}\right) \cdot \pi \cdot (d_b)^3$	$N = \frac{V_{tb}}{V_b}$	
					V total bubbles	A single bubbles (m2)	V single bubbles (m3) d1	Nro total bubbles/s	
0.00	4.34	0.24931148	120.3314023	21.87843678	0.175027494	1.9527E-07	8.11382E-12	21,571,523,680.06	
2.37	3.29	0.242036588	123.9482025	22.53603681	0.180288294	1.8404E-07	7.42406E-12	24,284,314,158.02	
4.79	2.90	0.227125171	132.0857561	24.01559202	0.192124736	1.62062E-07	6.13472E-12	31,317,627,750.75	
7.34	2.50	0.207433266	144.6248259	26.29542289	0.210363383	1.35178E-07	4.67341E-12	45,012,828,916.96	
9.81	2.21	0.193425636	155.0983654	28.1997028	0.225597622	1.17538E-07	3.78914E-12	59,537,938,660.13	
14.82	1.43	0.188401547	159.2343613	28.95170206	0.231613616	1.11511E-07	3.50148E-12	66,147,292,431.01	
24.85	0.92	0.174124961	172.2900604	31.32546554	0.250603724	9.52515E-08	2.76428E-12	90,657,931,237.57	
39.80	0.77	0.168805144	177.7197025	32.31267318	0.258501385	8.95202E-08	2.51858E-12	102,637,773,276.25	
0.01	3.72	0.16	185.7155537	33.7664643	0.270131714	8.19777E-08	2.20708E-12	122,393,405,959.41	
2.43	2.36	0.19	158.3398115	28.78905663	0.230312453	1.12775E-07	3.56116E-12	64,673,357,088.93	
4.84	1.55	0.23	129.9217013	23.6221275	0.18897702	1.67505E-07	6.4464E-12	29,315,122,013.84	
7.43	1.05	0.24	126.6033135	23.01878428	0.184150274	1.76401E-07	6.9667E-12	26,432,923,609.66	
9.88	0.94	0.27	111.816582	20.33028763	0.162642301	2.26141E-07	1.01122E-11	16,083,840,642.41	
14.87	0.88	0.29	104.6712473	19.03113587	0.152249087	2.5807E-07	1.23276E-11	12,350,214,717.13	
24.93	0.86	0.31	96.07929852	17.46896337	0.139751707	3.0629E-07	1.59394E-11	8,767,670,205.16	
0.00	3.70	0.30215	99.28680982	18.05214724	0.144417178	2.8682E-07	1.4444E-11	9,998,414,506.92	
2.61	2.07	0.27886	107.5817996	19.5603272	0.156482618	2.44295E-07	1.13539E-11	13,782,250,207.15	
4.99	1.35	0.25921	115.7361963	21.04294479	0.168343558	2.11083E-07	9.11916E-12	18,460,426,544.33	
7.60	1.11	0.22989	130.4984663	23.72699387	0.189815951	1.66028E-07	6.3613E-12	29,839,156,406.22	
9.94	0.92	0.22915	130.9202454	23.80368098	0.190429448	1.6496E-07	6.30002E-12	30,226,798,699.34	
15.11	0.90	0.21571	139.0746421	25.28629857	0.202290389	1.46183E-07	5.25555E-12	38,490,780,293.82	
0.00	3.70	0.38	78.6525984	14.30047244	0.114403779	4.57053E-07	2.90552E-11	3,937,469,564.73	
2.29	1.31	0.39	76.09500928	13.83545623	0.11068365	4.88292E-07	3.20844E-11	3,449,765,768.67	
4.93	0.97	0.32	93.26921507	16.9580391	0.135664313	3.25024E-07	1.7424E-11	7,786,068,111.88	
7.35	1.12	0.32	95.17414458	17.30438992	0.138435119	3.12144E-07	1.63985E-11	8,441,912,363.52	
9.78	0.97	0.28	107.9062353	19.61931552	0.156954524	2.42828E-07	1.12518E-11	13,949,256,977.53	
14.84	1.06	0.25	121.1165351	22.02118819	0.176169506	1.92746E-07	7.95705E-12	22,140,053,331.37	
25.02	0.82	0.24	125.871335	22.88569727	0.183085578	1.78459E-07	7.08895E-12	25,826,899,027.59	

Área Transversal Equipo (cm ²)		346.3605901							
$A_{tb} = N \cdot A_b$			$V_{b,d2} = \left(\frac{1}{6}\right) \cdot \pi \cdot (d_b)^3$	$\Delta V_b = V_{b,d2} - V_{b,d1}$	$Q_w = \Delta V_b \cdot N$	$J_{wo} = \frac{Q_w}{A_{transv, cell}}$			
A total Bubbles (m ²)	Monocapa	d2 (mm)	V single bubbles (m ³) d2	Volumen agua arrastrada, single bubble (cm ³)	Flujo agua arrastrada, total bubbles (cm ³ /s)	Tasa de transporte de agua (Jwo, en cm ³ /s)			
4212.260763	0.0002	0.249311979	8.11387E-12	4.8683E-11	1.0501671	0.00			
4469.282006	0.0012	0.242039492	7.42433E-12	2.67269E-10	6.4904565	0.02			
5075.38821	0.0032	0.227132439	6.1353E-12	5.88952E-10	18.4445649	0.05			
6084.753534	0.0058	0.207445297	4.67422E-12	8.1322E-10	36.6053517	0.11			
6997.964496	0.0077	0.19344053	3.79002E-12	8.75359E-10	52.1170636	0.15			
7376.169258	0.0084	0.188417373	3.50237E-12	8.8248E-10	58.3715343	0.17			
8635.306161	0.0103	0.174142896	2.76513E-12	8.5425E-10	77.4445270	0.22			
9188.157866	0.011	0.168823713	2.51941E-12	8.31223E-10	85.3148412	0.25			
10033.53218	0.0168	0.161564497	2.20819E-12	1.11255E-09	136.17	0.39			
7293.526079	0.0136	0.1894917	3.56262E-12	1.45315E-09	93.98	0.27			
4910.443187	0.009	0.230929088	6.44814E-12	1.74068E-09	51.03	0.15			
4662.806982	0.0083	0.23698029	6.96844E-12	1.73485E-09	45.86	0.13			
3637.221239	0.00485	0.268309534	1.01136E-11	1.47139E-09	23.67	0.07			
3187.220365	0.00285	0.286619829	1.23287E-11	1.05404E-09	13.02	0.04			
2685.449194	0.00005	0.312242236	1.59395E-11	2.39092E-11	0.21	0.00			
2867.744176	0.0025	0.302162493	1.44451E-11	1.08333E-09	10.83	0.03			
3366.936321	0.006	0.278874309	1.1356E-11	2.04383E-09	28.17	0.08			
3896.688622	0.0089	0.259233247	9.12159E-12	2.43503E-09	44.95	0.13			
4954.138093	0.0132	0.239918104	6.36382E-12	2.51941E-09	75.18	0.22			
4986.214009	0.0133	0.229177618	6.30253E-12	2.51404E-09	75.99	0.22			
5626.692679	0.0153	0.215744506	5.25797E-12	2.41267E-09	92.87	0.27			
1799.630905	0.008	0.381454658	2.90621E-11	6.97379E-09	27.46	0.08			
1684.494673	0.0071	0.39427198	3.20912E-11	6.83446E-09	23.58	0.07			
2530.660794	0.0123	0.321689102	1.74304E-11	6.43024E-09	50.07	0.14			
2635.088814	0.0128	0.315252006	1.64048E-11	6.29785E-09	53.17	0.15			
3387.274363	0.0155	0.278062245	1.12571E-11	5.23291E-09	73.00	0.21			
4267.408019	0.0179	0.247739666	7.96132E-12	4.2737E-09	94.62	0.27			
4609.045229	0.0186	0.238382949	7.09291E-12	3.95637E-09	102.18	0.30			

Pentanol

MIBC

DF-250

F-150

8.12 Efecto de la velocidad superficial de gas y líquido sobre la velocidad de deslizamiento

Análisis sensibilidad unidimensional: rango de Jg (cm/s)																											
Jl (cm/s)	1																										
C	0.1898																										
Jg (cm/s)	Variable	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3
eg (%00)	$\epsilon_g = C_{AHU} \cdot J_g$ Variable	0.0949	0.11388	0.13286	0.15184	0.17082	0.1898	0.20878	0.22776	0.24674	0.26572	0.2847	0.30368	0.32266	0.34164	0.36062	0.3796	0.39858	0.41756	0.43654	0.45552	0.4745	0.49348	0.51246	0.53144	0.55042	0.5694
Ubs (+)	$Ubs(+)=\frac{J_g}{\epsilon_g}+\frac{J_l}{(1-\epsilon_g)}$ Resultado	6.373554	6.397219	6.42192	6.447727	6.474715	6.502967	6.532575	6.563638	6.596267	6.630582	6.666719	6.704825	6.745067	6.78763	6.832719	6.880567	6.931435	6.985619	7.043453	7.105319	7.171653	7.24296	7.319818	7.402902	7.493002	7.591045
Ubs (-)	$Ubs(-)=\frac{J_g}{\epsilon_g}-\frac{J_l}{(1-\epsilon_g)}$ Resultado	4.163854	4.140189	4.115488	4.089681	4.062693	4.034441	4.004833	3.97377	3.941141	3.906826	3.870689	3.832583	3.79234	3.749778	3.704689	3.656841	3.605972	3.551789	3.493955	3.432089	3.365754	3.294448	3.21759	3.134506	3.044406	2.946363

Análisis sensibilidad unidimensional: rango de Jl (cm/s)																											
Jg (cm/s)	1																										
C	Función																										
Jg (cm/s)	Variable	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3
eg (%00)	$\epsilon_g = C_{AHU} \cdot J_g$ Variable	0.30365	0.25548	0.20731	0.15914	0.11097	0.0628	0.01463	-0.03354	-0.08171	-0.12988	-0.17805	-0.22622	-0.27439	-0.32256	-0.37073	-0.4189	-0.46707	-0.51524	-0.56341	-0.61158	-0.65975	-0.70792	-0.75609	-0.80426	-0.85243	-0.9006
Ubs (+)	$Ubs(+)=\frac{J_g}{\epsilon_g}+\frac{J_l}{(1-\epsilon_g)}$ Resultado	3.082692	3.691668	4.638113	6.216279	9.235122	16.99057	76.20282	-34.8106	-14.9855	-9.89413	-7.57574	-6.25725	-5.41087	-4.82425	-4.39549	-4.06964	-3.81448	-3.60989	-3.44266	-3.30375	-3.18681	-3.08722	-3.00156	-2.92722	-2.86221	-2.80496
Ubs (-)	$Ubs(-)=\frac{J_g}{\epsilon_g}-\frac{J_l}{(1-\epsilon_g)}$ Resultado	0.210573	1.005373	2.115059	3.837762	6.985479	14.85656	74.17312	-36.7457	-16.8344	-11.6642	-9.27346	-7.88828	-6.98025	-6.33647	-5.85456	-5.47918	-5.17774	-4.92982	-4.72191	-4.54477	-4.39181	-4.25824	-4.14045	-4.03571	-3.94187	-3.85726

8.13 Análisis de sensibilidad del diámetro de la burbuja sobre la velocidad terminal estimada por ecuación de Stokes y Masliyah

	g	980.6			db (cm)	0.05	0.12	0.19	0.26	0.33	0.4	0.47
	db	0.06			Reb	27.61396	159.6924	378.8911	675.2326	1043.066	1478.502	1978.602
	ro_l	1			ut1	5.522793	13.3077	19.94163	25.97049	31.60807	36.96256	42.09792
	u_l	0.01			ut2	5.522793	13.30768	19.94172	25.9705	31.60808	36.96256	42.09795
	Ut_Stokes	19.612		Solver	error ut	3.54E-07	2.22E-05	8.49E-05	9.55E-06	8.06E-06	3.79E-06	2.38E-05
	Reb	27.614										
	Ut_Masliy	7.952817										
Análisis sensibilidad unidimensional: rango de db												
	db	0.05	0.12	0.19	0.26	0.33	0.4	0.47	1.45	1.65	1.85	2.05
Ut_Stokes	19.612	13.61944	78.448	196.6648	368.2698	593.263	871.6444	1203.414	11453.95	14831.58	18645.02	22894.29
	db	0.05	0.12	0.19	0.26	0.33	0.4	0.47	1.45	1.65	1.85	2.05
Reb		27.61396	159.6924	378.8911	675.2326	1043.066	1478.502	1978.602				
Ut_Masliyah		5.522793	13.30768	19.94172	25.9705	31.60808	36.96256	42.09795				
Razón		2.466043	5.894942	9.861977	14.18031	18.76935	23.58182	28.58605				

8.14 Código del algoritmo Drift Flux Routine de Mella®

```

clc
clear

data = xlsread('dato_experimental.xlsx');

data = data(1:23,3:10);
%Diametro Columna (cm) - Jg (cm/s) - Jl (cm/s) - eg (%)
% dc - jg - jl - eg

db_min = 0.0129;
db_obtenido = zeros(size(data,1),1);
Reb_obtenido = zeros(size(data,1),1);
Res_obtenido = zeros(size(data,1),1);
for i = 1:size(data,1)
    row = data(i,:);

    dc = row(1);
    Jg = row(2);
    Jl = row(3);
    Eg = row(4)/100;

    [db_obtenido(i), Reb_obtenido(i), Res_obtenido(i)] =
df_propuesta_v1(dc,Jg,Jl,Eg,db_min);
end

out = [data, db_obtenido, Reb_obtenido, Res_obtenido];
header = {'Diametro_Columna_cm', 'Jg_cmxs', 'Jl_cmxs', 'eg', 'Re', 'Reb',
'db_medido', 'db_drift_flux', 'db_obtenido',
'Reb_obtenido', 'Res_obtenido'};

T = array2table(out, 'VariableNames', header);

writetable(T, 'comparacion_katrinis.csv', 'Delimiter', ';')

%%%%%funcion df_propuesta_v1

function [db, Reb, Res] = df_propuesta_v1( dc, Jg, Jl, Eg, db_min )

%datos Ex3

%Constantes
ro_l = 1; %g/cm3 Densidad de la soluciï;
u_l = 0.01;%g/cms
%ro_l = 0.99823; %g/cm3 Densidad de la soluciï;
%u_l = 0.01002;%g/cms
g=980.6;%g/cm2

%Asumir valor de db
%db_min = 0.0128999999
%db_min = 0.0129

```

```

%Determino la precisión de la iteración
acc = 1e-9;
%delta = 1e-6;

%Calculo Ubs
Ubs = (Jg/Eg) + (Jl/(1-Eg));

db = db_min;

for k=1:200000

    %Calculo Res
    Res = (ro_1 * Ubs * db * (1-Eg))/u_1;

    %Sistema de Ecuaciones

    Reb_min = 1;
    syms Reb
    Reb = double(vpasolve((Reb*u_1)/(db*ro_1) ==
g*(db^2)*(ro_1)/(18*u_1*(1+0.15*Reb^0.687)),Reb));

    %
    (Reb*u_1)/(db*ro_1)
    %
    g*(db^2)*(ro_1)/(18*u_1*(1+0.15*Reb^0.687))

    clearvars -except Jg Jl db dc ro_1 ro_g u_1 g Reb Res Ubs Eg acc
    db_min delta k

    % Calculo de m
    if(Reb>1 && Reb<200)
        m=(4.45+18*db/dc)*Reb^(-0.1);
    elseif(Reb>200 && Reb<500)
        m=4.45*Reb^(-0.1);
    else
        Reb
        disp('Re fuera de rango')
    end

    %Calculo Ubs iter con ec. de Masliyah
    Ubs_m = (g*(ro_1)*(db^2)*(1-Eg)^(m-1))/(18*u_1*(1+0.15*Res^0.687));

    %Comparacion Ubs
    if(abs(Ubs - Ubs_m)< acc); disp('GG3'); break;

    else
        db_min = 0.0129;
        syms db
        db = double(vpasolve(Ubs == g*(db^2)*((1-Eg)^(m-
1))*(ro_1)/(18*u_1*(1+0.15*Res^0.687)),db, [0 inf]));

    end
end
end

```

8.15 Código del algoritmo Bubble Analysis de Farías-Mella®

```

function varargout = firstGUI(varargin)
% FIRSTGUI MATLAB code for firstGUI.fig
%   FIRSTGUI, by itself, creates a new FIRSTGUI or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = FIRSTGUI returns the handle to a new FIRSTGUI or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   FIRSTGUI('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in FIRSTGUI.M with the given input
arguments.
%
%   FIRSTGUI('Property','Value',...) creates a new FIRSTGUI or raises
the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%   applied to the GUI before firstGUI_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property
application
%   stop. All inputs are passed to firstGUI_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help firstGUI

% Last Modified by GUIDE v2.5 25-Aug-2017 21:41:43

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @firstGUI_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @firstGUI_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

```

```

% --- Executes just before firstGUI is made visible.
function firstGUI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to firstGUI (see VARARGIN)

% Choose default command line output for firstGUI
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

warning('off','all')
% test1 = 1;

% UIWAIT makes firstGUI wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = firstGUI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in browseButton.
function browseButton_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to browseButton (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% disp(hObject.folder)
[ruta, folder] = fileparts(uigetdir('./images'));

set(handles.text_ruta, 'String', ruta)
set(handles.edit_folder, 'String', folder)

% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu1
contents as cell array

```

```

%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
popupmenu1
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in detectButton.
function detectButton_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to detectButton (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

umbrales = [str2double(get(handles.edit_min,'String'))
str2double(get(handles.edit_max,'String'))]

GG = evalin('base','GG');
Background = evalin('base','Background');

option = get(handles.popupmenu1,'Value');
switch option
    case 1
        disp('Se eligio bubbles_v2');
        [centers, radii] = bubbles_v2(GG,Background, umbrales);
    otherwise
        disp('error');
end

figure(1); clf
showimg(GG,centers,radii);

assignin('base','centers',centers);
assignin('base','radii',radii);
assignin('base','umbrales',umbrales);

% --- Executes on button press in getBackgroundBtn.
function getBackgroundBtn_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to getBackgroundBtn (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% axes(handles.axes1)

```

```

evalin( 'base', 'clearvars *' )

ruta = get(handles.text_ruta,'String');
folder = get(handles.edit_folder,'String');

%Cantidad de imagenes
N_IMG = eval(sprintf('size(dir('%s/%s'),1)-2',ruta, folder));
Elegidos = [];

%Limitar cantidad de imagenes
if(N_IMG < 100)
    IMAX = N_IMG;
else
    IMAX = 100
end

%Extraer fondo
X = zeros(1024,1280,IMAX);
parfor i = 1:IMAX
    X(:,:,i) = rgb2gray(imread( sprintf('%s/%s/image-
%d.jpg',ruta, folder,i) ));
end
disp('X listo')

Background = uint8(zeros(1024,1280));
parfor xx = 1:1024
    for yy = 1:1280
        Background(xx,yy) = median(X(xx,yy,:));
    end
end

figure(1); clf
imshow(Background)

%Save variables to workspace
assignin('base','ruta',ruta);
assignin('base','Elegidos',Elegidos);
assignin('base','folder',folder);
assignin('base','N_IMG',N_IMG);
assignin('base','IMAX',IMAX);
assignin('base','X',X);
assignin('base','Background',Background);
% A =
imread('/home/beto/Dropbox/Matlab/Crocancia/Muestras/P_MIBC_11mm_0025_100
_00U_R1/image-100.jpg');
%
% % imshow(A)

function edit_folder_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_folder (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_folder as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit_folder as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_folder_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit_folder (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in showBkgndBtn.
function showBkgndBtn_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to showBkgndBtn (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

Background = evalin('base','Background');
% test =evalin('base','IMAX');

figure(1); clf
imshow(Background)

% --- Executes on button press in getImage_btn.
function getImage_btn_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to getImage_btn (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

Elegidos = evalin('base','Elegidos');
N_IMG = evalin('base','N_IMG');
ruta = evalin('base','ruta');
folder = evalin('base','folder');

% Seleccionar imagen a procesar aleatoreiamente
while(true)
A_Procesar= randi([1 N_IMG],1)
    if(~any(A_Procesar==Elegidos))
        break;
    end
end
end

```

```

set(handles.img_N, 'String', num2str(A_Procesar))

GG = rgb2gray(imread( sprintf('%s/%s/image-
%d.jpg', ruta, folder, A_Procesar) ));

figure(1); clf
imshow(GG)

assignin('base', 'A_Procesar', A_Procesar);
assignin('base', 'GG', GG);

% --- Executes on button press in show_img_clean.
function show_img_clean_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to show_img_clean (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

GG = evalin('base', 'GG');

figure(1); clf
imshow(GG)

function edit_min_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_min (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit_min as text
%        str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of edit_min
%        as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_min_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_min (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
%            called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit_max_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_max (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_max as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit_max
as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_max_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit_max (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in SAVE_btn.
function SAVE_btn_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to SAVE_btn (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

ext = get(handles.popupmenu2,'Value');

if(ext==1)
    ext='tif';
else
    ext='jpg';
end

centers = evalin('base','centers');
radii = evalin('base','radii');
GG = evalin('base','GG');
folder = evalin('base','folder');
A_Procesar = evalin('base','A_Procesar');
Elegidos = evalin('base','Elegidos');
umbrales = evalin('base','umbrales');

%Guarda la imagen final con circulos
figure(1); clf
imshow(GG)
viscircles(centers,radii);

mkdir('processed')
mkdir(sprintf('./processed/%s/',folder))
export_fig(sprintf('./processed/%s/image-%d.%s',folder,A_Procesar,ext),
'-native')

```

```

%Banea a las imagenes ya procesadas
Elegidos = [Elegidos A_Procesar];

if(numel(Elegidos)>=20)
    msgbox('Operation Completed');
    disp('Prueba termina, Cambiar Set')
end

%Dar formato a datos
Nuevo_dato = {folder, A_Procesar, str2double(folder(8:9)), numel(radii),
radii, centers, umbrales};

%Guardar
load('Data.mat')
Data = [Data; cell2table(Nuevo_dato, 'VariableNames',
Data.Properties.VariableNames)]
save('Data.mat','Data')

assignin('base', 'Elegidos', Elegidos);

% --- Executes on button press in finalView_btn.
function finalView_btn_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to finalView_btn (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

centers = evalin('base','centers');
radii = evalin('base','radii');
GG = evalin('base','GG');

figure(1); clf
showimg(GG,centers,radii);

function descarta3_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to descarta3_edit (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of descarta3_edit as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
descarta3_edit as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function descarta3_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to descarta3_edit (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end

% --- Executes on button press in descarta3_btn.
function descarta3_btn_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to descarta3_btn (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

eval(sprintf('Eliminar = %s;', get(handles.descarta3_edit, 'String')))

centers = evalin('base', 'centers');
radii = evalin('base', 'radii');
GG = evalin('base', 'GG');

[centers, radii] = descarta3(Eliminar, centers, radii);

figure(1); clf
showimg(GG, centers, radii);

assignin('base', 'centers', centers);
assignin('base', 'radii', radii);

% --- Executes on button press in addNew_btn.
function addNew_btn_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to addNew_btn (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

centers = evalin('base', 'centers');
radii = evalin('base', 'radii');
GG = evalin('base', 'GG');

figure(1);
[centers, radii] = addBubble(centers, radii);

figure(1); clf
showimg(GG, centers, radii);

assignin('base', 'centers', centers);
assignin('base', 'radii', radii);

% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject, 'String')) returns popupmenu2
contents as cell array
%         contents{get(hObject, 'Value')} returns selected item from
popupmenu2

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton14.
function pushbutton14_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton14 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

load('Data.mat')
Ultimo_Registro = Data(end,:);

% Construct a questdlg with three options
choice = questdlg('Seguro de eliminar el ultimo registro?', ...
    'WARNING', ...
    'Eliminar','NO, me equivoque de btn','No thank you');
% Handle response
switch choice
case 'Eliminar'
    Data(end,:) = []
    save('Data.mat','Data')
case 'NO, me equivoque de btn'
    disp('OK, No se ha borrado nada...');
case 'No thank you'
end

function [centers, radii] = bubbles_v2( img, background, umbrales )

function showing( img, centers, radii )
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

imshow(img)
viscircles(centers,radii);

for i = 1:numel(radii)

text(centers(i,1),centers(i,2),num2str(i),'Color','Green','FontSize',14)
end

```

```

shg

end

%bubbles_v2 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

diferencia = (imabsdiff(background,img));

% H = fspecial('disk',10);
% blurred = imfilter(diferencia,H,'replicate');

level = multithresh(diferencia,20);
diferencia = (imquantize(diferencia,level));

bin = imbinarize(diferencia,'adaptive','ForegroundPolarity','dark');
bin = imfill(bin,'holes');

[centers, radii] = imfindcircles(bin,
umbralas,'ObjectPolarity','bright','Sensitivity',0.895,'Method','TwoStage
');

descarta3 = [];
for jj = 1:numel(radii)
    xmin = centers(jj,1)-radii(jj);
    ymin = centers(jj,2)-radii(jj);
    width = 2*radii(jj);
    height = 2*radii(jj);

    bubble = imcrop(img,[xmin ymin width height]);

    if(max(max(bubble)) < 250 || min(min(bubble)) >40)
        descarta3 = [descarta3, jj];
    end
end
centers(descarta3,:) = [];
radii(descarta3) = [];

end
function [ centers, radii ] = addBubble(centers, radii)
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

[x,y] = ginput(2)

rad = sqrt((x(1)-x(2))^2 + (y(1)-y(2))^2)

% hold on

% h = plot(x(1),y(1),'o')

```

```

%
% set(h, 'MarkerSize',rad);

centers = [centers; x(1), y(1)];
radii = [radii; rad];

for i = 1:numel(radii)

text(centers(i,1),centers(i,2),num2str(i), 'Color', 'Green', 'FontSize',14)
end

end

function [centers, radii] = descartar3( descartadas, centers, radii )
%UNTITLED8 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

centers(descartadas,:) = [];
radii(descartadas) = [];

end

clc
clear
format long

%cd ~/Dropbox/Matlab/Crocancia/
%load Data20.mat

cd E:\
load Data22.mat

im_width = 1280;

last_title = 'C_F507_12mm_0500_100_05U_R1';
radios = [];
result =
{'Nombre', 'Radios', 'im_ratio', 'radios_conv', 'D32', 'Eg', 'Sb', 'Relacion_Sb'
};
j=2;
for i = 1:size(Data)
    row = Data(i,:);
    name = row.Nombre{1};

    if ~ strcmp(name, last_title)

        % Nombre Prueba
        result{j,1} = last_title;

        % Radios
        result{j,2} = radios;

        % Obtener calibracion

```

```

calibracion = str2double(last_title(8:9));

% razon pixel / mm
im_ratio = im_width/calibracion;
result{j,3} = im_ratio;

% conversion pix a mm
radios_conv = radios/im_ratio;
%result{j,4} = radios_conv;

%DIAMETRO
result{j,4} = radios_conv.*2;

% D32
result{j,5} = sum(radios_conv.^3)/sum(radios_conv.^2);

%Hold-up 2D
result{j,6} = (sum((pi*radios_conv.^2))/(1280*1024))*100;

%Sb
result{j,7}= (6*(0.025)/result{j,5});

%Relacion Sb
result{j,8}= (5.5*result{j,6});

last_title = name;
radios = [];
j = j+1;

end
radios = [radios, transpose(row.Radios{1})];
end
result{j,1} = last_title;
result{j,2} = radios;

% Obtener calibracion
calibracion = str2double(last_title(8:9));

% razon pixel / mm
im_ratio = im_width/calibracion;
result{j,3} = im_ratio;

% conversion pix a mm'
radios_conv = radios/(im_ratio);
result{j,4} = radios_conv.*2;

% D32
result{j,5} = sum(radios_conv.^3)/sum(radios_conv.^2);

%Hold-up 2D
result{j,6} = (sum((pi*radios_conv.^2))/(1280*1024))*100;

```

```

%Sb
result{j,7}= (6*(0.025)/result{j,5});

%Relacion Sb
result{j,8}= (5.5*result{j,6});

%%
close all

num_hist=[2, 45, 64];

label = {'Top', 'Middle', 'Bottom'};
color = {'[0 0.8 0.46]', '[0.26 0.34 0.83]', '[1 0.84 0]'};
legend('Location', 'northeastoutside')
ax={};
for w=1:size(num_hist,2)

    data = result{num_hist(w),4};
    [N,edges] = histcounts(data
,25, 'Normalization', 'probability', 'BinWidth', 0.02);

    ax{w} = subplot(3,1,w);
    histogram('BinEdges', edges, 'BinCounts', N*100, 'FaceColor', color
{1,w}, 'FaceAlpha', 0.5)
    axis([0 3.5 0 40])

    hold on

    limm = [0 40];%[0 max([g1.Values g2.Values])+2];
    hold on
    h2 = stem(mean(data), limm(2)+1, '.', 'LineWidth', 1.2);
    str = {'M: ', num2str(mean(data)), ', ', 'S: ', num2str(skewness(data))
}, ['K: ', num2str(kurtosis(data))]);% [0.57 .025 0.1 0.4]

    text(3.5*1.05,limm(end)*0.3,str); %el 0.8 es el xlim

    legend(label{w}, 'Mean', 'Location', 'northeastoutside')

end

subplot(3,1,1)

file_name = {'C_F507_0500_100'};
plot_name = {'Capilar - 0,5[mmol/L] F507 - 100[mL/s] Alimentación'};

title(plot_name, 'FontSize', 9);

ax{2}.Position(3) = ax{1}.Position(3);
ax{3}.Position(3) = ax{1}.Position(3);

eval(sprintf('print -dtiff -r800 ./hist_final/%s', string(file_name)));

```

8.16 Resultados de Hold-up 2D y Sb del algoritmo Bubble Analysis de Farías-Mella®.

Nombre Test	d32 [mm]	Hold-up de Gas [%]	Sb [s-1]
C_F507_12mm_0500_100_05U_R1'	1.0631	3.2717	0.1411
P_MIBC_14mm_0500_100_05U_R1'	0.6516	0.7787	0.2302
C_MIBC_11mm_0000_100_05U_R1'	1.0474	1.3271	0.1432
P_MIBC_12mm_0000_100_05U_R1'	1.0596	2.1426	0.1416
C_MIBC_14mm_0000_050_05U_R1'	2.5803	1.2353	0.0581
P_MIBC_12mm_0000_050_05U_R1'	0.9741	0.5399	0.1540
P_F507_14mm_0500_100_05U_R1'	0.7525	5.5660	0.1993
C_MIBC_16mm_0500_100_05U_R1'	1.3182	8.5810	0.1138
P_MIBC_14mm_0500_050_05U_R1'	0.5961	3.0575	0.2517
P_MIBC_12mm_0050_100_05U_R1'	0.7363	1.6738	0.2037
P_MIBC_12mm_0050_050_05U_R1'	0.5202	1.8828	0.2883
P_F507_15mm_0500_050_05U_R1'	0.7180	2.7878	0.2089
C_MIBC_16mm_0500_050_05U_R1'	0.8231	2.2332	0.1822
C_F507_15mm_0500_050_05U_R1'	1.8032	1.0570	0.0832
P_F507_11mm_0050_100_05U_R1'	0.7855	3.1630	0.1910
C_MIBC_14mm_0050_100_05U_R1'	1.6514	0.9797	0.0908
C_F507_12mm_0050_100_05U_R1'	1.1871	1.7244	0.1264
P_F507_13mm_0050_050_05U_R1'	0.6941	2.5774	0.2161
C_MIBC_11mm_0050_050_05U_R1'	1.4954	0.8131	0.1003
C_F507_11mm_0050_050_05U_R1'	1.2146	1.1830	0.1235
P_MIBC_12mm_0000_100_00U_R1'	1.4054	1.0941	0.1067
C_MIBC_12mm_0000_100_00U_R1'	1.4068	2.4188	0.1066
P_MIBC_12mm_0000_050_00U_R1'	0.8504	0.5486	0.1764
C_MIBC_14mm_0000_050_00U_R1'	2.0132	1.1815	0.0745
P_MIBC_14mm_0500_100_00U_R1'	0.7186	2.0239	0.2087
P_F507_16mm_0500_100_00U_R1'	0.7434	2.5348	0.2018
C_MIBC_15mm_0500_100_00U_R1'	0.8119	3.0964	0.1847
C_F507_14mm_0500_100_00U_R1'	1.5225	3.2763	0.0985
P_MIBC_14mm_0500_050_00U_R1'	0.5744	4.0583	0.2611
P_F507_12mm_0500_050_00U_R1'	0.6255	3.4013	0.2398
C_MIBC_17mm_0500_050_00U_R1'	0.8252	1.7150	0.1818
C_F507_15mm_0500_050_00U_R1'	1.7556	0.9874	0.0854
P_MIBC_14mm_0050_100_00U_R1'	0.7002	0.7190	0.2142
P_F507_14mm_0050_100_00U_R1'	0.6522	0.9829	0.2300
C_MIBC_13mm_0050_100_00U_R1'	1.7644	1.4402	0.0850

'C_F507_11mm_0050_100_00U_R1'	1.3136	1.3858	0.1142
'P_MIBC_11mm_0050_050_00U_R1'	0.4765	2.6198	0.3148
'P_F507_12mm_0050_050_00U_R1'	0.5442	1.3535	0.2756
'C_MIBC_12mm_0050_050_00U_R1'	1.6324	0.9005	0.0919
'C_F507_11mm_0050_050_00U_R1'	1.0607	1.0126	0.1414
'P_MIBC_12mm_0000_100_15D_R1'	0.5375	0.1168	0.2791
'P_MIBC_13mm_0500_100_15D_R1'	0.5192	3.5690	0.2889
'C_MIBC_14mm_0000_100_15D_R1'	0.2792	0.4234	0.5373
'P_MIBC_12mm_0000_050_15D_R1'	0.1572	0.0138	0.9539
'P_F507_14mm_0500_100_15D_R1'	0.7485	5.3975	0.2004
'C_MIBC_13mm_0500_100_15D_R1'	0.6117	0.3144	0.2452
'C_F507_11mm_0500_100_15D_R1'	0.5341	1.2493	0.2809
'P_MIBC_15mm_0500_050_15D_R1'	0.2808	0.0477	0.5342
'P_F507_13mm_0500_050_15D_R1'	0.3144	0.0638	0.4771
'C_MIBC_14mm_0500_050_15D_R1'	0.3460	0.0209	0.4335
'C_F507_15mm_0500_050_15D_R1'	0.2459	0.0347	0.6099
'P_F507_11mm_0050_100_15D_R1'	0.5117	4.0483	0.2932
'P_MIBC_10mm_0050_100_15D_R1'	0.5416	0.6660	0.2769
'P_MIBC_11mm_0050_050_15D_R1'	0.2033	0.0387	0.7380
'P_F507_11mm_0050_050_15D_R1'	0.1547	0.0408	0.9699
'C_MIBC_11mm_0050_100_15D_R1'	0.2510	0.0427	0.5977
'C_MIBC_11mm_0050_050_15D_R1'	0.2237	0.0230	0.6707
'C_F507_11mm_0050_050_15D_R1'	0.2031	0.0648	0.7385
'C_F507_12mm_0050_100_15D_R1'	0.2825	1.2888	0.5309

8.17 Data experimental para la evaluación de la rutina iterativa en columna de flotación contracorriente

Datos obtenidos de Yianatos *et al.*, 1998 [85].

INPUTS				MEDIDO	OUTPUT
Diametro_Columna [cm]	Jg [cm/s]	Jl [cm/s]	eg (%)	d32 [mm]	db obtenido [mm]
3.81	1	0.91	9.5	1.2	1.14
3.81	1	0.85	12.9	0.86	0.89
3.81	1	0.82	15.8	0.77	0.78
3.81	1	0.77	16.2	0.73	0.76
10.31	2.1	0.3	15.7	1.51	1.40
10.31	1.5	0.3	14	1.13	1.12
5.71	0.5	1	12.3	0.62	0.55
5.71	0.8	1	17	0.67	0.65

5.71	1	1	20	0.7	0.71
5.71	1.2	1	23.4	0.74	0.76
5.71	1.5	1	28	0.81	0.84
5.71	1.8	1	32	0.88	0.93
3.81	1	0.96	11.2	0.97	1.00
3.81	1	0.88	13.2	0.85	0.88
3.81	1	0.91	14.4	0.85	0.84
3.81	1	0.87	17.7	0.82	0.74
3.81	1	0.83	21.5	0.71	0.68
3.81	1	0.91	13.6	0.8	0.87
3.81	1	0.91	15.3	0.73	0.81
3.81	1	0.96	18	0.67	0.75

8.18 Data experimental para la evaluación de la rutina iterativa en dispositivo de flujo descendente

Datos obtenidos de Vicencio (2010) [102].

INPUTS				MEDIDO	OUTPUT
Diametro_Columna [cm]	Jg [cm/s]	Jl [cm/s]	eg [%]	d32 [mm]	db obtenido [mm]
5.2	0.13	0.147	2.28	2.66	0.52
5.2	0.24	0.147	2.5	2.71	0.86
5.2	0.36	0.147	2.85	2.44	1.15
5.2	0.13	0.147	3.3	1.51	0.38
5.2	0.24	0.147	3.52	1.12	0.62
5.2	0.36	0.147	3.65	1.27	0.89
5.2	0.13	0.147	3.74	1.45	0.35
5.2	0.24	0.147	4.11	1.32	0.54
5.2	0.36	0.147	4.33	1.13	0.76
5.2	0.13	0.147	3.86	1.2	0.34
5.2	0.24	0.147	4.14	1.24	0.54
5.2	0.36	0.147	4.42	1.26	0.74