



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN
EN METALURGIA Y MATERIALES**



**“CONTROL DE TAMAÑO DE BURBUJAS EMPLEANDO UN DISPERSOR EXTERNO
TIPO VENTURY EN UN SISTEMA DE FLOTACIÓN AIRE-AGUA”**

TESIS

**Que para obtener el grado de
MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES**

Presenta:

José Enrique Gembe Huaroco

Asesor:

Doctor en Filosofía Ramiro Escudero García

Morelia, Michoacán, Febrero 2015

Dedicado para:

mi esposa, Maribel

mi hija Andrea

mis padres

mis hermanos

mis amigos

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida y la oportunidad de vivir y poder consumir una de las etapas más importantes en mi formación como persona digna.

A mi asesor, Dr. Ramiro Escudero García por compartir sus vastos conocimientos en el progreso de este proyecto manifestándome en todo momento su total apoyo, comprensión y paciencia.

Le agradezco a mis sinodales, Dr. Arnoldo Bedolla Jacuinde, Dr. Ricardo Morales Estrella, Dr. Juan Serrato Rodríguez, Dr. Juan Zarate Medina y al Dr. Gerardo Barrera Cardiel por sus sugerencias y el tiempo dedicado a la revisión de los reportes hasta la tesis, lo cual contribuyo a la calidad del trabajo.

A mis amigos, Carlos, Tomas, Osiris, Jordi, Dionisio, Ricardo, Juan Carlos, Eloy, Fabián, Lima, Antonio, Víctor, Ángeles, Yareth, Abigail, Lalo, Francisco, Lenin, Braulio, Homero, Alfredo. Muchísimas gracias Hugo Jhonathan, Sue Ellen por el apoyo y consejos brindados. Gracias a todos ustedes mi estancia fue más amena.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo en el financiamiento de este proyecto, y su incansable lucha por el desarrollo de la ciencia y tecnología de nuestro país.

Al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por brindarme todo el apoyo moral y de conocimientos para lograr hacer de este proyecto un éxito.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Víctor López Morelos, por el apoyo y guía en los trámites requeridos, desde el ingreso a la institución hasta de titulación.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	i
INDICE DE FIGURAS	iv
INDICE DE TABLAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	3
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	4
1.3.2 <i>Objetivos Particulares</i>	4
CAPÍTULO II	
ANTECEDENTES	5
2.1 Proceso de flotación.....	5
2.2 Celdas de flotación	6
2.3 Columnas de flotación	7
2.4 Dispersores de gas	8
2.4.1 <i>Dispersores internos</i>	9
2.4.2 <i>Dispersores externos</i>	9
2.5 Dispersor tipo ventury o vena contracta	10
2.6 Proceso de flotación.....	12
2.7 Propiedades de la burbuja.....	12
2.7.1 <i>Velocidad de flotación</i>	13
2.7.2 <i>Fracción de gas retenido</i>	14
2.7.2.1 <i>Método de conductividad eléctrica para medir la fracción de gas retenido local</i>	14
2.7.2.2 <i>Calibración de sensores de conductividad utilizados en dispersiones gas-líquido</i>	15
2.7.3 <i>Tamaño</i>	16

2.7.4 Determinación de diámetro de burbuja.....	16
2.7.4.1 Modelo de arrastre	19
2.8 Factores que afectan el tamaño de las burbujas.....	21
2.8.1 Velocidad superficial de gas.....	21
2.8.2 Velocidad superficial del líquido.....	22
2.8.3 Presencia de sólidos	22
2.8.4 Tensión superficial	23
2.8.5 Espumantes.....	23
2.9 Modelado matemático	24
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	26
3.1 Material y equipo.....	27
3.1.1 Construcción de los dispersores de gas tipo ventury	29
3.1.2 Construcción y calibración del sensor de conductividad.....	31
3.2 Caracterización del dispersor en la columna de flotación de laboratorio, en un sistema aire-agua.....	33
3.2.1 Medición de la tensión superficial	36
3.2.2 Estimación del diámetro de burbuja: Modelo de flujo de fases o Drift-Flux	37
3.2.3 Medición de la fracción de gas retenido	38
3.2.4 Medición de la caída de presión.....	38
3.2.5 Calculo de la energía cinética disipada	39
3.3 Obtención del modelo matemático empírico.....	41
3.4 Experimentación en la columna de flotación de escala piloto.....	41
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1 Calibración del sensor de conductividad.....	44
4.2 Resultados experimentales en la columna de flotación de laboratorio de 7.5 cm de diámetro por 300 cm de alto	45
4.2.1 Efecto de la tensión superficial en las características de la dispersión de aire	45
4.2.2 Efecto de la relación de diámetro d_M/d_m	49
4.2.3 Efecto del flujo volumétrico del gas	52
4.2.4 Efecto del flujo volumétrico del líquido	59

4.2.5 Efecto de la energía cinética disipada en el interior del dispersor externo tipo ventury en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro y 300 cm de altura	65
4.3 Experimentos en la columna de flotación escala piloto	66
4.3.1 Efecto de la tensión superficial	66
4.3.2 Efecto del flujo volumétrico del gas	68
4.3.3 Efecto del flujo volumétrico del líquido	71
4.3.4 Efecto de la energía cinética disipada en el dispersor tipo ventury en la columna de flotación escala piloto	74
4.4 Modelo matemático propuesto para la predicción del tamaño de burbuja	75
CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
5.1 Conclusiones	79
5.2 Recomendaciones	80
5.3 Aportaciones	80
BIBLIOGRAFIA.	81
ANEXO A.....	83
ANEXO B.....	88
ANEXO C.....	90

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Celda de flotación	6
Figura 2.2. Columna de flotación	8
Figura 2.3. Representación esquemática de un dispersor tipo ventury para generar nubes de burbujas de manera externa a las columnas de flotación	10
Figura 2.4. Sonda para medir el tamaño de burbuja [14]	18
Figura 2.5. Efecto de la velocidad superficial en el tamaño de burbuja en una celda de flotación [14]	18
Figura 2.6. Comparación de la fracción de gas retenido con la velocidad superficial de gas [18]	22
Figura 2.7. Comparación entre la recuperación real y el modelado	24
Figura 2.8. Comparación entre los diámetros de burbuja medidos por el método fotográfico y los estimados con el modelo.....	25
Figura 3.1. Diagrama general del desarrollo experimental	27
Figura 3.2. Columna de flotación de 7.5 cm de diámetro y 300 cm de altura.....	28
Figura 3.3. Características dimensionales del dispersor externo tipo ventury con relación de diámetro 2.....	29
Figura 3.4. Características dimensionales del dispersor externo tipo ventury con relación de diámetro 2.5.....	30
Figura 3.5. Características dimensionales del dispersor externo tipo ventury con relación de diámetro 3.....	30
Figura 3.6. Vista isométrica de un dispersor externo tipo ventury.....	30
Figura 3.7. Detalles del sensor de conductividad (izquierda), vista isométrica (derecha)	31
Figura 3.8. Polaridad de los electrodos y superficies isopotencial dentro del sensor	32
Figura 3.9. Instalación de dispersor en la parte inferior de la columna de flotación.....	33
Figura 3.10. Rotámetros de esfera para medir los flujos de agua y aire alimentados al dispersor	34
Figura 3.11. Transductor de presión digital utilizado para medir la caída de presión dentro de cada ventury	35
Figura 3.12. Programa experimental realizado en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro por 300 cm de altura.....	36

Figura 3.13. Tensiómetro semiautomático Cole-Parmer.....	37
Figura 3.14. Medición de la caída de presión, resultante de la presión diferencial medida en dos puntos.....	39
Figura 3.15. Detalles de la relación de diámetros del dispersor	40
Figura 3.16. Vista lateral de la columna de flotación de escala piloto (izquierda), vista isométrica de la columna (derecha).....	42
Figura 3.17. Programa experimental realizado en la columna de flotación de escala piloto ..	43
Figura 4.1. Curva de calibración del sensor de conductividad.....	44
Figura 4.2. Efecto de la concentración de surfactante en la tensión superficial.....	45
Figura 4.3. Efecto de la tensión superficial en el porcentaje de gas retenido	46
Figura 4.4. Efecto de la tensión superficial sobre el diámetro de burbuja	47
Figura 4.5. Efecto de la tensión superficial en el área superficial de flujo de burbujas. Experimentos en la columna de 7.5 cm de diámetro.....	49
Figura 4.6. Efecto de la relación de diámetro sobre el porcentaje de gas retenido.....	50
Figura 4.7. Comparación del diámetro de burbuja respecto a la relación de diámetro	51
Figura 4.8. Comparación de área superficial de la burbuja respecto a la relación de diámetro	52
Figura 4.9. Efecto del flujo volumétrico del gas en el porcentaje de gas retenido para la relación de diámetro 2	53
Figura 4.10. Efecto del flujo volumétrico del gas en el porcentaje de gas retenido para la relación de diámetro 2.5	53
Figura 4.11. Efecto del flujo volumétrico del gas en el porcentaje de gas retenido para la relación de diámetro 3	54
Figura 4.12. Efecto del flujo volumétrico de gas en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 2.....	55
Figura 4.13. Efecto del flujo volumétrico de gas en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 2.5.....	55
Figura 4.14. Efecto del flujo volumétrico de gas en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 3.....	56
Figura 4.15. Efecto del flujo volumétrico de gas en el área superficial de las burbujas, para la relación de diámetro 2	57

Figura 4.16. Efecto del flujo volumétrico de gas en el área superficial de las burbujas, para la relación de diámetro 2.5	57
Figura 4.17. Efecto del flujo volumétrico de gas en el área superficial de las burbujas, para la relación de diámetro 3	58
Figura 4.18. Efecto del flujo volumétrico del líquido sobre el porcentaje de gas retenido, para la relación de diámetro 2	59
Figura 4.19. Efecto del flujo volumétrico del líquido sobre el porcentaje de gas retenido, para la relación de diámetro 2.5	60
Figura 4.20. Efecto del flujo volumétrico del líquido sobre el porcentaje de gas retenido, para la relación de diámetro 3	60
Figura 4.21. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 2	61
Figura 4.22. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 2.5	62
Figura 4.23. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 3	62
Figura 4.24. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el área superficial de la burbuja, para la relación de diámetro 2	63
Figura 4.25. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el área superficial de la burbuja, para la relación de diámetro 2.5	64
Figura 4.26. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el área superficial de la burbuja, para la relación de diámetro 3	64
Figura 4.27. Efecto de la energía cinética disipada en el diámetro de burbuja y el área superficial de flujo de burbujas (S_b)	65
Figura 4.28. Efecto de la tensión en el diámetro de burbuja	67
Figura 4.29. Efecto de la tensión superficial en el porcentaje de gas retenido	67
Figura 4.30. Efecto de la tensión superficial en el área superficial de la burbuja	68
Figura 4.31. Efecto del flujo volumétrico de gas en el diámetro de burbuja	69
Figura 4.32. Efecto del flujo volumétrico de gas en el porcentaje de gas retenido	70
Figura 4.33. Efecto del flujo volumétrico de gas en el área de la burbuja	71
Figura 4.34. Efecto del flujo volumétrico de líquido en el diámetro de burbuja	72

Figura 4.35. Efecto del flujo volumétrico de líquido en el porcentaje de gas retenido	73
Figura 4.36. Efecto del flujo volumétrico de líquido en el área superficial de la burbuja	74
Figura 4.37. Efecto de la energía cinética disipada en el diámetro de burbuja y el área superficial de la burbuja en la columna de flotación escala piloto.....	75
Figura 4.38. Predicción del tamaño de la burbuja con el uso del modelo empírico en la columna de flotación de escala piloto	77
Figura C.1. Programa Drift-Flux para el calcular el diámetro de burbuja (Diagrama de Bloques)	90
Figura C.2. Programa Drift-Flux para calcular el diámetro de burbuja (Panel Frontal)	91

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Relación de diámetros de los dispersores diseñados para este trabajo	29
Tabla 4.1. Tabla de correlaciones de las variables presentes en el modelo	76
Tabla A.1. Resultados experimentales en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro	83
Tabla B.1. Resultados experimentales de la columna de flotación de escala piloto	88

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de la sección transversal de la celda de conductividad, cm^2
A_c	Área de la sección transversal de la columna, cm^2
C	Constante de celda, cm^{-1}
C'	Concentración de las partículas en una pulpa mineral, masa.volumen^{-1}
[C]	Concentración de espumante, ppm
d_{10}	Diámetro medio de la burbuja, mm
d_{20}	Diámetro superficial de la burbuja, mm
d_{30}	Diámetro volumétrico de la burbuja, mm
d_{32}	Diámetro Sauter de la burbuja, mm
d_b	Diámetro de la burbuja, mm
d_c	Diámetro del equipo de flotación, mm
d_M	Diámetro mayor del dispersor, mm
d_m	Diámetro menor del dispersor, mm
d_o	Diámetro del orificio de descarga del dispersor de gas, mm
d_p	Diámetro de la partícula sólida en una pulpa mineral, mm
ΔE	Energía cinética disipada en el dispersor, cm/s
g	Aceleración de la gravedad, cm/s
J_g	Velocidad superficial de gas, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
J_l	Velocidad superficial de líquido, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
k_1	Constante cinética de flotación, tiempo^{-1}
k	Conductividad eléctrica, $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$
K	Conductancia eléctrica, mS
k_d	Conductividad eléctrica de la dispersión gas-líquido, $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$

k_l	Conductividad eléctrica de la fase líquida, $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$
L	Longitud de la celda de conductividad
N_d	Numero de dispersión
N_{Re}	Número de Reynolds
ΔP	Caída de presión en el dispersor de gas
Q_g	Flujo volumétrico de gas, $\text{volumen}\cdot\text{tiempo}^{-1}$
Q_l	Flujo volumétrico de líquido, $\text{volumen}\cdot\text{tiempo}^{-1}$
Re_b	Numero de Reynolds de la burbuja
Re_s	Numero de Reynolds del enjambre de burbujas
S_b	Área superficial de flujo de burbujas, s^{-1}
U_t	Velocidad terminal de la burbuja, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
U_{sb}	Velocidad relativa entre la fase gas y la fase líquida, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
V	Velocidad superficial, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$

LISTA DE SÍMBOLOS GRIEGOS

ϵ_g	Fracción volumétrica de gas retenido
μ_l	Viscosidad de la fase líquida, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
μ_{sl}	Viscosidad de la pulpa mineral, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
ρ_g	Densidad de la fase gaseosa, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ρ_l	Densidad de la fase líquida, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ρ_{sl}	Densidad de la pulpa mineral, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
σ	Tensión superficial, $\text{dina}\cdot\text{cm}^{-1}$

RESUMEN

Actualmente los sistemas de procesamiento de materiales que involucran dispersiones de gas tienen un gran número de aplicaciones (concentración de minerales, recuperación de suelos, limpieza de efluentes, destintado de papel, entre otros), donde es evidente la transferencia tecnológica desde las operaciones unitarias de procesamiento de minerales hacia el área de remediación ambiental.

La eficiencia de estos procesos depende en gran medida del tamaño de las burbujas y de las otras dos características de la dispersión (volumen de gas retenido y área superficial de burbujas). Por lo anterior, es importante desarrollar procedimientos que permitan diseñar y controlar las características de la dispersión de manera tal que las relaciones sólido-gas, líquido-líquido y líquido-gas sean eficientes.

En este trabajo de investigación se caracterizaron tres dispersores de burbujas de gas tipo ventury o de vena contracta, con la finalidad de obtener un modelo matemático que diseñe o prediga el diámetro promedio de burbuja en sistemas de flotación aire-agua, tomando en cuenta las características dimensionales del dispersor, las variables de operación del sistema y las propiedades físicas y químicas de las fases continuas (líquido) y dispersa (burbujas de aire).

Los datos para obtener el modelo de regresión se obtuvieron experimentalmente en una columna de 7.5 cm de diámetro y 300 cm de altura. El modelo de regresión lineal se validó con información experimental obtenida en una columna escala piloto de 50 cm de diámetro y 300 cm de altura.

Los resultados experimentales muestran que es posible controlar y predecir el tamaño de burbuja (con un error menor al 10%), producidas en un sistema de flotación aire-agua. El modelo matemático lineal y empírico propuesto predice el tamaño promedio de burbujas a partir de la relación de diámetros del dispersor externo tipo ventury, la velocidad superficial de gas, la velocidad superficial de líquido, la viscosidad del líquido y la tensión superficial del medio:

$$d_b = 0.0255 + 0.00737 J_l - 0.451 J_g - 0.0267 \left(d_M / d_m \right) + 0.00451 \sigma \\ - 0.000469 \left[\frac{8 \Delta_\rho Q_g^2}{g \pi^2} \left[\frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4} \right] \right]$$

La simplicidad en este procedimiento de diseño de burbujas en la práctica puede garantizar, en dado caso, una transferencia tecnológica relativamente simple para la aplicación de la técnica en la industria.

Palabras clave: columna de flotación, dispersor tipo ventury, diámetro de burbuja, modelación empírica.

ABSTRACT

Currently the material processing systems involving gas dispersions have a large number of applications (concentration of minerals, soils recovery, waste water treatment, deinking paper, and so on.), where technological transfer is evident from the unit operations of mineral processing to the area of environmental remediation.

The efficiency of such processes depends heavily on the bubble size and other characteristics of the dispersion (gas holdup and bubble surface area flux). Therefore, it is important to develop methods that allow to design and control the dispersion characteristics in such a way that the solid-gas, liquid-liquid and liquid-gas ratios be efficient.

In this research three gas spargers (venturi type) were characterized in order to obtain a mathematical model to design or predict the average bubble diameter in a two phase flotation system, taking into account the dimensional characteristics of the gas disperser, operating variables of the system and the physical and chemical properties of continuous (fluid) and dispersed (air bubbles) phases.

From a set of experiments run in a column lab (7.5 cm in diameter and 300 cm high) a regression model was obtained. The linear regression model was validated with data obtained by running experiments on a pilot column (50 cm in diameter and 300 cm high).

The experimental results show that it is possible to control and predict the bubble size (with an error up to 10%), produced in an air-water floating system. The proposed mathematical and empirical linear model predicts the average size of bubbles by knowing both the outer and inner diameters of the venturi type disperser, gas superficial velocity, the superficial velocity of liquid, the liquid viscosity and surface tension of the liquid media, according to:

$$d_b = 0.0255 + 0.00737 J_l - 0.451 J_g - 0.0267 \left(d_M / d_m \right) + 0.00451 \sigma \\ - 0.000469 \left[\frac{8 \Delta \rho Q_g^2}{g \pi^2} \left[\frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4} \right] \right]$$

The simplicity of designing bubbles through this method may ensure in practice, in such case, a relatively simple technology transfer or application of the technique in the industry.

Keywords: flotation column, disperser venturi, bubble diameter, empirical modeling.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los recursos minerales continúan siendo absolutamente vitales para el desarrollo de las sociedades y economías contemporáneas, partiendo de la propia necesidad de satisfacción de las necesidades básicas. El uso actual de minerales y materias primas procedentes de la actividad minera, es la base a partir de la cual se obtienen la mayoría de los productos de consumo y elementos de infraestructura disponibles en una sociedad.

En el procesamiento de minerales hay dos operaciones fundamentales principalmente la liberación o separación de los minerales valiosos de los minerales de desecho o ganga y la concentración de esos valores (mena).

El proceso de flotación de minerales constituye uno de los métodos de concentración de minerales que más se usa. La gran mayoría de los minerales de interés económico pueden y son beneficiados con esta tecnología [1] . Hoy en día es el método más importante para la concentración mecánica tanto de minerales como de efluentes. Ha permitido la explotación de yacimientos complejos y de baja concentración e incluso residuos de plantas de procesado que utilizan técnicas menos eficientes; los cuales habrían sido dejados como marginales sin la ayuda de la flotación.

La flotación es un proceso de gravedad modificado en el que el mineral metálico finamente molido se mezcla con un líquido. El metal o compuesto metálico suele flotar, mientras que la ganga se va al fondo; en algunos casos ocurre lo contrario. En la mayoría de los procesos de flotación se emplean aceites u otros agentes tenso activos para ayudar a flotar al metal o a la ganga [2].

La concentración por flotación es el resultado de la interacción de muchas variables, que involucran factores químicos, operacionales e hidrodinámicos. Especial atención se ha puesto en la dispersión de gas, la que se considera un factor clave en el proceso.

Las burbujas de aire transportan los sólidos a la superficie donde son recolectados y recuperados como concentrado. La fracción que no se adhiere a las burbujas permanece en la pulpa y constituye la cola o desechos. De este modo, la condición de flotabilidad es una fuerte

adhesión entre las partículas útiles y las burbujas, las cuales deben ser capaces de soportar la agitación y turbulencia en la celda. Estas partículas se dicen hidrofóbicas (no mojables por el agua), al contrario de las partículas que constituyen la cola, que son hidrofílicas (mojables por el agua).

El tamaño de las burbujas y su estabilidad dependerán de la cantidad de surfactante o espumante agregado; con un aumento de la cantidad de espumante disminuirá el diámetro de las burbujas, hasta llegar al punto de límite de solubilidad del surfactante, donde el aumento en su adición no representa la disminución del tamaño de la burbuja [2].

El tamaño de las burbujas producidas depende de algunas variables de operación del sistema, tales como la velocidad superficial de gas (J_g), la velocidad superficial de líquido (J_l), y la concentración de surfactante; así como de algunas propiedades fisicoquímicas del sistema, como son la viscosidad del líquido (μ), densidad del gas (ρ_g), densidad del líquido (ρ_l) y la tensión superficial (σ); además de las características dimensionales del dispersor. Todo esto puede ser expresado en un modelo matemático, mediante el cual sea posible predecir el tamaño de burbuja.

Un modelo matemático es uno de los tipos de modelos científicos que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad. se puede decir que es una descripción, en lenguaje matemático, de un objeto que existe en un universo no-matemático

1.1 Justificación

La importancia de la concentración por flotación, desde el punto de vista de la industria minera, es que cada vez la mayoría de los minerales metálicos son más difíciles de obtener y se encuentran en una menor cantidad dentro la naturaleza. Por otra parte el proceso de flotación también puede ser empleado para la recuperación de suelos, limpieza de efluentes contaminados por metales pesados, destintado de papel, entre otros.

Las características de la dispersión de gas juegan un papel crucial en la eficiencia metalúrgica de un proceso de flotación; por lo tanto, es importante dependiendo del tipo de difusor que se utilice, entender el fenómeno de formación de las burbujas, así como los factores que afectan su tamaño. Lo anterior, para estar en condiciones de diseñar burbujas para aplicaciones específicas de flotación en celdas o columnas que sean eficientes para la concentración de minerales.

1.2 Hipótesis

Se parte del conocimiento que la energía cinética generada internamente en un dispersor tipo ventury o de vena contracta, al liberarse es transformada en energía potencial, lo que genera la nube de burbujas.

El modelado matemático de esta relación de energías, junto con el conocimiento de las características fisicoquímicas del medio acuoso (viscosidad, tensión superficial), permitirá el diseño o control de las características de las burbujas al utilizar un dispersor tipo ventury.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Encontrar una relación entre las energías cinética y potencial del dispersor tipo ventury, y las propiedades fisicoquímicas (tensión superficial, viscosidad) de un sistema acuoso, y las características dimensionales del dispersor (d_M/d_m) para controlar el tamaño de burbuja que se genera en la dispersión del gas.

1.3.2 Objetivos Particulares

- Obtener información experimental utilizando una columna de flotación de laboratorio de 7.5 cm de diámetro por 300 cm de altura, de las variables operativas y fisicoquímicas del medio que permitan la modificación de las características de la dispersión.
- Modelar matemáticamente el dispersor tipo ventury de acuerdo a sus energías cinética y potencial en un medio acuoso.
- Escalar el modelo matemático obtenido de la experimentación hecha en la columna de flotación de laboratorio en la columna piloto de 50 cm de diámetro por 300 cm de altura.
- Realizar los ajustes de la relación del modelo matemático con los resultados obtenidos en una columna piloto de 50 cm de diámetro por 300 cm de altura.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

2.1 Proceso de flotación

La flotación es una operación unitaria; es decir, un método de tratamiento en el que toman lugar fenómenos físicos y químicos, que se emplea para la separación de especies hidrófobas e hidrófilas dispersas en una fase líquida.

La separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas, por la general aire, en la fase líquida. Las partículas con superficie hidrófoba se adhieren a las burbujas, y la fuerza de flotación que experimenta en conjunto la burbuja y partícula hace que asciendan hasta la superficie del líquido, siempre y cuando la densidad relativa del agregado burbuja sólido sea menor que la densidad de la pulpa.

Cuando se procesan sólidos, estos tienen que ser previamente triturados y molidos con la finalidad de liberar las especies que los constituyen y aumentar el área superficial. En caso de que la especie de interés no sea hidrófoba, se agregan reactivos químicos que se adsorben selectivamente en las partículas, modificando su superficie, haciendo de esta manera que las partículas de interés adquieran un carácter hidrófobo y puedan ser flotadas. Estos reactivos son conocidos como colectores; este proceso de modificación de la superficie hidrófila o hidrófoba, con los reactivos de flotación, depende de las características de pH de la pulpa, lo que determina la polaridad del potencial.

Las especies hidrófobas ascienden a la superficie del líquido adheridas a las burbujas de gas, en donde se aglomeran formando una espuma o concentrado de la sustancia flotada. Esta espuma puede ser separada por métodos mecánicos o por gravedad.

Jameson y colaboradores reportan que en el proceso de flotación, el tamaño de burbuja (d_b), juega un papel muy importante, ya que de él depende la constante cinética del proceso (k_1) como se muestra en la ecuación 2.1 [3], donde d_p representa el diámetro de partícula:

$$k_1 \propto \frac{d_p^2}{d_b^{2.67}} \quad (2.1)$$

Por lo tanto, se puede concluir que el control de tamaño de burbuja permitiría un control de la cinética del proceso de flotación, y consecuentemente, de la eficiencia de este.

2.2 Celdas de flotación

La celda mecánica (Fig. 2.1), está constituida por un depósito en forma de paralelepípedo o forma cúbica, de distintas capacidades, con un mecanismo rotor-estator para la dispersión del sólido y el aire. Algunos reportes mencionan la existencia de dos zonas de burbujeo [4, 5], en las celdas de flotación, se pueden distinguir tres zonas típicas:

- Una zona de alta turbulencia, a nivel del mecanismo de agitación.
- Una zona intermedia.
- Una zona superior.

En la zona de alta turbulencia o zona de agitación se producen los choques para la adhesión partícula burbuja. En esta zona deben existir las condiciones hidrodinámicas y fisicoquímicas que favorezcan este contacto.

La zona intermedia se caracteriza por ser una zona de relativa calma, lo que favorece la migración de las burbujas hacia la parte superior de la celda.

La zona superior corresponde a la fase espuma, está formada por burbujas separadas por finos canales de pulpa. La pulpa descarga por rebalse natural, o con la ayuda de paletas mecánicas.

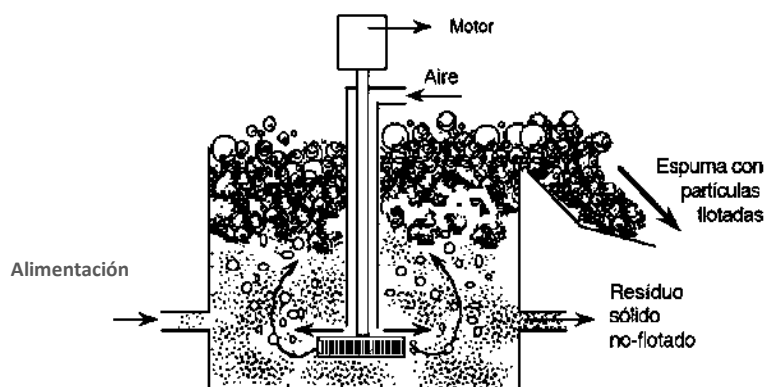


Figura 2.1. Celda de flotación

Las funciones más importantes de las celdas de flotación son:

- Mantener todas las partículas, aún las más gruesas o las más densas, en suspensión dentro de la pulpa. Para conseguir lo anterior, la pulpa debe ser mezclada o sometida a circulación dentro de la celda a altas velocidades, de modo de superar las velocidades de sedimentación de las partículas más gruesas.
- La aireación, que involucra la diseminación de finas burbujas de aire dentro de toda la celda.
- Promover la colisión entre las partículas de mineral y las burbujas de aire, con la finalidad de permitir la adhesión selectiva y el transporte de las partículas de mineral deseado en la columna de espuma.
- Mantener la pulpa en condiciones de quietud, inmediatamente debajo de la columna de espuma. Las celdas se diseñan de modo de prevenir la turbulencia en las cercanías de la espuma, puesto que produce una pérdida de estabilidad de la espuma y baja la recuperación.
- Proveer un eficiente transporte de la pulpa alimentada a la celda y de la salida del concentrado y del relave desde el circuito.
- Proveer un mecanismo de control de: la profundidad de la pulpa y la profundidad de la columna de la espuma; la aireación de la celda e idealmente del grado de agitación de la pulpa.

2.3 Columnas de flotación

En las columnas de flotación la alimentación es inyectada a aproximadamente $\frac{2}{3}$ de altura de la columna, el concentrado sale por la parte superior de la celda, mientras que, la cola o relave se recoge por la parte inferior de la columna.

En una columna de flotación el aire se introduce por el fondo a través de dispersores de gas y la alimentación se introduce por la parte superior, a aproximadamente un tercio de la altura total de la columna. La Figura 2.2 representa una columna de flotación, con sus principales componentes [6].

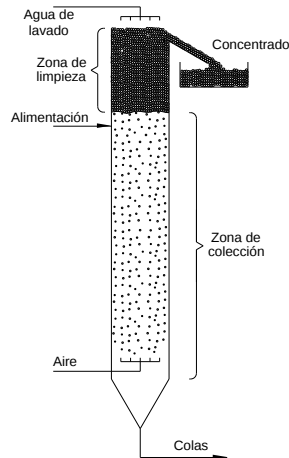


Figura 2.2. Columna de flotación

Las variables operacionales más importantes de una columna de flotación son las siguientes:

- Flujo de aire.
- Agua de lavado.
- Altura de la espuma.
- Tiempo de residencia de la pulpa.
- Bias y control.
- Porcentaje de sólidos en la alimentación.

Hay tres aspectos en el diseño que distinguen las columnas de flotación de las celdas mecánicas:

- El agua de lavado (adicionada al tope de la columna).
- La ausencia de agitación mecánica.
- El sistema de generación de burbujas de aire.

2.4 Dispersores de gas

El diseño de los dispersores de gas utilizados en los procesos de flotación tiene una influencia decisiva en la distribución de los tamaños de burbuja producidos y, consecuentemente, en la fracción de gas retenido, el área interfacial y la velocidad de flotación [3].

La eficiencia de un sistema gas-líquido está definida por la manera como se dispersa el gas en el líquido. Por ejemplo, en una columna de flotación, el tamaño de las burbujas y su distribución varían con la altura, debido a la coalescencia y ruptura de las burbujas [6]. Las principales propiedades que presentan las dispersiones gas-líquido son el tamaño de la burbuja, la fracción de gas retenido y la velocidad de flotación. El factor principal que determina estas propiedades es el tipo de dispersor de gas, sin embargo, esto es válido a flujos de gas bajos [7].

Estos a su vez se dividen de manera muy general en dispersores internos y dispersores externos.

2.4.1 Dispersores internos

Estos a su vez, se pueden dividir en perforados y porosos.

Los dispersores de tubos perforados deben ser diseñados de tal manera que la caída de presión entre cada orificio sea mayor a la caída de presión a lo largo de todo el dispersor; en caso contrario, es posible que los orificios más lejanos a la alimentación del gas no funcionen de manera adecuada.

Los dispersores porosos producen fracciones de gas retenido mayores a las generadas por dispersores perforados [8]. Esta es una de las razones por las cuales los dispersores porosos eran utilizados con mayor frecuencia en columnas de flotación. Hoy en día, las columnas de flotación se operan con inyectores de gas tipo tobera.

2.4.2 Dispersores externos

El término externo se refiere al hecho de que el gas y el líquido que va a ser procesado entran en contacto fuera del equipo de dispersión. Una vez que se ha generado la dispersión gas-líquido, ésta se alimenta a la parte inferior del equipo. Este tipo de dispersores tiene la ventaja de que su mantenimiento es sencillo, en comparación con los internos, además de que existe una menor probabilidad de oclusión del dispersor [3].

2.5 Dispensor tipo ventury o vena contracta

El dispensador tipo ventury también es conocido como de “vena contracta”. De la Figura 2.3, se deduce que al alimentar la pulpa (sección A), junto con aire comprimido (sección C), el sistema busca su equilibrio mecánico y la reducción del diámetro en la parte central del dispensador incrementa la energía, de forma que aumenta la presión dentro del mismo.

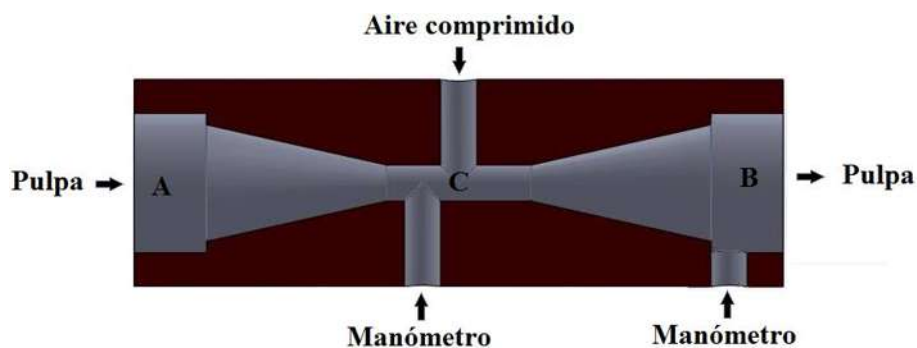


Figura 2.3. Representación esquemática de un dispensador tipo ventury para generar nubes de burbujas de manera externa a las columnas de flotación

El flujo de la pulpa y el aire a través del dispositivo prosigue y al pasar por la expansión del dispensador (punto B), la energía liberada se convierte en burbujas de aire. En este instante del proceso, las burbujas generadas atrapan las partículas de la especie (mineral o no mineral) que se encuentran en la pulpa y que se desea separar.

De lo anterior se concluye que al incrementar el flujo de pulpa, así como el flujo de aire comprimido a través del ventury, se aumenta el número de burbujas que representan más capacidad del sistema para capturar y separar una determinada especie. A la nube de burbujas acumuladas en cierta sección de la celda se le conoce como fracción volumétrica de gas y se denomina mediante ε_g .

La ley de conservación de la energía puede ser expresada para fluidos, en el caso del flujo medio por la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 + \frac{\Delta P}{\rho} \quad (2.2)$$

Como la pérdida de presión es insignificante $\frac{\Delta P}{\rho} = 0$

Como $gZ_1 = gZ_2$

Entonces tenemos

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} \quad (2.3)$$

ordenando los términos y haciendo la diferencia de presiones obtenemos

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} = 0 \quad (2.4)$$

Donde ΔP es la caída de presión entre el punto A y C del dispersor (gr/cm²; cm H₂O), ρ es la densidad de la pulpa (gr/cm³), V_1 y V_2 las velocidades superficiales en los puntos A y C, respectivamente (m/s; cm/s), g es la aceleración de la gravedad (m/s²), y Z_1 y Z_2 son la altura sobre el nivel de referencia (m, cm).

De la ecuación de continuidad:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (2.5)$$

Siendo A_1 y A_2 las áreas transversales en los puntos A y C respectivamente (m², cm²). Considerando que el flujo superficial J_g (m/s; cm/s) es la relación entre el flujo volumétrico Q_g (m³/min; cm³/s) de pulpa alimentada al dispersor y el área transversal:

$$J_g = \frac{Q_g}{A} \quad (2.6)$$

Y el área transversal de una sección circular:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.7)$$

Donde d es el diámetro de la sección transversal, despejando la caída de presión de la ecuación de Bernoulli y sustituyendo la ecuación (2.7) en la (2.6) y está en la ecuación de Bernoulli (2.4), el resultado es la expresión que relaciona la caída de presión dentro del dispersor debido al flujo de pulpa a través del mismo:

$$\Delta P = \frac{8 \Delta \rho Q_g^2}{\pi^2} \left[\frac{1}{d_m^4} - \frac{1}{d_M^4} \right] \quad (2.8)$$

Correspondiendo d_M y d_m a los diámetros en las secciones circulares de los puntos A y C respectivamente.

2.6 Proceso de flotación

Los procesos de flotación son usados para separar o concentrar minerales y otras especies químicas. La separación por flotación es el resultado de muchos procesos físico-químicos complejos que ocurren en las interfases sólido-líquido, líquido-gas y sólido. La flotación depende de la probabilidad de unión de la partícula a la burbuja en la celda de flotación, la cual es determinada por la hidrofobicidad de la superficie de la partícula. En la mayoría de los sistemas de flotación, la superficie de la partícula se torna hidrofóbica por la adsorción selectiva de los surfactantes llamados colectores.

La flotación es una técnica de concentración que aprovecha la diferencia entre las propiedades superficiales o interfaciales del mineral, o especies de valor, y la ganga. Se basa en la adhesión de algunos sólidos a burbujas de gas generadas en la pulpa por algún medio externo, en la celda de flotación.

Las aplicaciones de la flotación se pueden dividir en dos grupos: aplicaciones minerales y no minerales.

- Aplicaciones minerales: Con el uso de este proceso se concentran principalmente minerales de los siguientes elementos: cobre, molibdeno, plomo, zinc, hierro, oro, plata, níquel, tungsteno, litio, estaño, carbono (grafito, diamantes), etc.
- Aplicaciones no minerales: La flotación también es utilizada para el tratamiento de aguas residuales (eliminación de materia suspendida y concentración de lodos biológicos), en el reciclado de papel (flotación de tinta del papel), tratamiento de suelos (remoción de pesticidas, aceites y elementos radioactivos) y en flotación de iones disueltos en agua.

2.7 Propiedades de la burbuja

Una burbuja es un glóbulo de gas o vapor rodeado por una masa de líquido o una película delgada de líquido. En general, las burbujas pueden ser originadas de tres fuentes:

- Pueden formarse por la despresurización del gas de una solución.
- Por la descomposición de un componente en el líquido.
- Pueden ser producidas al introducir un gas directamente en el líquido mediante un dispersor.
- Pueden ser resultado de la desintegración de burbujas de mayor tamaño presentes en el líquido.

En general, es bien conocido que un gas que pasa a través de un orificio o de un material poroso, como efecto de fuerzas viscosas y de tensión superficial actuando sobre el sistema, no puede mantenerse como una fase continua, donde sólo es posible a números de Reynolds muy altos. La discontinuidad de la fase gas genera burbujas.

En dispersores de gas, la formación de burbujas se puede clasificar de dos formas distintas:

- Formación en un sólo orificio. La formación de burbujas en un orificio o en un capilar sumergido en un líquido ha sido caso de estudio de muchos trabajos experimentales y teóricos [3].
- Formación en orificios múltiples. En un dispersor poroso aumenta la probabilidad de que exista coalescencia (es decir, que las burbujas tienen la tendencia a chocar y unirse entre sí y formar, de esta manera, burbujas de mayor tamaño) debido a la cercanía entre los poros del dispersor. A altas velocidades de flujo de gas, la probabilidad de que exista coalescencia aumenta. Cuando se tienen burbujas muy pequeñas (como las originadas con un dispersor hecho de material sinterizado), es un hecho que existirá coalescencia.

2.7.1 Velocidad de flotación

Una vez que una burbuja se ha formado en el líquido, comienza a elevarse, debido a las fuerzas de flotación. La velocidad de flotación terminal de una burbuja en una dispersión gas-líquido es uno de los parámetros que definen el tiempo de residencia del gas y, por lo tanto, la eficiencia del proceso.

Hay diversos factores que afectan la velocidad de flotación, tales como el tamaño y forma de burbuja, la tensión superficial, la viscosidad y densidad del líquido, el movimiento del líquido, temperatura y presión del sistema. A medida que disminuye el tamaño de una burbuja, la

velocidad de flotación disminuye. La velocidad de flotación es inversamente proporcional a la presión del sistema.

2.7.2 Fracción de gas retenido

La fracción de gas retenido $\mathcal{E}_g$ es la relación del volumen de las burbujas de aire con respecto al volumen de la dispersión aire-líquido [9]. Generalmente se expresa en porcentaje volumen.

La fracción de gas retenido juega un papel fundamental en el diseño de un equipo de dispersión gas-líquido. La fase gas se mueve en la dispersión en uno de los dos regímenes existentes: laminar y turbulento, dependiendo del número de Reynolds.

Si la fracción de gas retenido es baja, la transferencia de masa disminuye, debido a que existe poca área superficial de las burbujas para realizar el transporte de masa. Con fracciones de gas retenido mayores, se tiene una superficie de transferencia grande, y de esta manera, de incrementa la eficiencia de colección. Sin embargo, una fracción de gas retenido alta debe evitarse porque disminuye el volumen útil del equipo de dispersión. La fracción de gas retenido no puede ser calculada a partir de correlaciones empíricas, por lo que debe ser estimada en cada equipo de contacto gas-líquido.

2.7.2.1 Método de conductividad eléctrica para medir la fracción de gas retenido local

La conductividad eléctrica es la propiedad natural que cada cuerpo posee para que los electrones pasen por él. La conductividad eléctrica de un material es una propiedad intensiva; es decir, no depende de la cantidad de materia del sistema. La conductividad eléctrica es la constante de proporcionalidad en la ley de Ohm, la cual especifica que el flujo de corriente en cualquier parte de un sistema es proporcional al gradiente de potencial, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$i = -k\nabla V \quad (2.9)$$

En donde i es la densidad de corriente (A/cm^2), ∇V es el gradiente de potencial (volt/cm), y k es la conductividad eléctrica (mS/cm).

La conductividad eléctrica tiene las unidades de Siemens (S) por unidad de longitud, de acuerdo con el SI, las unidades de la conductividad eléctrica es S/m.

Se han propuesto varios modelos para describir el comportamiento de sistemas multifase. El modelo de Maxwell ha mostrado un buen desempeño al predecir el comportamiento de la conductividad eléctrica y el gas retenido en una mezcla en procesos de separación de minerales [10]. Maxwell consideró una esfera de una conductividad distinta a la del material circundante, y el efecto del flujo de corriente y del potencia en el material circundante [11].

La determinación de la cantidad de gas presente en una mezcla gas-líquido puede ser determinada a partir de la medición de la conductividad eléctrica de la mezcla, siempre que el líquido y el gas tengan conductividades diferentes [10]. El modelo de Maxwell puede ser aplicado para sistemas de dos fases, en donde la fase dispersa sea no conductora, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_g = \frac{1 - \frac{k_d}{k_l}}{1 + 0.5 \left(\frac{k_d}{k_l} \right)} \quad (2.10)$$

dónde:

k_d es la conductividad eléctrica de la dispersión gas-líquido

k_l es la conductividad eléctrica del líquido

ε_g es la fracción volumétrica de gas retenido

2.7.2.2 Calibración de sensores de conductividad utilizados en dispersiones gas-líquido

Esta clase de sensores miden la conductancia eléctrica K (mS), la cual está relacionada con la conductividad eléctrica k como se observa en la ecuación (2.11) [10].

$$k = KC \quad (2.11)$$

la ecuación (2.11) introduce la constante de celda C (cm^{-1}), la cual, en una celda ideal se define como la relación de la distancia de separación entre los electrodos (L) al área transversal (A) con respecto a la dirección del flujo de la corriente transferida de un electrodo al otro (L/A longitud $^{-1}$). Esta expresión de la constante de celda es denominada constante de celda geométrica [10].

2.7.3 Tamaño

La dispersión de un gas dentro de un equipo de dispersión es un aspecto determinante en el desempeño del sistema gas-líquido. Un sistema ideal debe tener pequeñas burbujas distribuidas de manera uniforme en la sección transversal del equipo para maximizar el área interfacial e incrementar los fenómenos de transporte. El conocimiento de la fracción de gas retenido y del tamaño de burbuja permite la determinación del área interfacial disponible, la cual es muy importante en los procesos de transferencia de masa. En sistemas de dos fases gas-líquido, se considera que la variación de tamaños de burbuja a lo largo de una columna es ocasionada por la coalescencia y ruptura de las burbujas [7].

Es importante mencionar que en la mayoría de los procesos industriales no se manejan condiciones tales que permitan trabajar en el régimen homogéneo de burbujas, por lo tanto, las burbujas no tienen un tamaño único, sino que presentan una distribución de tamaños [3-7]. Hay trabajos que indican la presencia de distribuciones de burbujas con un sesgo positivo, es decir, que la distribución tiene una cola asimétrica hacia los valores mayores; dicho comportamiento es típico de una distribución log-normal.

Dada la gran importancia del tamaño de burbuja en procesos de dispersión, es indispensable conocer su distribución de tamaño; desarrollar un modelo teórico para predecir el tamaño de burbuja en un sistema de inyección gas-líquido es muy complejo, por lo que se opta por desarrollar modelos empíricos [5].

2.7.4 Determinación de diámetro de burbuja

Un flujo tridimensional gas-líquido en un recipiente con agitación tiene una estructura inherentemente fluctuante y además de una naturaleza compleja. Para comprender detalladamente este tipo de sistemas, es necesario medir algunos parámetros locales, como el diámetro de burbuja y la fracción de gas retenido. Sin embargo, la medición del diámetro de burbuja sigue siendo un problema en el área. Posiblemente sea el área menos investigada, y la información existente es escasa. Esta falta de información es debida a la carencia de técnicas de medición adecuadas [3].

Los principales métodos para la determinación del tamaño de burbuja son: fotografías de alta velocidad, tomografías de impedancia eléctrica, sondas de succión capilar, tomografía óptica, sensores endoscópicos ópticos, sondas de capacitancia, y detección acústica pasiva. Existen discrepancias entre las mediciones realizadas por los distintos métodos, relacionadas con la sensibilidad del instrumento utilizado, rapidez de detección, o la interpretación de los datos (tomografías de impedancia eléctrica, sondas de capacitancia, y detección acústica pasiva) [12].

El tamaño de burbuja puede ser representado de varias maneras: diámetro medio (d_{10}), diámetro volumétrico (d_{30}), diámetro superficial (d_{20}), y diámetro Sauter (d_{32}). En la caracterización de tamaños de burbuja, el diámetro promedio Sauter es el más utilizado, ya que representa una relación de área y volumen, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$d_{32} = \frac{\sum d^3}{\sum d^2} \quad (2.12)$$

Para la medición del diámetro promedio de burbuja Escudero, *et al.*[13, 14] Emplearon la técnica fotográfica seguida por un análisis de imágenes. Se construyó una sonda para captura y toma de evidencia fotográfica de nubes de burbujas, fabricada con material acrílico transparente, como se muestra en la Fig. 2.4. Para cada punto experimental se tomaron cuatro fotografías y se midieron al menos 1000 burbujas para calcular el diámetro promedio de burbuja Sauter. Este diámetro que relaciona el volumen y el área de las burbujas se ha encontrado es el que define con mayor precisión una distribución de tamaño de burbujas.

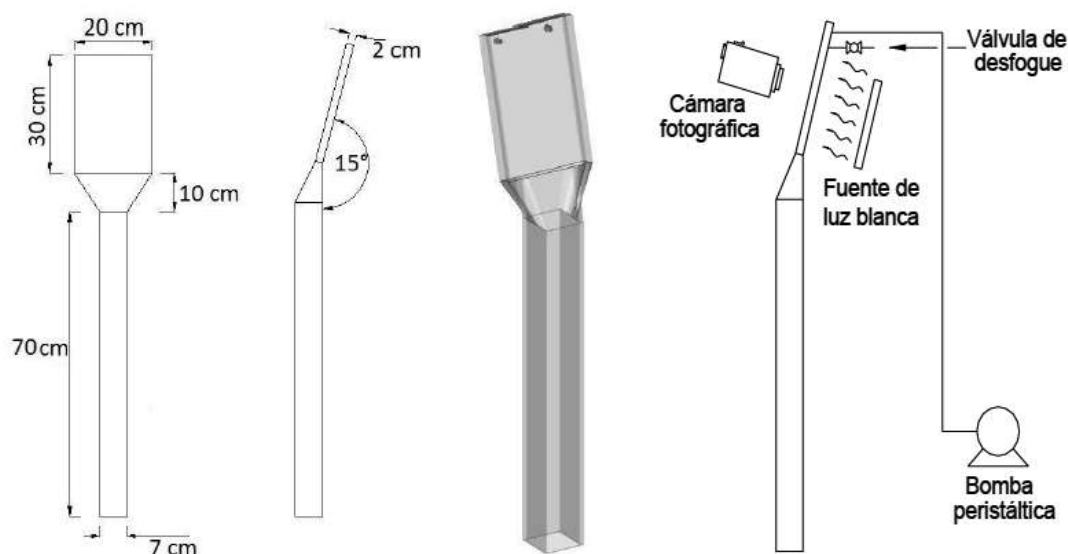


Figura 2.4. Sonda para medir el tamaño de burbuja [14]

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente gráfica, bajo las siguientes condiciones $\sigma = 71.9, 71.3, 70.7, 70.2, 69.4$ dina/cm; $J_g = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3$ cm/s.

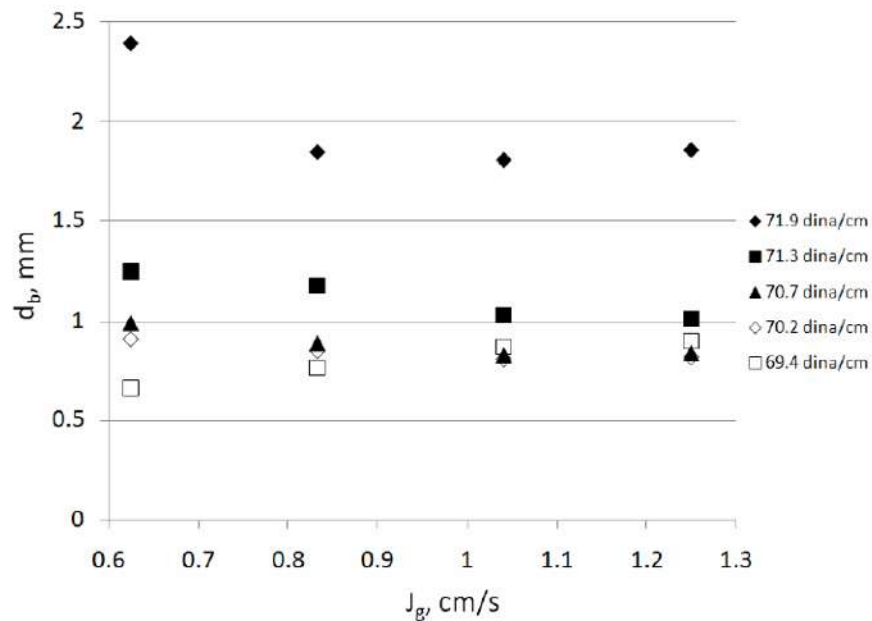


Figura 2.5. Efecto de la velocidad superficial en el tamaño de burbuja en una celda de flotación [14]

La Figura 2.5 muestra el efecto de la velocidad superficial de gas sobre el diámetro de burbuja, esto es más notorio a concentraciones de espumante menores a 15 ppm. Lo cual nos informa que el tamaño de la burbuja que se produce se ve afectado de forma más notoria por la velocidad superficial de gas en el orificio de descarga del inyector.

2.7.4.1 Modelo de arrastre

El modelo de arrastre, de velocidad relativa entre fases o drift-flux, es un conjunto de ecuaciones y una metodología para estimar un diámetro de burbuja promedio en un equipo de flotación [15]. La velocidad relativa (U_{sb}) entre las fases gas (burbujas) y líquido está definida por la ecuación siguiente:

$$U_{sb} = \frac{J_g}{\epsilon_g} + \frac{J_l}{1-\epsilon_g} \quad (2.13)$$

La velocidad relativa U_{sb} se relaciona con la velocidad terminal (U_t) de una burbuja generada en un medio de profundidad infinita y la fracción de gas retenido (ϵ_g) con la siguiente expresión (para ϵ_g menores a 30%):

$$U_{sb} = U_t (1 - \epsilon_g)^{m-1} \quad (2.14)$$

en donde m es función del número de Reynolds de la burbuja (Re_b):

$$m = \left(4.45 + 18 \frac{d_b}{d_c}\right) Re_b^{-0.1} \quad 1 < Re_b < 200 \quad (2.15)$$

$$m = 4.45 Re_b^{-0.1} \quad 200 < Re_b < 500 \quad (2.16)$$

El número de Reynolds de la burbuja se define en:

$$Re_b = \frac{U_t \cdot \rho_{sl} \cdot d_b}{\mu_{sl}} \quad (2.17)$$

Al combinar las ecuaciones (2.13) y (2.14) se obtiene:

$$U_t = \frac{J_g}{\epsilon_g (1-\epsilon_g)^{m-1}} + \frac{J_g + J_l}{(1-\epsilon_g)^{m-1}} \quad (2.18)$$

Algunos autores [16] adaptaron la ecuación que representa la velocidad relativa entre fases y el diámetro de burbuja en un sistema de sedimentación [17] de la manera siguiente:

$$U_{sb} = \frac{g \cdot d_b^2 \cdot (\rho_{sl} - \rho_b)(1 - \epsilon_g)^{m-1}}{18\mu_{sl}(1 + 0.15Re_s^{0.687})} \quad (2.19)$$

El número de Reynolds (Re_s) del enjambre de burbujas se define como:

$$Re_s = \frac{d_b \cdot U_{sb} \cdot \rho_{sl}(1 - \epsilon_g)}{\mu_{sl}} \quad (2.20)$$

Al igualar las ecuaciones (2.14) y (2.18) se obtiene la ecuación:

$$U_t = \frac{\left(\frac{J_g}{\epsilon_g} + \frac{J_l}{(1 - \epsilon_g)}\right)}{(1 - \epsilon_g)^{m-1}} \quad (2.21)$$

ó:

$$U_t = \frac{g \cdot d_b^2 \cdot (\rho_{sl} - \rho_b)(1 - \epsilon_g)^{m-1}}{18\mu_{sl}(1 + 0.15Re_s^{0.687})} \quad (2.22)$$

Para encontrar el diámetro de burbuja promedio es necesario resolver las ecuaciones anteriores de manera iterativa; además, es indispensable conocer algunas propiedades del medio (la densidad de la fase líquida ρ_{sl} y de la fase gas ρ_g , la viscosidad de la fase líquida μ_{sl} ,) así como algunas variables del sistema (velocidad superficial de gas J_g y de líquido J_l , así como la fracción de gas retenido ϵ_g). El algoritmo empleado para la solución de las ecuaciones es el siguiente [15]:

1. Suponer un valor de m
2. Calcular U_{sb} y U_t de las ecuaciones (2.13) y (2.18), respectivamente
3. Suponer d_b
4. Calcular U_{sb} y Re_s de las ecuaciones (2.19) y (2.20), respectivamente
5. Calcular d_b a partir de la ecuación (2.22):

$$d_b = \sqrt{\frac{18\mu_{sl}U_t}{g(\rho_{sl} - \rho_g)}(1 + 0.15Re_s^{0.687})} \quad (2.23)$$

6. Iterar con d_b hasta que la diferencia entre el d_b calculado y el supuesto sea menor a una tolerancia especificada.
7. Calcular m a partir de la ecuación (2.14), (2.15) o (2.16).
8. Iterar con m hasta que la diferencia entre el valor calculado y supuesto de m sea menor a una tolerancia especificada.

2.8 Factores que afectan el tamaño de las burbujas

El tamaño de burbuja está gobernado por muchos parámetros de operación (velocidad del gas a través del orificio de descarga, modo de operación, si el líquido se encuentra estático o en flujo continuo); por propiedades del sistema (dimensiones del orificio, volumen del equipo); y por propiedades fisicoquímicas (viscosidad del líquido, densidad del líquido, tensión superficial).

2.8.1 Velocidad superficial de gas

La velocidad superficial de gas (J_g) se define como el flujo de gas que pasa a través de una sección de área transversal. Este parámetro es muy importante para el diseño de equipos de dispersión, ya que permite comparar equipos de diferentes dimensiones. Un incremento en la velocidad superficial de gas causa que la distribución de burbujas se mueva hacia tamaños más grandes [4].

La velocidad superficial de gas también tiene un efecto directo en la fracción de gas retenido. En el régimen homogéneo, la fracción de gas aumenta proporcionalmente con la velocidad de gas; sin embargo, en el régimen de transición y en el turbulento, el comportamiento de la fracción de gas cambia, como lo demuestra la siguiente gráfica:

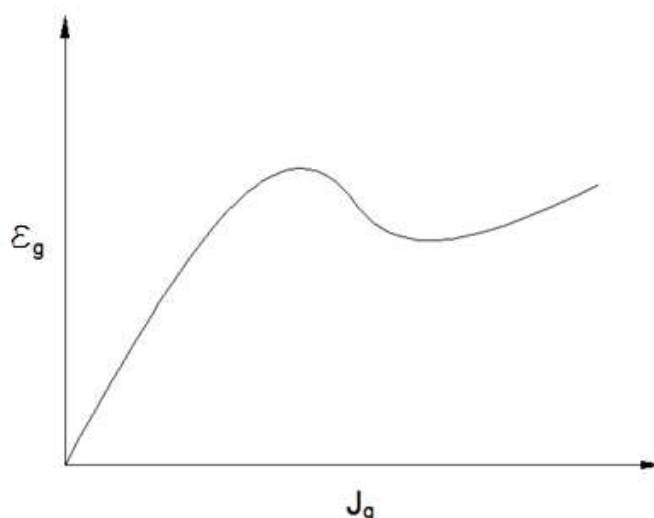


Figura 2.6. Comparación de la fracción de gas retenido con la velocidad superficial de gas [18]

2.8.2 Velocidad superficial del líquido

De manera análoga al flujo de gas, la velocidad superficial de líquido (J_l) se define como el flujo de líquido que pasa a través de una sección de área transversal. En el flujo de burbujeo, el movimiento de la fase líquida tiene un efecto importante en la formación de una burbuja [19]. Si se tiene un flujo de fases en contracorriente, la fuerza de arrastre generada por el líquido provocará que la burbuja se desprenda más rápido que si no hubiera flujo de líquido. Ya que el desprendimiento, y por lo tanto, tiempo de formación de la burbuja es menor, la burbuja producida es de un menor tamaño. Existen reportes [20] que mencionan que algunas burbujas muy pequeñas son arrastradas por las corrientes de líquido; por esta razón, en un sistema de flotación, algunas burbujas pueden ser expulsadas con el flujo de colas.

2.8.3 Presencia de sólidos

Una partícula altamente hidrófoba puede producir coalescencia entre burbujas, incluso si dicha partícula tiene una forma regular, esto causa un decremento en la fracción de gas retenido [21].

La coalescencia es la ruptura de la fina capa existente entre dos burbujas vecinas, lo que resulta en la formación de una sola burbuja de mayor tamaño. Inmediatamente después de que

la película que separa las burbujas se ha roto, la tensión superficial contrae la capa restante [22].

2.8.4 Tensión superficial

En líquidos puros, no es posible formar espuma, debido a que no existe algún mecanismo que retarde el drenado de la fina partícula existente entre burbujas. Sin embargo, cuando se tiene la presencia de moléculas surfactantes, la adsorción en la interface gas-líquido ocasiona que el proceso de drenado se retarde y así se produce un sistema más estable. Se puede concluir que la estabilidad de la espuma y las burbujas se puede relacionar con la tensión superficial [22].

Cuando una sustancia que afecta la tensión superficial de un líquido (sustancia tenso-activa) está presente, ésta se encuentra en una concentración mayor en la interfase gas-líquido que en el seno del líquido [23].

2.8.5 Espumantes

En los procesos de flotación se requiere una amplia variedad de reactivos químicos. Los espumantes o tenso-activadores son utilizados en el proceso de flotación con el objetivo de incrementar la generación de burbujas pequeñas y estabilizar la espuma producida [24]. El espumante controla el tamaño de burbuja en sistemas de flotación al controlar la coalescencia de burbujas [22].

Los espumantes son sustancias cuyas moléculas pueden ser divididas en dos partes: una parte polar y una no polar. La parte polar contiene átomos tales como O, S, N, P, los cuales aparecen en grupos funcionales, por ejemplo un alcohol, tiol, éter, éster, ácido, etc. El grupo no polar está compuesto en general por un hidrocarburo parafínico o aromático. La parte polar tiene afinidad para los solventes polares, particularmente el agua (parte hidrófila), mientras que la parte no polar tiene afinidad para los solventes orgánicos, en particular los hidrocarburos, aceites o grasas, o simplemente está repelida por el agua (parte hidrófoba) [23].

Los espumantes se absorben en la interface gas-líquido, y como consecuencia, se logra una dispersión del gas en el líquido en forma de pequeñas burbujas, y una mayor estabilidad de la espuma; es decir, la presencia de espumantes incrementa la fracción de gas retenido y

disminuye el tamaño de las burbujas [24]. Al incrementar la concentración de espumante, el grado de coalescencia se reduce y el diámetro de burbuja también disminuye; a una concentración de espumante en particular (denominada concentración crítica de coalescencia, CCC), la coalescencia de burbujas se evita totalmente [20].

2.9 Modelado matemático

Simpson y colaboradores [25], llevaron a cabo el desarrollo de modelos matemáticos que permitan estimar los resultados metalúrgicos (ley de concentrado, ley de relaves, razón de enriquecimiento y recuperación) en función de las variables operacionales. El método que emplearon para el desarrollo de los modelos fue Stepwise Regression (Regresión por Pasos) considerando relaciones empíricas entre variables operacionales y los resultados experimentales.

Como resultado obtuvieron que el método de regresión por pasos (Step Wise Regression), es una muy buena herramienta para correlacionar las variables de proceso y para la obtención de modelos empíricos que caracterizan el comportamiento de columnas de flotación.

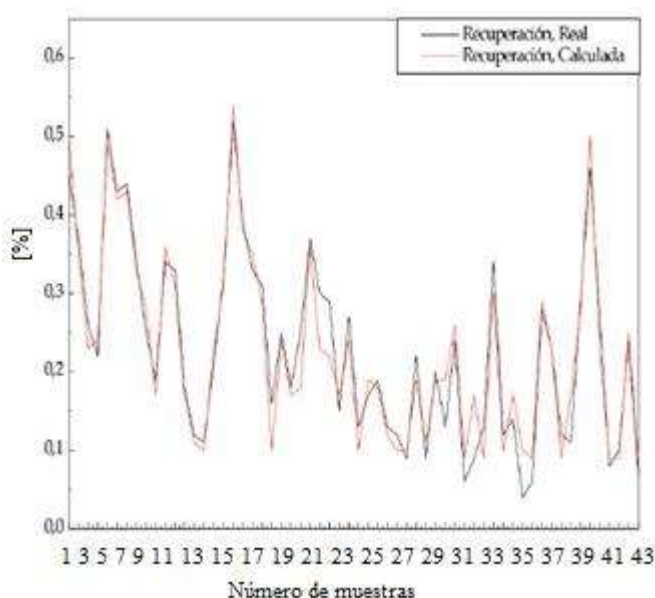


Figura 2.7. Comparación entre la recuperación real y el modelado

Nuevamente Escudero, *et al.*[13] Del tratamiento estadístico de los datos experimentales se deriva la siguiente ecuación lineal de correlación entre el diámetro promedio de burbuja (d_b) y las velocidades superficiales de gas (J_g) y de líquido (J_l), la tensión superficial del medio (σ) y la caída de presión en el dispersor (ΔP). La ecuación para el modelo empírico se presenta a continuación:

$$d_b = -14.47 - 0.033J_g - 0.013J_l + 0.206\Delta P + 0.218\sigma \quad (2.24)$$

La ecuación que obtuvieron muestra que la tensión superficial es la que tiene un mayor peso para la predicción del tamaño de burbuja, seguida por la caída de presión generada en el interior del dispersor empleado.

A continuación se muestra la comparación de los diámetros de burbuja calculados por el modelo y los diámetros de burbuja experimentales, en la cual se aprecia que todos los datos están dentro de un error del 20%.

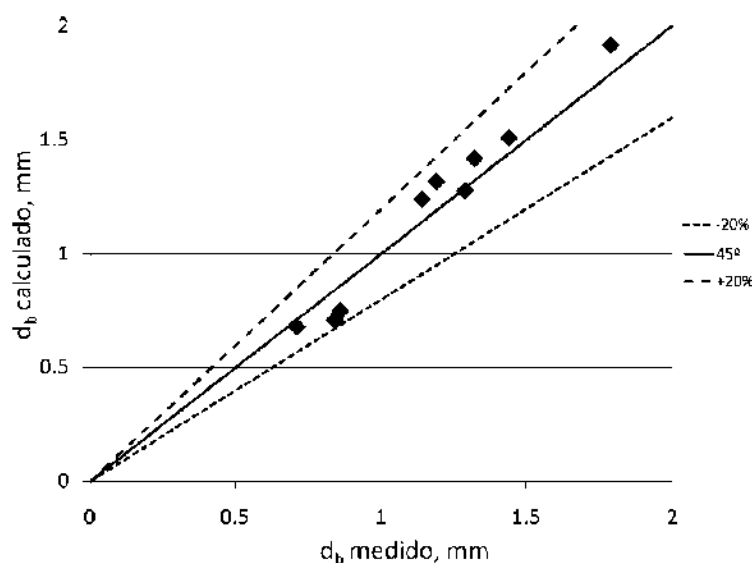


Figura 2.8. Comparación entre los diámetros de burbuja medidos por el método fotográfico y los estimados con el modelo

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se llevaron a cabo experimentos para caracterizar los dispersores externos tipo ventury los cuales fueron operados en sistemas aire-agua, con el objetivo de establecer los parámetros que permitan la modelación matemática de los mismos y así poder predecir el tamaño de burbujas que se generen mediante estos dispersores, bajo las condiciones experimentales aquí tratadas. Las variables de operación que fueron controladas son: flujo volumétrico de gas (Q_g), flujo volumétrico de líquido (Q_l), concentración de surfactante; mientras que las variables de respuesta fueron: el tamaño de burbuja (d_b), la fracción de gas retenido (ϵ_g), la tensión superficial del medio (σ) y la caída de presión (ΔP) generada en el interior del dispersor.

La serie de experimentos se llevaron a cabo en dos columnas de flotación: primero en una columna con un diámetro de 7.5 cm y 300 cm de altura, y la validación del modelo propuesto en otra columna a escala piloto de 50 cm de diámetro por 300 cm de altura. Se construyeron 3 dispersores externos tipo ventury con diferente relación de diámetro (diámetro mayor/diámetro menor = d_M/d_m); cada uno de estos fue instalado en la parte inferior de la columna de 7.5 cm de diámetro; mientras que en la columna a escala piloto solo se instaló el dispersor con la relación d_M/d_m mayor. A continuación se muestra la secuencia experimental (Fig. 3.1).

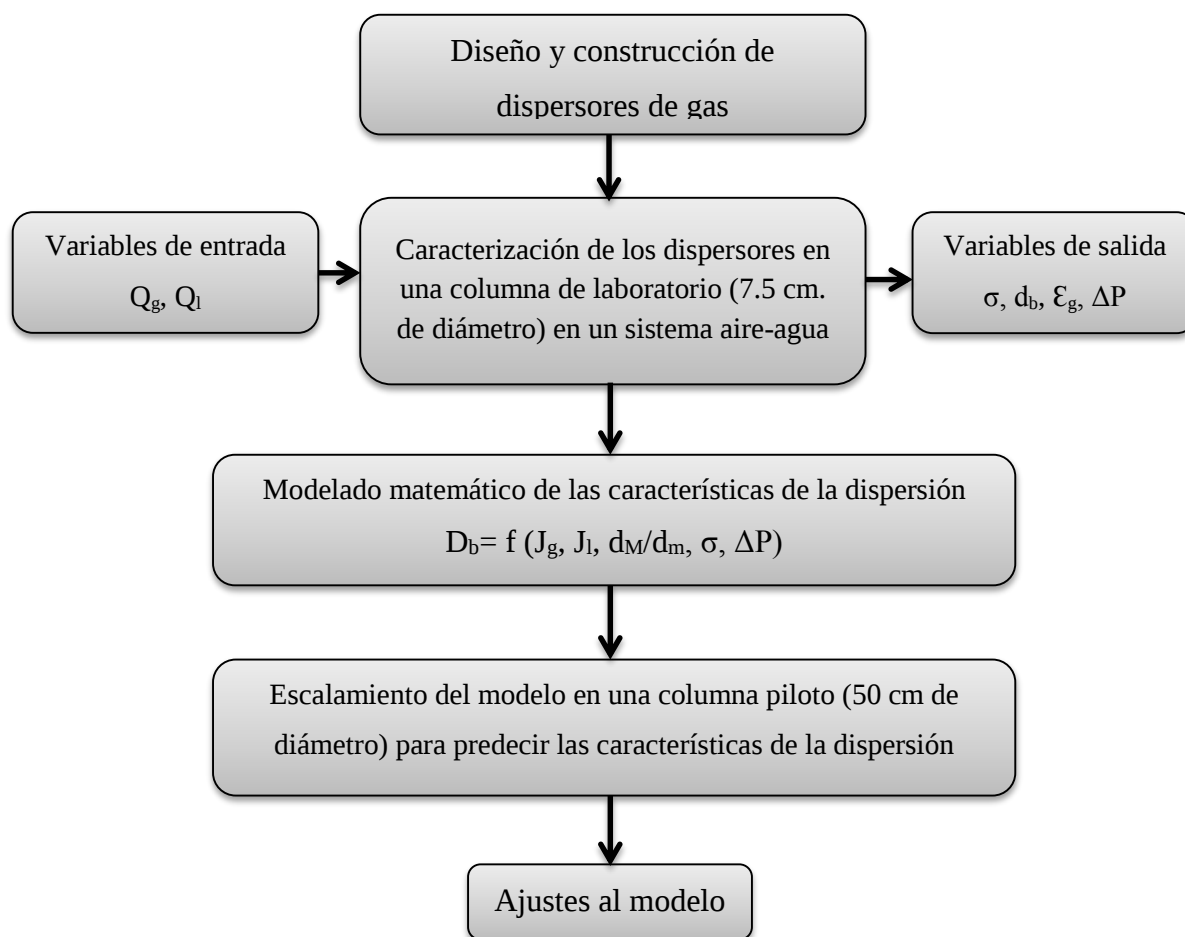


Figura 3.1. Diagrama general del desarrollo experimental

3.1 Material y equipo

La columna de flotación se construyó con tubos de material acrílico transparente, de 7.5 cm de diámetro y 300 cm de altura, desde el fondo hasta el labio del vertedero. Tanto el gas como el líquido fueron inyectados a la columna a través del dispersor externo tipo ventury por la parte inferior de esta. Tal y como se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Columna de flotación de 7.5 cm de diámetro y 300 cm de altura

La fracción de gas retenido fue estimada mediante el uso de un sensor de conductividad, el cual se describe en el Capítulo II. El tamaño de burbuja fue estimado resolviendo el modelo de arrastre conocido como método Drift-Flux.

3.1.1 Construcción de los dispersores de gas tipo ventury

De acuerdo al balance mecánico expresado en la ecuación de Bernoulli (2.8) se diseñaron y fabricaron dispersores tipo ventury, utilizando barras de pvc, variando las relaciones de diámetro mayor (d_M) y diámetro menor (d_m), de manera tal que la presión interna de cada ventury era diferente para un mismo flujo de aire y agua alimentado. La Tabla 3.1 muestra las diferentes relaciones de diámetros experimentados en este trabajo.

Tabla 3.1. Relación de diámetros de los dispersores diseñados para este trabajo

Relación	Diámetro mayor (d_M)	Diámetro menor (d_m)
2	2.54 cm	1.27 cm
2.5	3.81 cm	1.27 cm
3	5.08 cm	1.27 cm

En la parte media de los dispersores, donde se observa el diámetro menor, se realizaron dos orificios, uno para alimentar el aire al mismo y el otro para instalar el transductor de presión, los extremos de cada dispersor (diámetro mayor) se roscaron internamente para conectarlos a la entrada de la columna y para ajustar la alimentación del líquido al ventury. Las siguientes imágenes (Figs. 3.3, 3.4 y 3.5) muestran esquemáticamente el diseño dimensional de cada ventury.

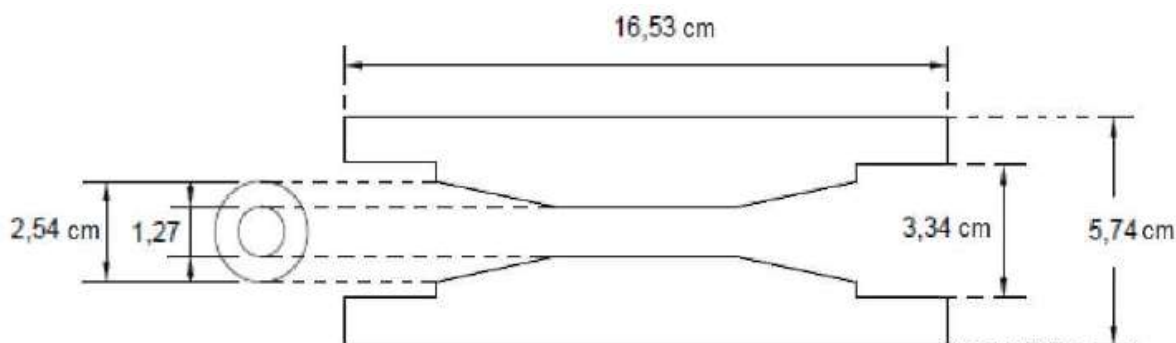


Figura 3.3. Características dimensionales del dispersor externo tipo ventury con relación de diámetro 2

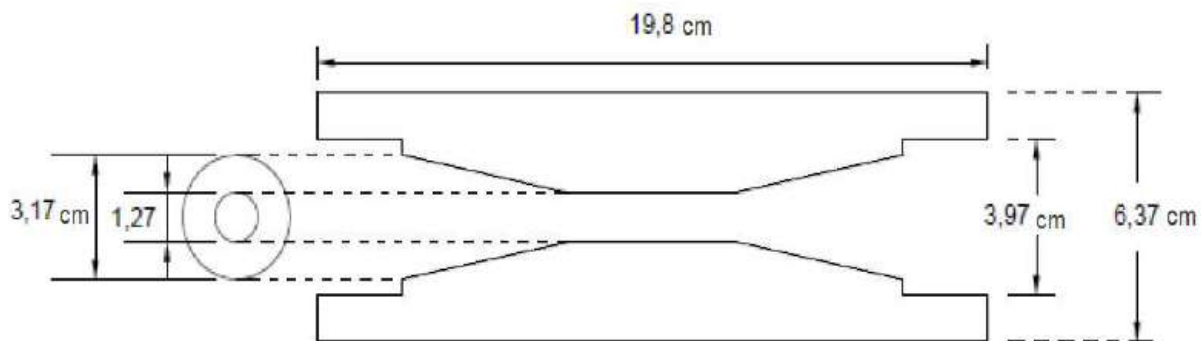


Figura 3.4. Características dimensionales del dispersor externo tipo ventury con relación de diámetro 2.5

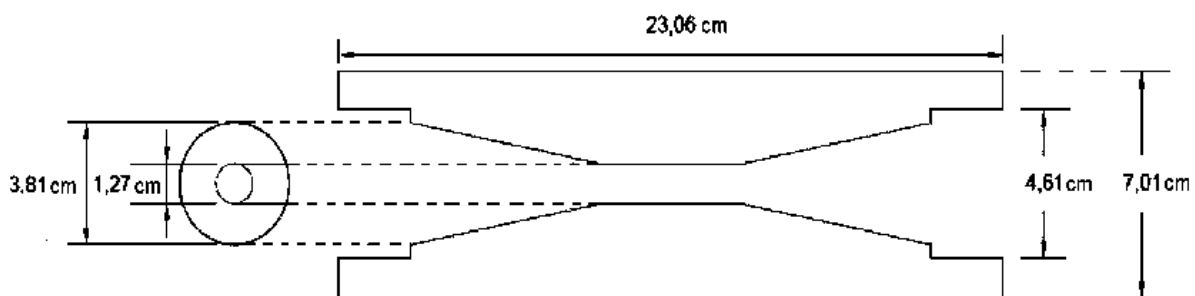


Figura 3.5. Características dimensionales del dispersor externo tipo ventury con relación de diámetro 3



Figura 3.6. Vista isométrica de un dispersor externo tipo ventury

3.1.2 Construcción y calibración del sensor de conductividad

Para calcular la fracción de gas retenido fue construido un sensor de conductividad, el cual se realizó de tubos de acrílico de 0.4 cm de espesor de pared y de 4 cm de diámetro interno. Los electrodos se hicieron con tres anillos de acero inoxidable del mismo diámetro interno que los tubos de acrílico. Mediante este diseño se mantuvo al ras la superficie de los electrodos de acero con la pared de los tubos de acrílico, con el objeto de no modificar la hidrodinámica de las fases continua y dispersa que ingresan al sensor, como se muestra en la Figura 3.7.

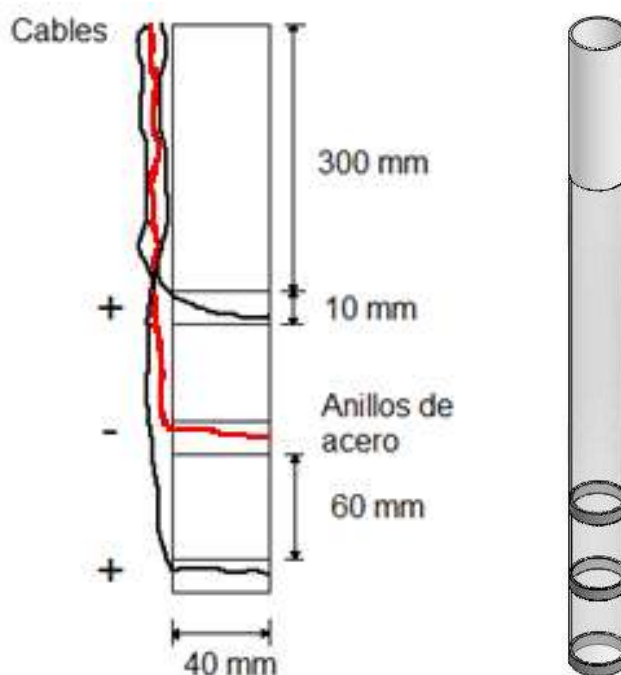


Figura 3.7. Detalles del sensor de conductividad (izquierda), vista isométrica (derecha)

Los electrodos de los extremos del sensor fueron conectados a la misma polaridad, y el electrodo del centro se conectó a la polaridad opuesta, como se muestra en la figura anterior. Con este tipo de conexión, la transferencia de energía eléctrica se lleva a cabo únicamente dentro del sensor. Utilizando este diseño de sensor, las condiciones de flujo eléctrico se aproximan al criterio de campo uniforme del modelo de Maxwell [11], y la constante eléctrica de la celda se mantiene sin variaciones. Además, la transferencia de energía eléctrica se lleva a cabo entre los electrodos de carga eléctrica opuesta, a través de las superficies de isopotencial,

de acuerdo a lo propuesto por Tavera y colaboradores [10], y como se muestra en la Figura 3.8.

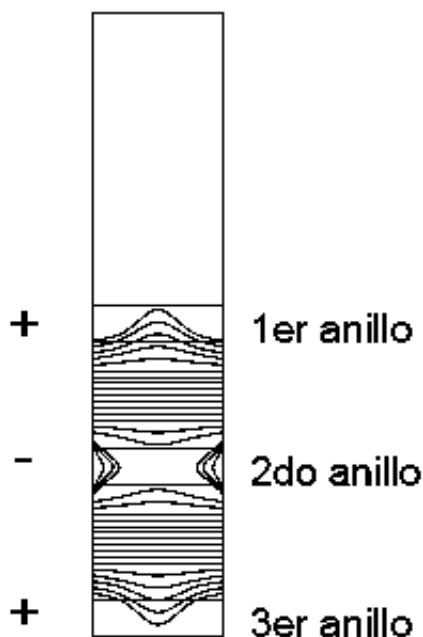


Figura 3.8. Polaridad de los electrodos y superficies isopotencial dentro del sensor

Las mediciones de conductividad se realizaron introduciendo el sensor de forma vertical en la parte superior de la columna de flotación para la dispersión gas líquido y en el recipiente para medir la del líquido; con el objeto de medir la fracción de gas retenido, aplicando el modelo de Maxwell, expresado en la ecuación (2.10).

El sensor de conductividad se calibró eléctricamente mediante la medición de la conductancia de soluciones salinas. Las soluciones acuosas para dicha calibración se prepararon mediante la adición de cantidades de cloruro de potasio (KCl) en agua corriente.

La conductividad eléctrica se midió utilizando un conductivímetro (Hanna HI 8733). La conductancia fue medida con el sensor en las soluciones salinas mencionadas anteriormente, utilizando un conductímetro (Tacussel CDRV62). Con las dos series de datos obtenidas (Conductividad k y Conductancia K) se determinó la constante del sensor, cuya ecuación de calibración se expresa a continuación, para calcular C (constante de celda):

$$C = L / A \quad (3.1)$$

donde L es la distancia entre los anillos y A es el área transversal.

Combinando la ecuación (2.11) y la ecuación (3.1) obtenemos:

$$k = K L / A \quad (3.2)$$

3.2 Caracterización del dispersor en la columna de flotación de laboratorio, en un sistema aire-agua

Se llevaron a cabo una serie de experimentos en la columna de flotación de laboratorio de 7.5 cm de diámetro y 300 cm de alto, en la cual se alimentó tanto el líquido como el aire a través de cada uno de los dispersores tipo ventury contruidos (Fig. 3.9).



Figura 3.9. Instalación de dispersor en la parte inferior de la columna de flotación

Al agua corriente se le adicionó cierto volumen de surfactante (aceite de pino), para modificar su tensión superficial. El líquido fue mezclado en un tanque de 50 cm de diámetro por 70 cm de altura. El líquido acondicionado se alimentó a la columna mediante una bomba centrífuga de marca caudal (modelo CPM1226RB-1A) y controlado mediante un rotámetro de esfera (Cole-Parmer). Por su parte el aire alimentado a la columna a través del dispersor tipo ventury

se midió con un rotámetro de esfera Gilmont Instruments (150 MM), de acuerdo al flujo requerido en cada punto experimental (Fig. 3.10).



Figura 3.10. Rotámetros de esfera para medir los flujos de agua y aire alimentados al dispersor

La caída de presión generada en cada dispersor tipo ventury fue medida y registrada con un transductor de presión manómetro (Ashcroft), Fig. 3.11.



Figura 3.11. Transductor de presión digital utilizado para medir la caída de presión dentro de cada ventury

La organización de los experimentos llevados a cabo, se presentan en la Figura 3.12 (180 experimentos); en la cual se presentan las combinaciones que se realizaron de los dispersores tipo ventury, con las variables controladas (concentración de surfactante, los flujos volumétricos del gas y del líquido), y las variables que fueron medidas en cada experimento (tensión superficial, diámetro de burbuja, fracción de gas retenido y caída de presión generada en el interior de cada dispersor).

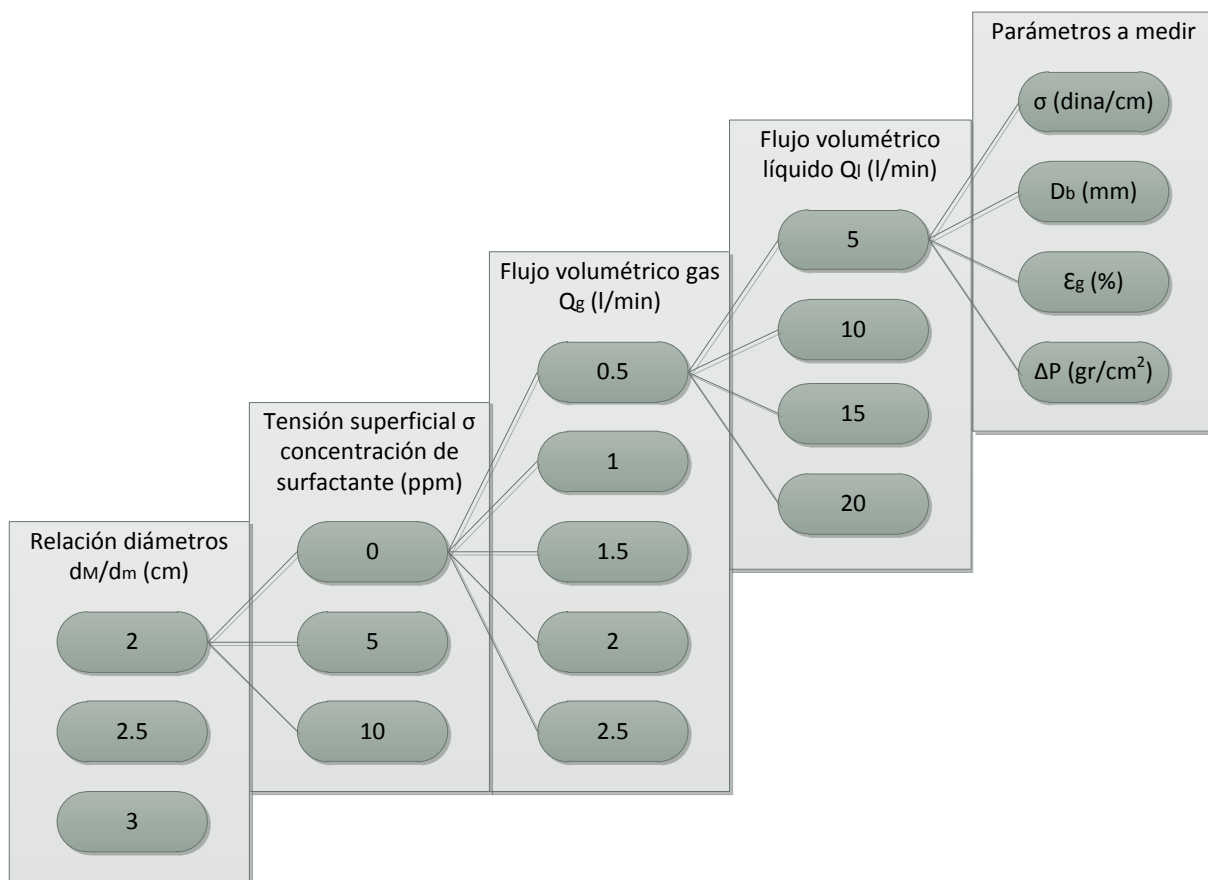


Figura 3.12. Programa experimental realizado en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro por 300 cm de altura

3.2.1 Medición de la tensión superficial

Este parámetro se determinó con la ayuda de un tensiómetro semi automático Cole-Parmer (modelo 59780-90), Fig. 3.13. El equipo consta de un aro de alambre de platino-iridio (el cual se sumerge a la muestra). Se midió la tensión superficial a 100 ml de muestra de líquido de cada punto experimental, de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Nivelar el equipo, mediante el centrado de la burbuja que se encuentra en la base del equipo, una vez colocado el aro de platino-iridio en el tensiómetro.
2. Calibrar el aro con la línea que se encuentra en el espejo, esto mediante la manivela del lado derecho del equipo. Si no coincide la escala, es necesario empatarla con la manija que se encuentra en la parte frontal del equipo.

3. Colocar el recipiente con la muestra (vaso de precipitados) sobre la base de acero. El aro debe quedar sumergido en la muestra, aproximadamente medio centímetro.
4. Quitar seguro y encender el equipo para que inicie el ascenso del aro de platino-iridio.
5. El tensiómetro detiene su ascenso al salir el aro de la solución. En este momento se registra el dato de tensión superficial.
6. Ajustar nuevamente la escala con la manivela de la parte derecha del equipo para realizar la siguiente medición.



Figura 3.13. Tensiómetro semiautomático Cole-Parmer

3.2.2 Estimación del diámetro de burbuja: Modelo de flujo de fases o Drift-Flux

El modelo de arrastre o flujo de fases, fue resultado de manera iterativa, con el uso de un programa realizado en software National Instruments LabVIEW, en el cual es necesario introducir como datos las velocidades superficiales de la fase líquida y del gas retenido. El procedimiento de solución a la serie de ecuaciones se describe en la sección 2.6.4.2

En el apéndice C se incluye el código del programa realizado, y en el apéndice A se presentan los diámetros de burbuja calculados con el uso del modelo flujo de fases en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro.

3.2.3 Medición de la fracción de gas retenido

La fracción de gas retenido se determinó con el uso del modelo de Maxwell, descrito en la sección 2.6.2. Para determinar la conductividad de las fases continua y dispersa, se utilizó el sensor de conductividad descrito en la sección 3.1.2.

La secuencia para determinar la fracción de gas retenido fue la siguiente:

1. Se sumergió el sensor de conductividad en la columna de flotación en la parte superior y se registró el valor de conductancia (fase dispersa). Para medir la conductancia del líquido (fase continua), la medición se llevó a cabo en el recipiente, desde el cual era inyectado el líquido a la columna.
2. Fue calculada la conductividad de cada fase (continua y dispersa) con el uso de la ecuación de calibración de la constante de celda del sensor.
3. Se determinó la fracción de gas retenido mediante el uso del modelo de Maxwell (ecuación 2.7)

3.2.4 Medición de la caída de presión

Se registraron mediciones de caída de presión generada en el dispersor tipo ventury, esto con el objeto de determinar la cantidad de energía cinética disipada. Por ello se midió la caída de presión diferencial resultante de dos tomas en el interior del dispersor (P_1 y P_2) como se demuestra en la Figura 3.14.

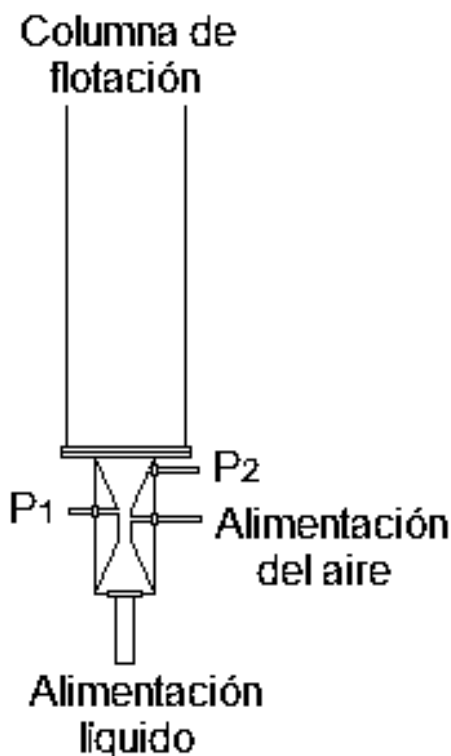


Figura 3.14. Medición de la caída de presión, resultante de la presión diferencial medida en dos puntos

Una vez obtenidos los valores de la caída de presión, se calculó la energía cinética disipada para cada experimento de acuerdo a la ecuación de Bernoulli.

3.2.5 Cálculo de la energía cinética disipada

La energía cinética de un objeto es la energía extra que posee debido a su movimiento, se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa dada desde el reposo hasta su velocidad actual. Habiendo ganado esta energía durante la aceleración, el cuerpo mantiene esta energía cinética a menos que existan cambios de velocidad. Un trabajo negativo de la misma magnitud sería necesario para devolver el cuerpo a un estado de velocidad inicial.

Como normalmente la ley de la conservación de la energía debe cumplirse en el caso de los fluidos medios expresado en la ecuación de Bernoulli. Esta ecuación establece que en cada momento la suma de las energías cinética y potencial son constantes.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 + \frac{\Delta P}{\rho} \quad (3.4)$$

La ecuación anterior establece que la suma de cada momento de las energías cinética y potencial son constantes, en otras palabras:

$$\frac{V^2}{2} + \int_{P_o}^{P_f} \frac{dP}{\rho} + g + c = 0 \quad (3.5)$$

En la ecuación (3.5) el primer término representa la energía cinética (V representa la velocidad superficial), el segundo y tercer término representan la energía potencial. En forma de integral (segundo término) esta expresada la energía de la presión, que es lo más importante para el gas, en contra del tercer término que representa la energía de gravedad que se refiere mucho más a líquidos y puede ser despreciada en el cada de los cálculos de gases.

Integrando la ecuación (3.5), obtenemos:

$$\frac{V^2}{2} + \frac{1}{\rho} \int_{P_o}^P dP + C = 0 \quad (3.6)$$

$$E_c = \frac{1}{\rho} \int_{P_o}^P dP \quad (3.7)$$

$$E_c = \frac{1}{\rho} \Delta P \quad (3.8)$$

$$E_c = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (3.9)$$

La energía cinética disipada por el dispersor también puede ser determinada con base en el conocimiento de su diámetro menor (d_m) su diámetro mayor (d_M) como se ilustra a continuación, Fig. 3.15.

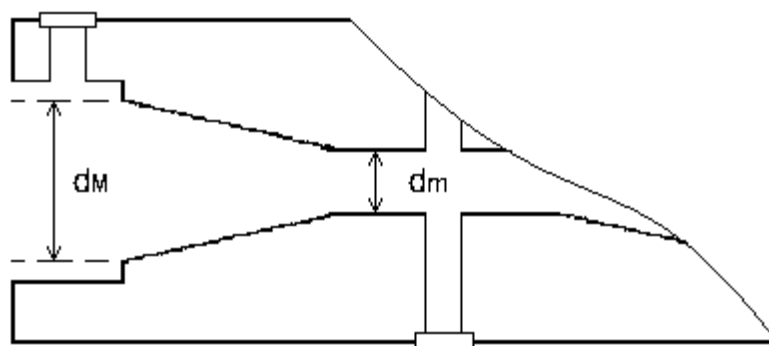


Figura 3.15. Detalles de la relación de diámetros del dispersor

Sustituyendo la ecuación (2.7) en la ecuación (3.9):

$$E_c = \frac{8Q^2}{\pi^2} \left(\frac{1}{D_2^4} - \frac{1}{D_1^4} \right) \quad (3.10)$$

3.3 Obtención del modelo matemático empírico

Para la obtención del modelo que predice el tamaño promedio de burbuja, se combinó el modelo teórico desarrollado para este tipo de dispersor de acuerdo a Bernoulli con el modelo de los datos experimentales.

La obtención del modelo matemático de los datos se llevó a cabo con la ayuda de los paquetes de software de Minitab 16 y SYSTAB, con base a las mediciones hechas de las variables operativas de la columna (flujo volumétrico de gas Q_g , y de líquido Q_l), las características dimensionales de los dispersores (relación de diámetros d_M/d_m) y las variables del sistema (tensión superficial σ) obtenidos de la experimentación en la columna de flotación de laboratorio de 7.5 cm de diámetro por 300 cm de altura.

A la serie de datos también se les realizó estadística básica (media, desviación estándar, varianza, entre otros) y la obtención de una tabla de correlación entre las variables con la ayuda de los paquetes de Minitab 16 y el software de National Instruments LabVIEW 2011.

3.4 Experimentación en la columna de flotación de escala piloto

Se efectuaron una serie de experimentos en una columna de flotación de escala piloto para hacer válido el modelo de predicción de diámetro de burbuja obtenido de los resultados experimentales en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro, y observar si algunas variables como la presión hidrostática o el diámetro de columna, ejercen un determinado efecto en el tamaño de burbuja. El sistema de flotación se presenta a continuación (Fig. 3.16)



Figura 3.16. Vista lateral de la columna de flotación de escala piloto (izquierda), vista isométrica de la columna (derecha)

Se realizaron 36 experimentos en la columna de flotación escala piloto, bajo las condiciones mostradas en la Figura 3.17; las variables medidas fueron: tensión superficial, diámetro de burbuja, fracción de gas retenido y la caída de presión en el interior del dispersor; mientras que las variables controladas fueron concentración de surfactante, flujos volumétricos del gas y del líquido.

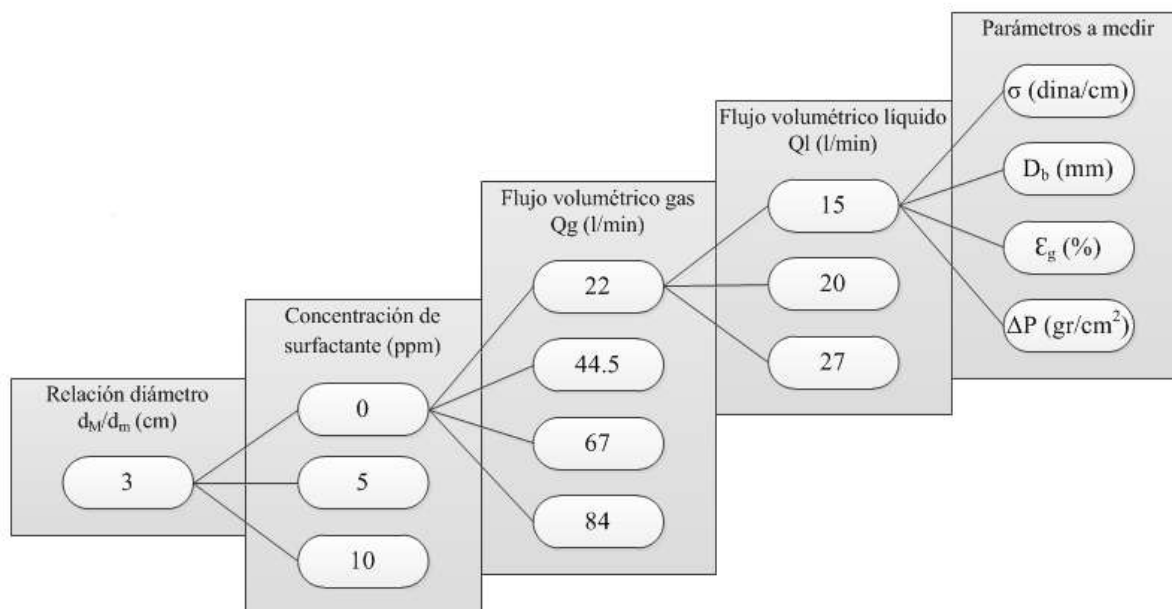


Figura 3.17. Programa experimental realizado en la columna de flotación de escala piloto

El dispersor externo tipo ventury fue instalado en la parte inferior de la columna. Al igual que en la columna de 7.5 cm de diámetro, el líquido y el aire fueron alimentados a la columna a través del dispersor. Ambos flujos volumétricos fueron monitoreados y medidos mediante rotámetros de esfera marca Cole Parmer. La presión generada en el interior del dispersor se midió con el mismo manómetro de la etapa anterior (marca Ashcroft).

Las mediciones de la tensión superficial, el tamaño de burbuja, la fracción de gas retenido y el cálculo de la energía cinética disipada se efectuaron de la misma manera que los experimentos realizados en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro, como se describe en las secciones 3.3.1 a la 3.3.5

Para la fracción de gas retenido, las mediciones se realizaron en la parte central de columna.

En el siguiente capítulo se presenta la discusión de los resultados experimentales del presente trabajo. Los resultados de los experimentos realizados en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro se presentan en el Anexo A y los resultados de los experimentos hechos en la columna de flotación de escala piloto se presentan en el Anexo B.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo son descritos los resultados obtenidos en las diversas etapas experimentales. De igual forma, se realiza la discusión de los mismos en base a lo reportado en la literatura.

4.1 Calibración del sensor de conductividad

Para llevar a cabo la medición del porcentaje de gas retenido en la columna de flotación de acrílico, mediante el sensor de conductividad eléctrica se requirió la calibración de la constante de celda del mismo.

En la Figura 4.1, se muestra la curva de calibración del sensor de conductividad, además de la ecuación (4.1) correspondiente al ajuste de los datos experimentales.

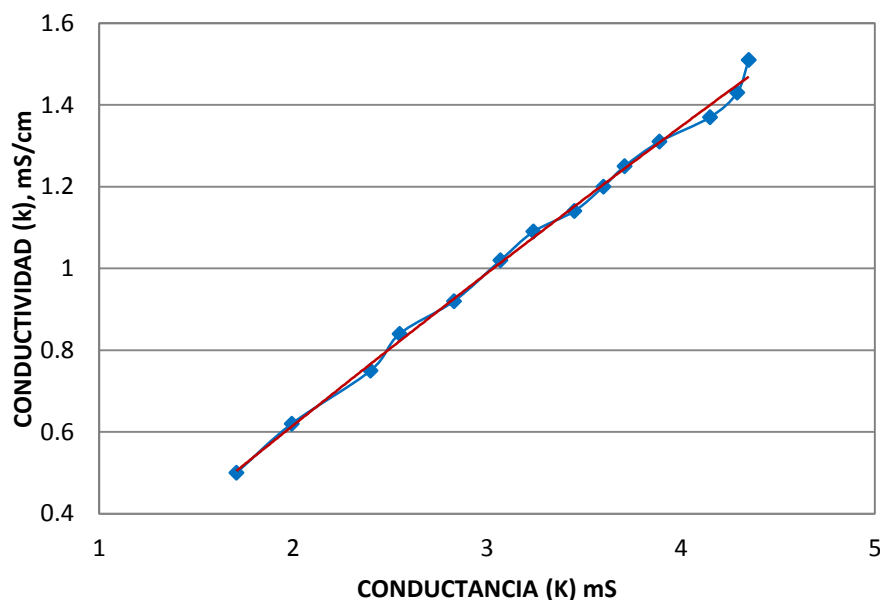


Figura 4.1. Curva de calibración del sensor de conductividad

$$k = -0.00679911 K^2 + 0.406459K - 0.169915; \quad R^2 = 0.9968 \quad (4.1)$$

El sensor registra la conductancia (K), sin embargo, el modelo de Maxwell involucra las conductividades (k) de las fases; por la tanto, las conductividades de la dispersión (aire-agua) y la fase continua (agua) se obtuvieron con la ecuación (4.1).

4.2 Resultados experimentales en la columna de flotación de laboratorio de 7.5 cm de diámetro por 300 cm de alto

Enseguida se presentan los resultados obtenidos de los experimentos realizados en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro.

4.2.1 Efecto de la tensión superficial en las características de la dispersión de aire

La tensión superficial tiene un efecto considerable al momento de la formación de la burbuja, y por consecuencia en la fracción de gas retenido. En los experimentos se modifica la tensión superficial del líquido con el uso de surfactante (aceite de pino). La Figura 4.2 presenta el comportamiento de la tensión superficial del líquido con respecto a la concentración de surfactante.

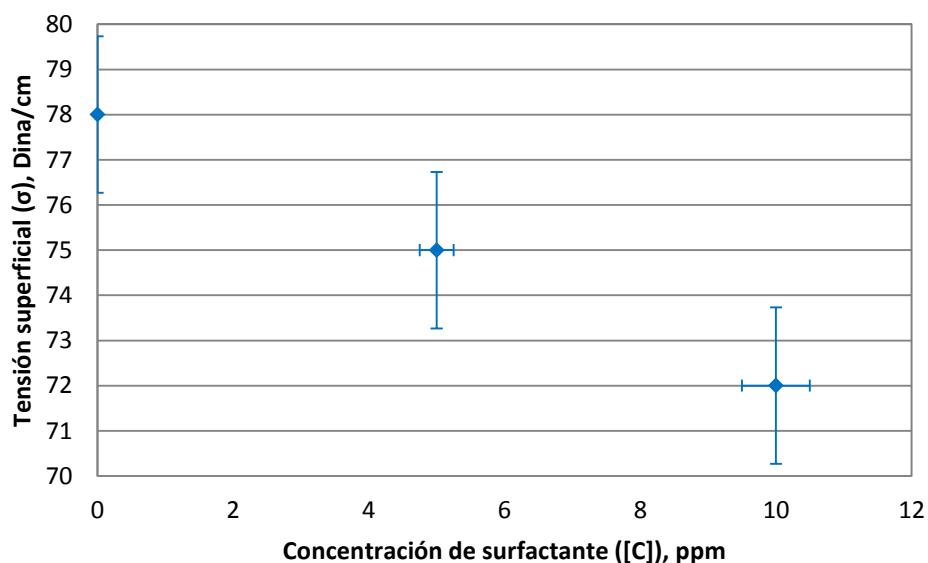


Figura 4.2. Efecto de la concentración de surfactante en la tensión superficial

En la Figura 4.2 es claro que la tensión superficial disminuye con la adición de surfactante. El surfactante tiene el efecto de disminuir las fuerzas de enlace entre las moléculas de agua, lo cual hace que disminuya la tensión superficial.

Al disminuir la tensión superficial del medio continuo, se espera que la fracción de gas retenido se incremente. El aumento del gas retenido se debe a la acumulación mayor de burbujas en cierto volumen de la columna, causado por la disminución en la velocidad de las burbujas, misma que es menor a medida que disminuye el diámetro de las mismas.

De la Figura 4.2, con la máxima adición de surfactante, que corresponde a 10 ppm de aceite de pino, no se alcanza el mínimo valor constante de la tensión superficial; es decir, el punto donde el agua corriente se satura de surfactante y mayores adiciones del mismo no resultan en la disminución de la tensión superficial, tal y como lo reportan algunos investigadores [26, 27].

La Figura 4.3 muestra el efecto de la tensión superficial (σ) del medio continuo en el porcentaje de gas retenido (ϵ_g). Se observa un incremento en ϵ_g con la disminución en la σ , aunque en esta serie de experimentos la fracción de gas alcanza un máximo y disminuye con los 10 ppm de espumante adicionado. Este comportamiento se aprecia independiente de la relación de diámetros en el dispersor.

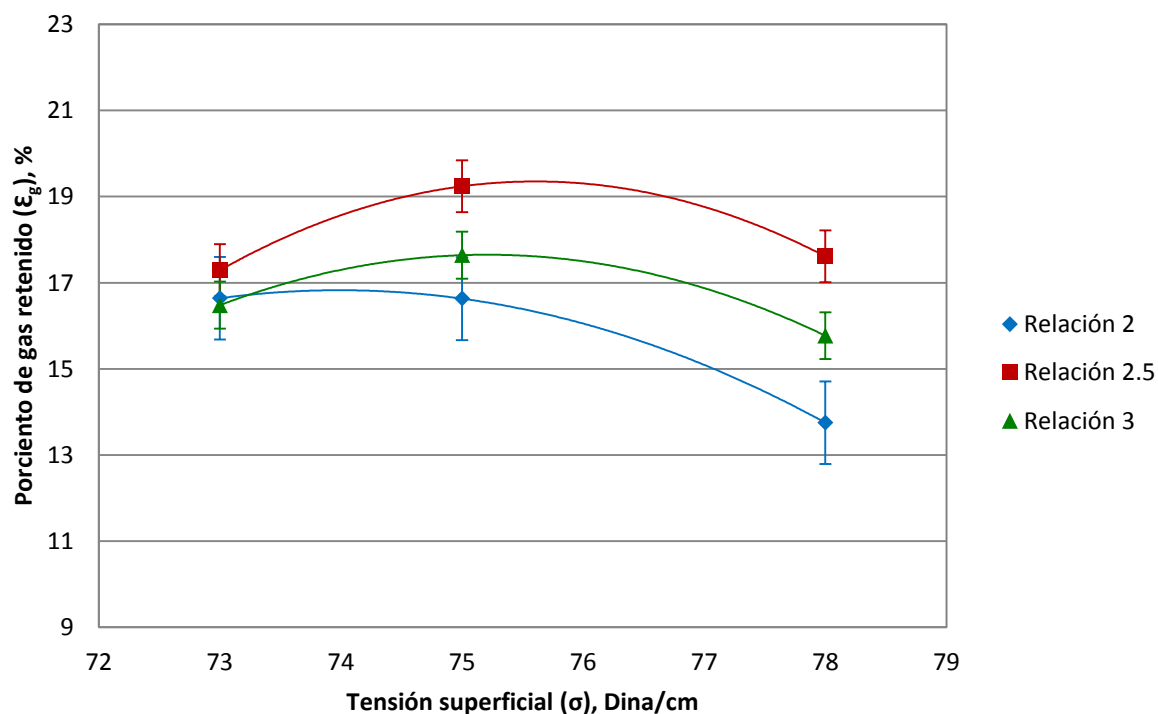


Figura 4.3. Efecto de la tensión superficial en el porcentaje de gas retenido

Considerando que no se ha alcanzado la mínima tensión superficial del líquido, como lo muestra la Figura 4.2, la disminución en la fracción de gas se debe al fenómeno de coalescencia de burbujas originado por la alta acumulación de las mismas en cierto volumen de la columna. Este fenómeno ha sido reportado también en la literatura por diversos autores [28, 29].

El fenómeno de coalescencia que origina la formación de burbujas más grandes a partir de burbujas pequeñas, se respalda en los datos graficados en la Figura 4.4.

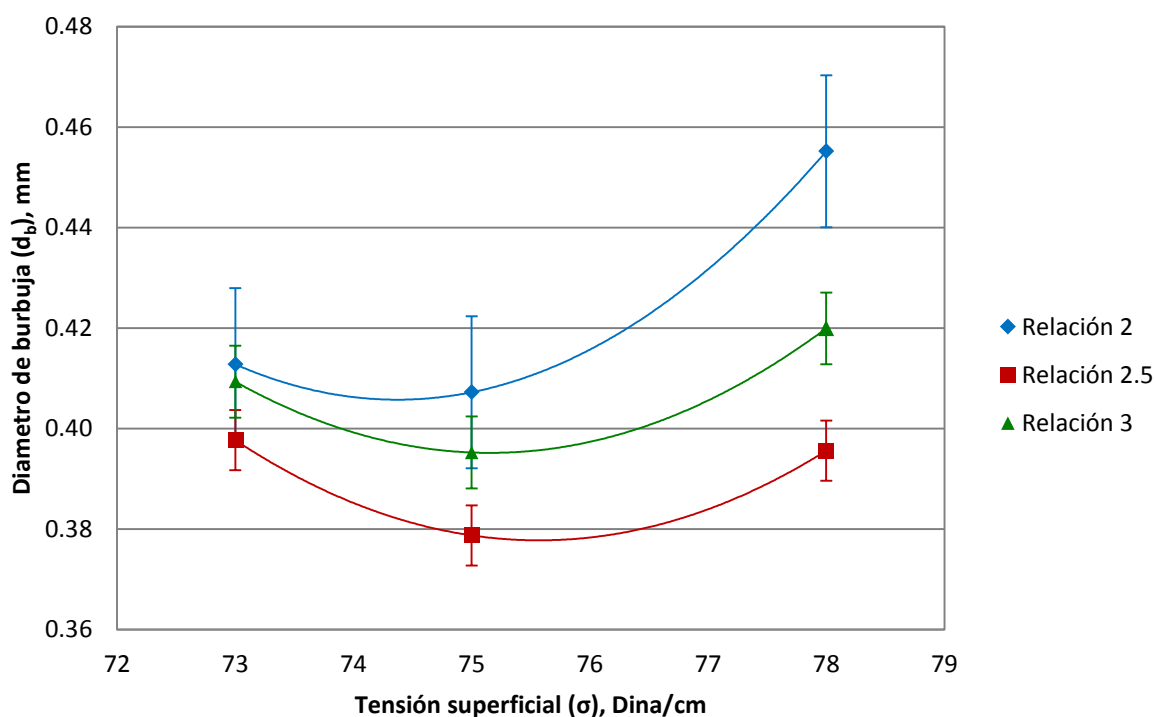


Figura 4.4. Efecto de la tensión superficial sobre el diámetro de burbuja

Como se puede apreciar, el diámetro de burbuja promedio disminuye con la tensión superficial, a excepción de la última adición de surfactante que sugiere la presencia del fenómeno de coalescencia al incrementar el tamaño de las burbujas. Este comportamiento se observa en los tres dispersores con diferente relación de d_M/d_m ; en otras palabras, el fenómeno de coalescencia en estos casos es independiente de la caída de presión en el dispersor, indicando que la coalescencia se presenta en la columna y no durante la formación de las burbujas.

El tamaño de burbuja es de importancia al analizar el concepto de área superficial de burbujas (S_b). Esta variable se relaciona con el área superficial de burbujas disponible para la captura de especies de valor que resulta en mayor transporte de masa concentrada o recuperada a través de flotación en columnas.

El área superficial de las burbujas (S_b) se define como el flujo de la superficie de las burbujas (superficie $\cdot$ tiempo⁻¹) que cruza una superficie unitaria normal a la dirección de ese flujo; por esta razón, la S_b tiene unidades de tiempo.

A partir de consideraciones geométricas S_b se expresa como la relación entre la velocidad superficial del gas en el sistema de flotación y el diámetro de las burbujas [30]:

$$S_b = 6 J_g / d_b \quad (4.2)$$

Se puede anticipar que al disminuir el diámetro de las burbujas por unidad de gas alimentado, como resultado de la disminución en el valor de la tensión superficial, la fracción volumétrica de gas retenido aumenta y la superficie de burbujas que cruza una superficie unitaria normal a la dirección del flujo de gas también aumentará.

S_b incluye las características químicas, hidrodinámicas y geométricas del sistema de flotación, por lo que es una importante variable considerada como parámetro de control en el proceso de flotación que refleja la eficiencia del mismo.

En la Figura 4.5 se muestra el comportamiento de S_b respecto a la tensión superficial.

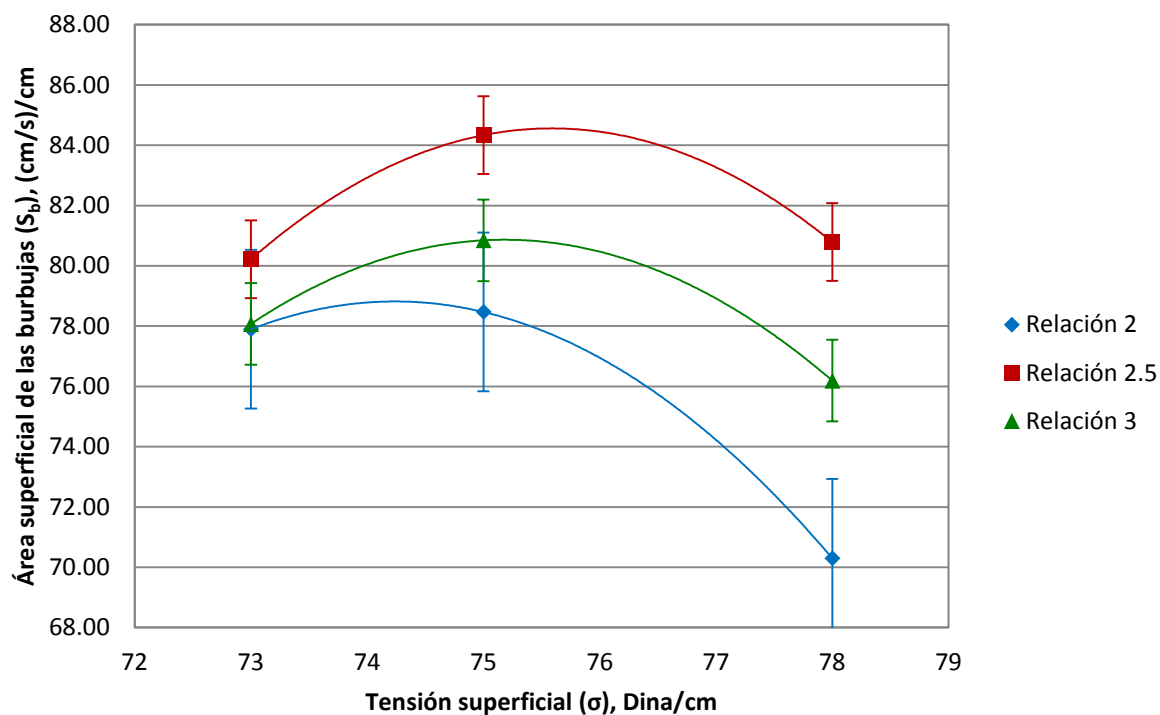


Figura 4.5. Efecto de la tensión superficial en el área superficial de flujo de burbujas. Experimentos en la columna de 7.5 cm de diámetro

El S_b muestra un comportamiento similar a la fracción de gas retenido y al diámetro de burbuja en relación a la tensión superficial: El área superficial aumenta con la disminución en la tensión superficial, alcanzando un valor máximo antes de que ocurra el fenómeno de coalescencia de burbujas.

Al incrementar el diámetro de burbuja el área superficial de las mismas disminuye y obviamente se refleja en el valor calculado de S_b (ecuación 4.1).

4.2.2 Efecto de la relación de diámetro d_M/d_m

La relación de diámetro juega un papel importante en la energía cinética que se genera dentro del dispersor, mientras mayor sea la relación de diámetros (la diferencia entre el diámetro menor y el diámetro mayor), la energía cinética disipada en el dispersor será mayor.

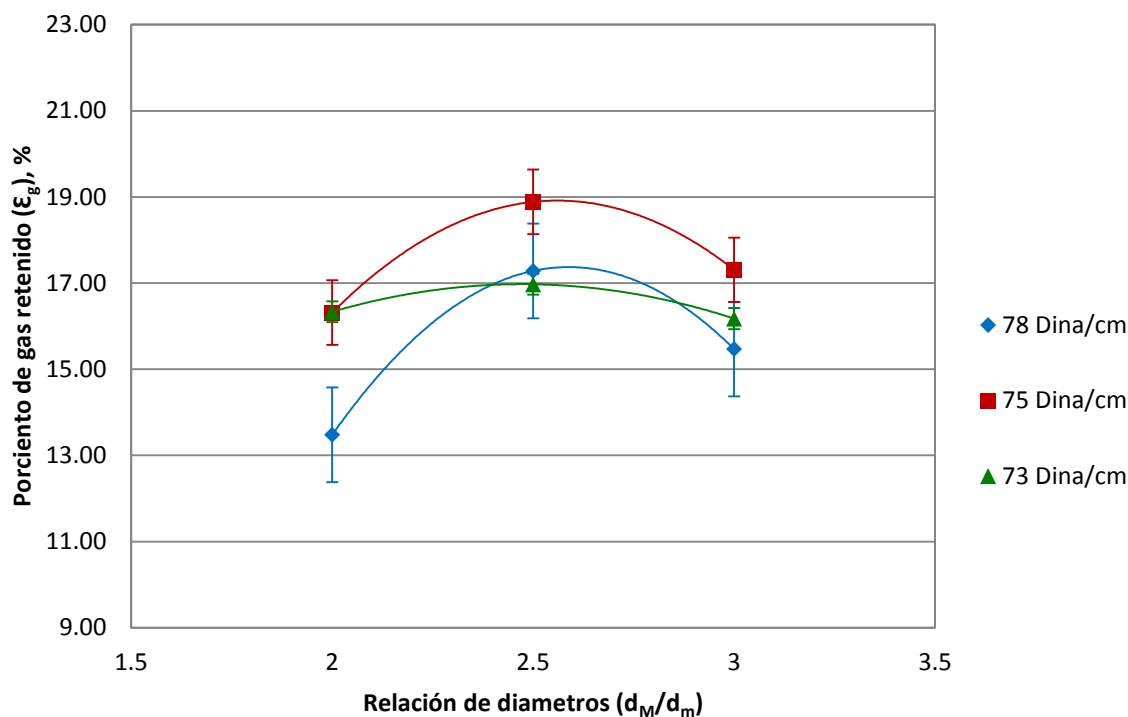


Figura 4.6. Efecto de la relación de diámetro sobre el porcentaje de gas retenido

La relación de diámetro que obtuvo un mayor efecto en la retención de gas es el 2.5 ($d_m = 1.27$ cm; $d_M = 3.175$ cm), al tener una retención de gas promedio por encima del 18 %, mientras que la relación de diámetro que menor retención tuvo es la 2 ($d_m = 1.27$ cm; $d_M = 2.54$ cm).

A pesar de que la energía cinética originada en la vena contracta del dispersor y liberada o equilibrada mecánicamente del mismo en forma de burbujas, es mayor con el aumento en la relación de diámetros, el fenómeno de coalescencia vuelve a jugar un papel preponderante, al limitar el número de burbujas acumuladas en cierto volumen de la columna.

De la Figura 4.6, se observa que para el caso de la máxima relación de diámetros (igual a 3), la tendencia ascendente del porcentaje de gas retenido se ve interrumpida y disminuye, esto producto del fenómeno de coalescencia de burbujas.

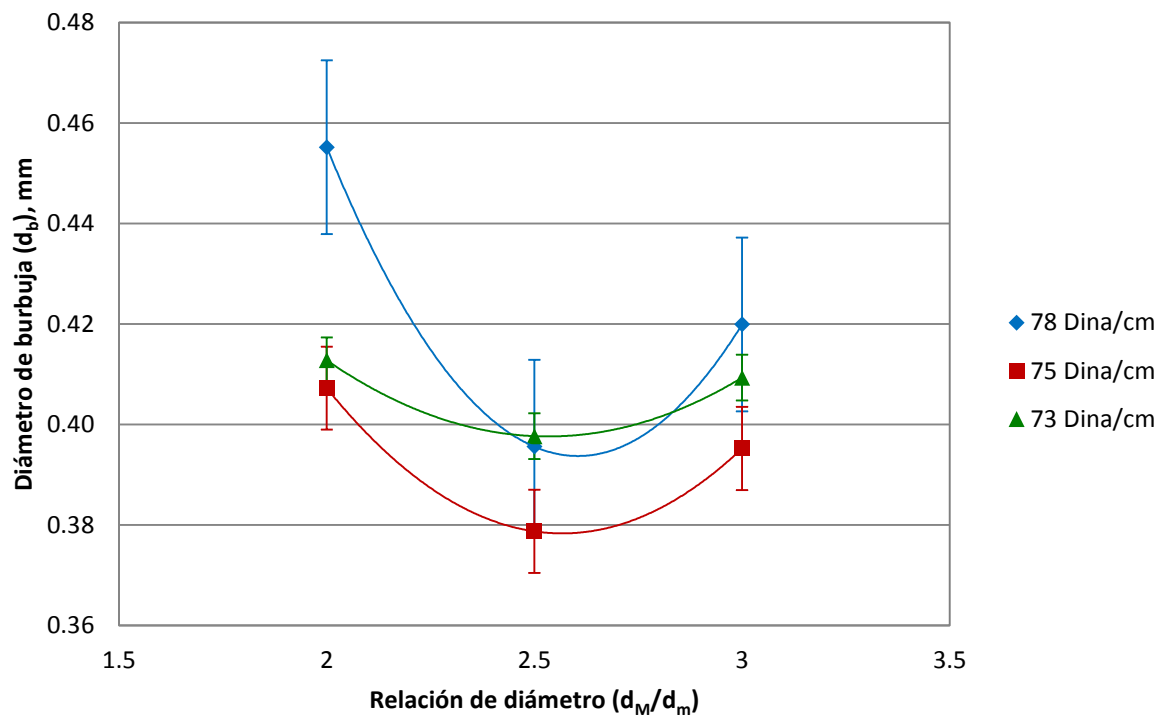


Figura 4.7. Comparación del diámetro de burbuja respecto a la relación de diámetro

El diámetro de burbuja tiene un comportamiento inverso a la fracción de gas retenido. La relación de diámetro 2, obtuvo un diámetro de burbuja promedio por encima de los 0.43 mm, mientras que la relación 2.5 presentó un promedio en el diámetro de burbuja de 0.39 mm y la relación de diámetro 3 presentó un diámetro de burbuja de 0.41 mm. Esto nos indica que con el dispersor con la relación 2.5 podemos obtener diámetros de burbuja más pequeños, cabe mencionar que aun cuando se modificó la tensión superficial, esta relación obtuvo los tamaños de burbuja menores.

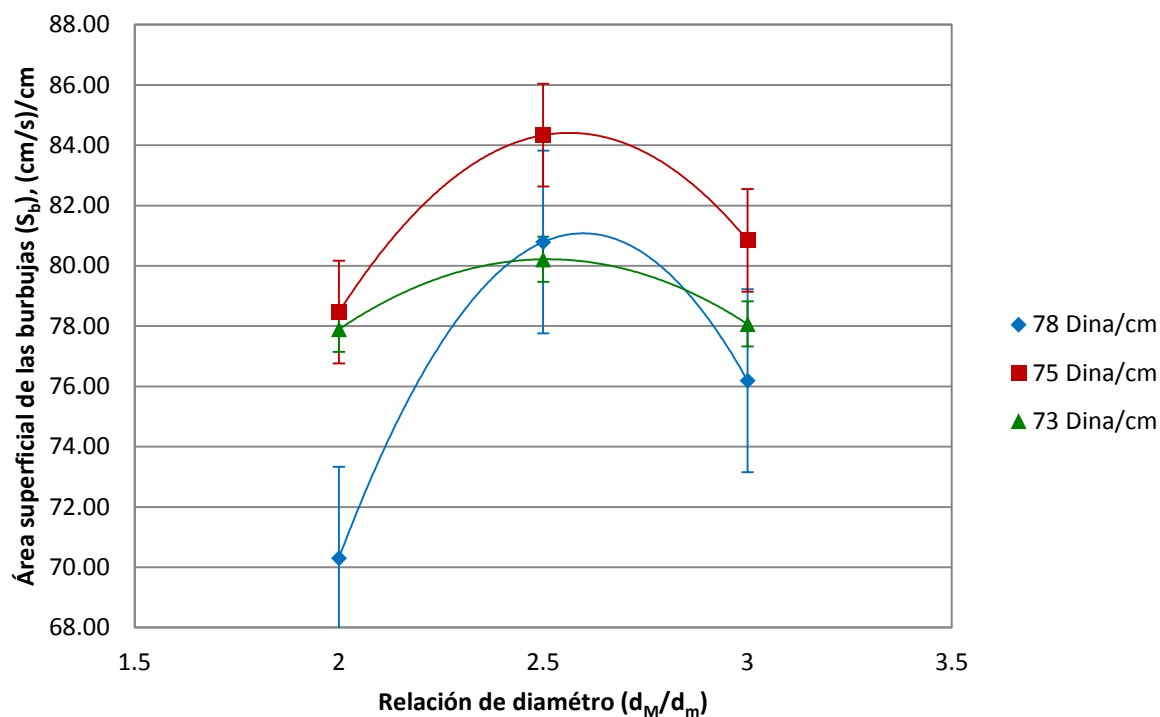


Figura 4.8. Comparación de área superficial de la burbuja respecto a la relación de diámetro

La figura 4.8 muestra los cambios en S_b con las variables de tensión superficial y la relación de diámetro. En la relación de diámetro 2.5, es donde se alcanza la mayor área superficial de la burbuja en cada modificación de la tensión superficial, siendo a 75 dina/cm donde se alcanza la mayor con un promedio de 84.33 (cm/s)/cm.

4.2.3 Efecto del flujo volumétrico del gas

La velocidad a la cual es inyectado el gas a la columna de flotación a través del dispersor está relacionada con la energía cinética que se disipa, por lo tanto se espera que a medida que se aumenta la velocidad superficial del gas, la energía cinética disipada se incremente.

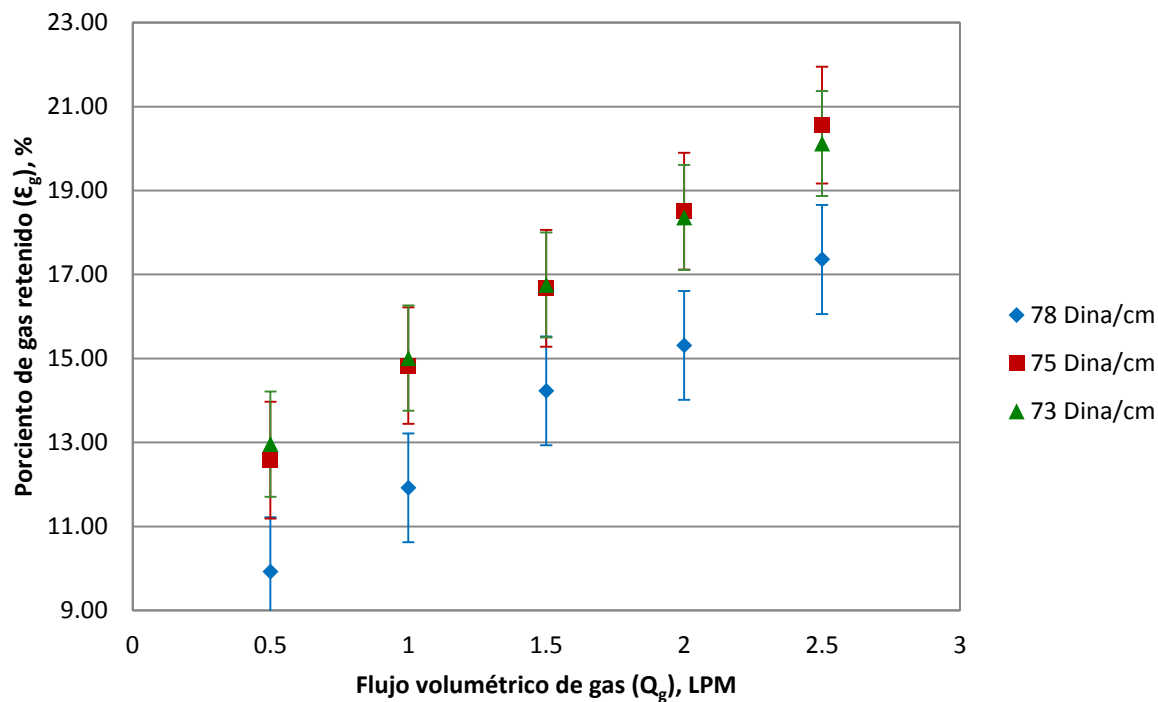


Figura 4.9. Efecto del flujo volumétrico del gas en el porcentaje de gas retenido para la relación de diámetro 2

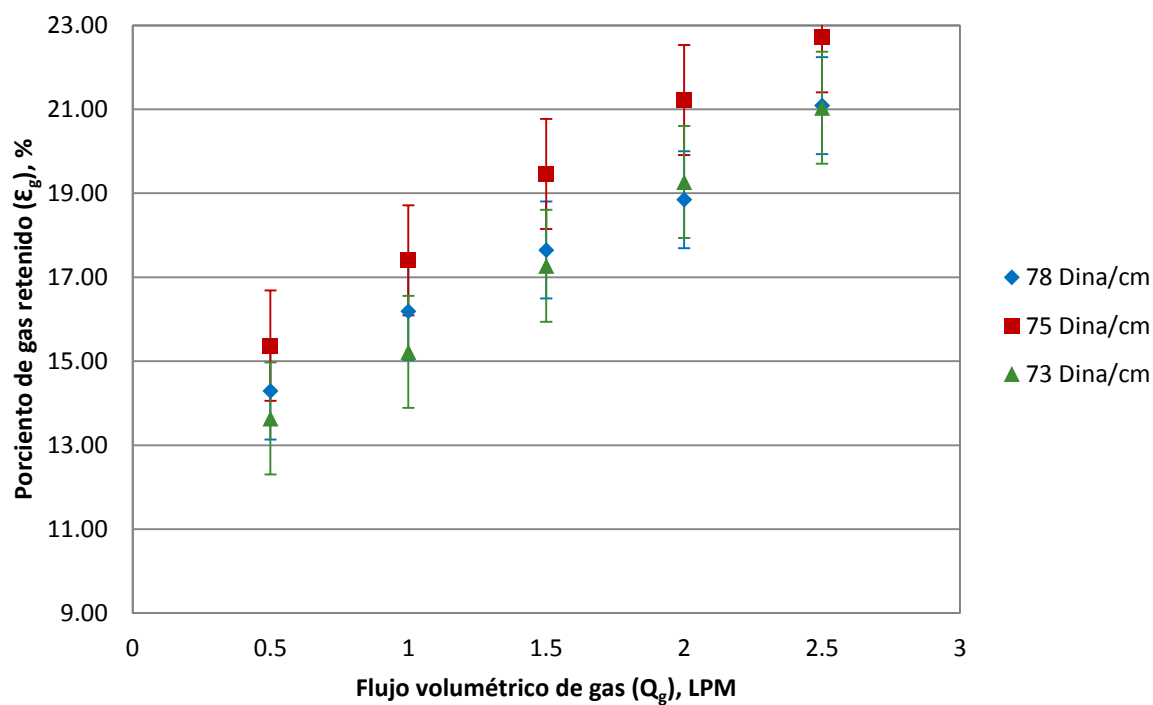


Figura 4.10. Efecto del flujo volumétrico del gas en el porcentaje de gas retenido para la relación de diámetro 2.5

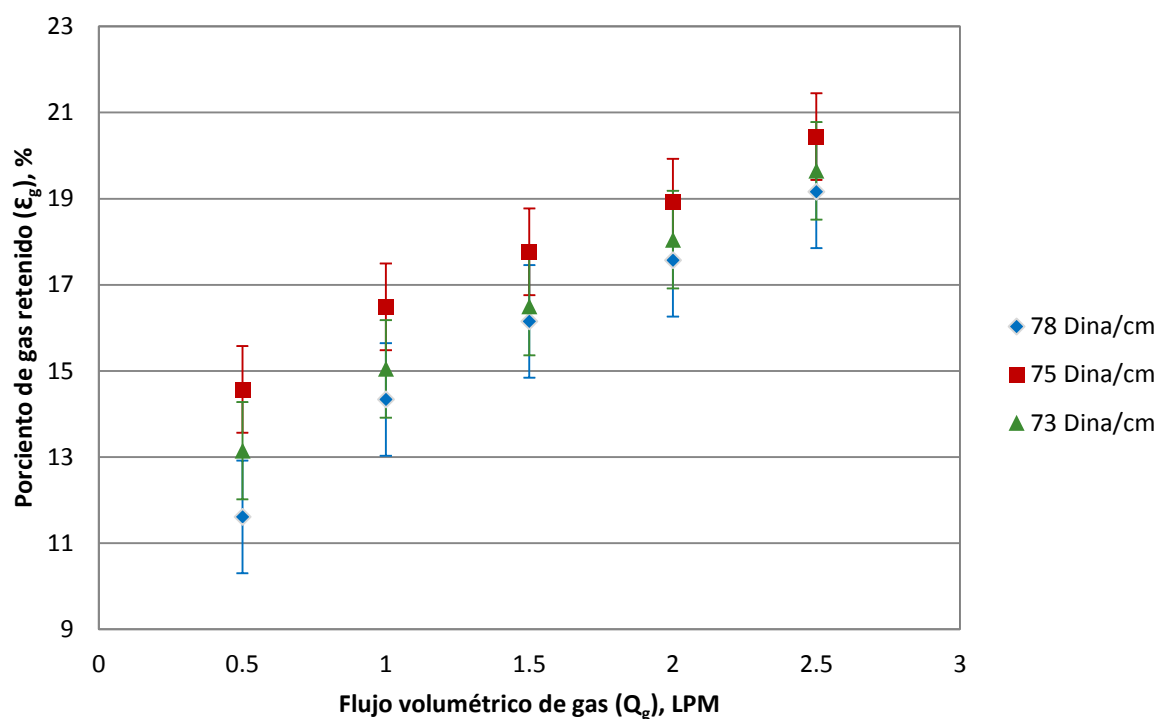


Figura 4.11. Efecto del flujo volumétrico del gas en el porcentaje de gas retenido para la relación de diámetro 3

En las tres gráficas anteriores (Figs. 4.9, 4.10, 4.11) se puede observar que la fracción volumétrica de gas se incrementa con el flujo superficial de gas; esto, se debe a la disminución del tamaño de burbuja causado por el aumento en ΔP en el dispersor que es directamente proporcional a la energía cinética generada en el mismo, ubicando incluso a la tensión superficial del medio continuo en un plano de importancia mucho menor [14, 31].

La anterior observación se ve reflejada en el comportamiento del diámetro promedio de burbuja calculado para los datos experimentales de las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14.

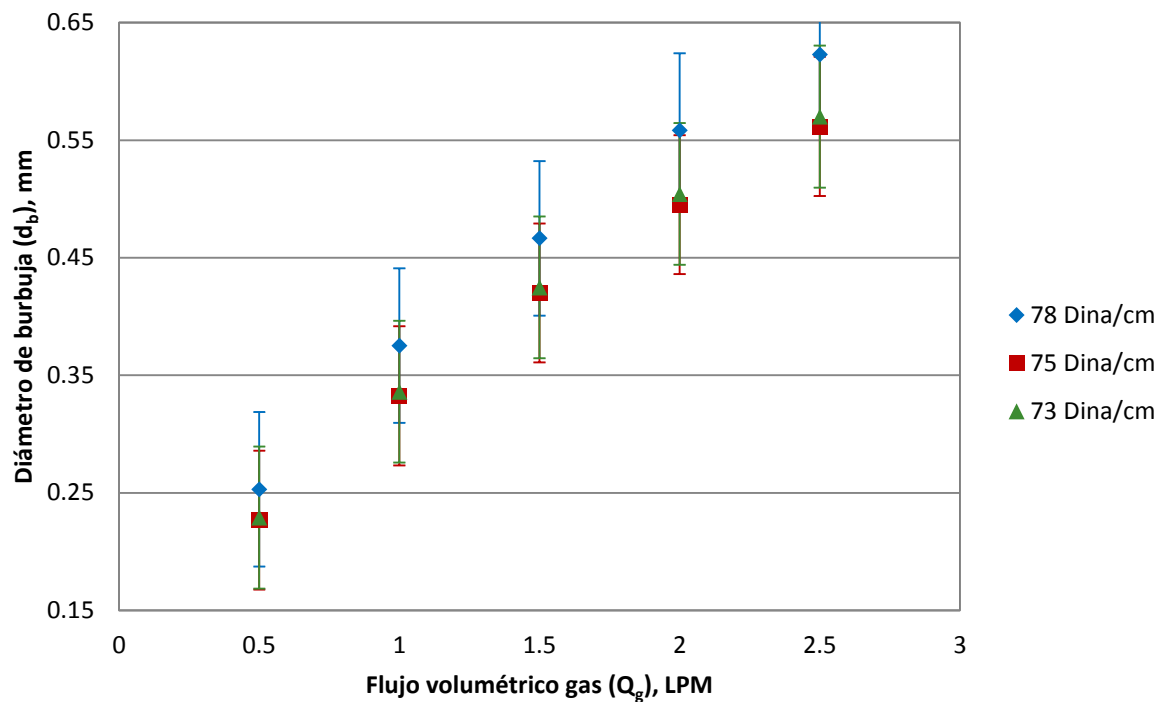


Figura 4.12. Efecto del flujo volumétrico de gas en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 2

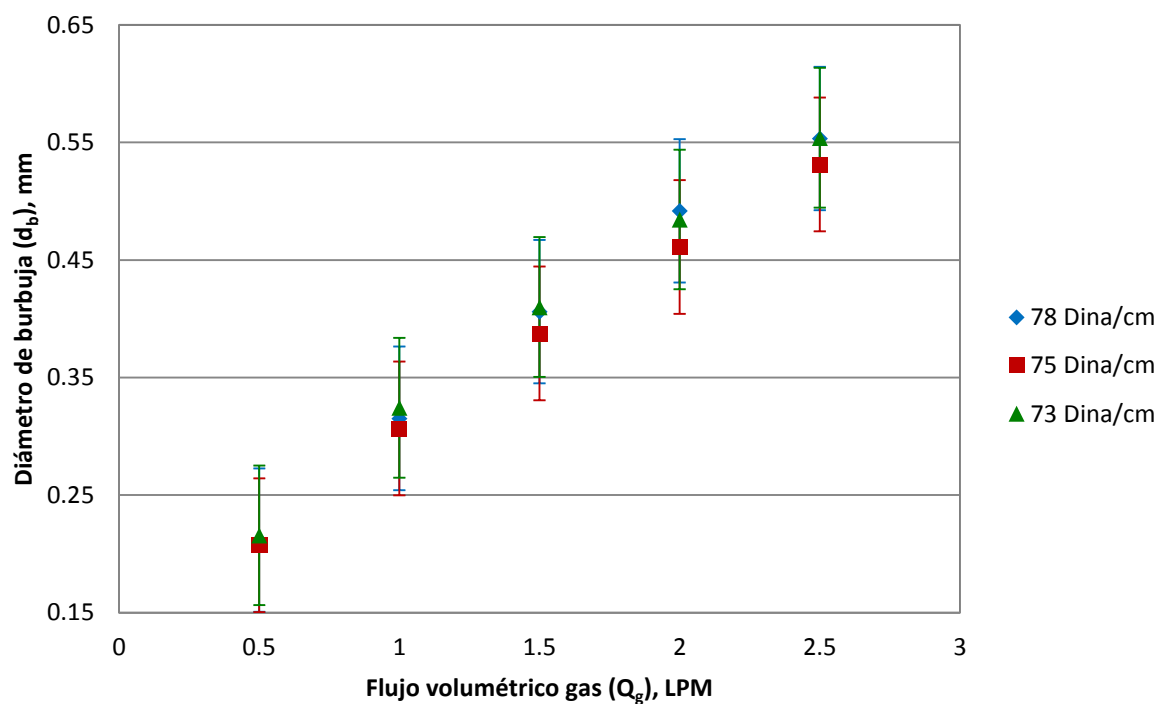


Figura 4.13. Efecto del flujo volumétrico de gas en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 2.5

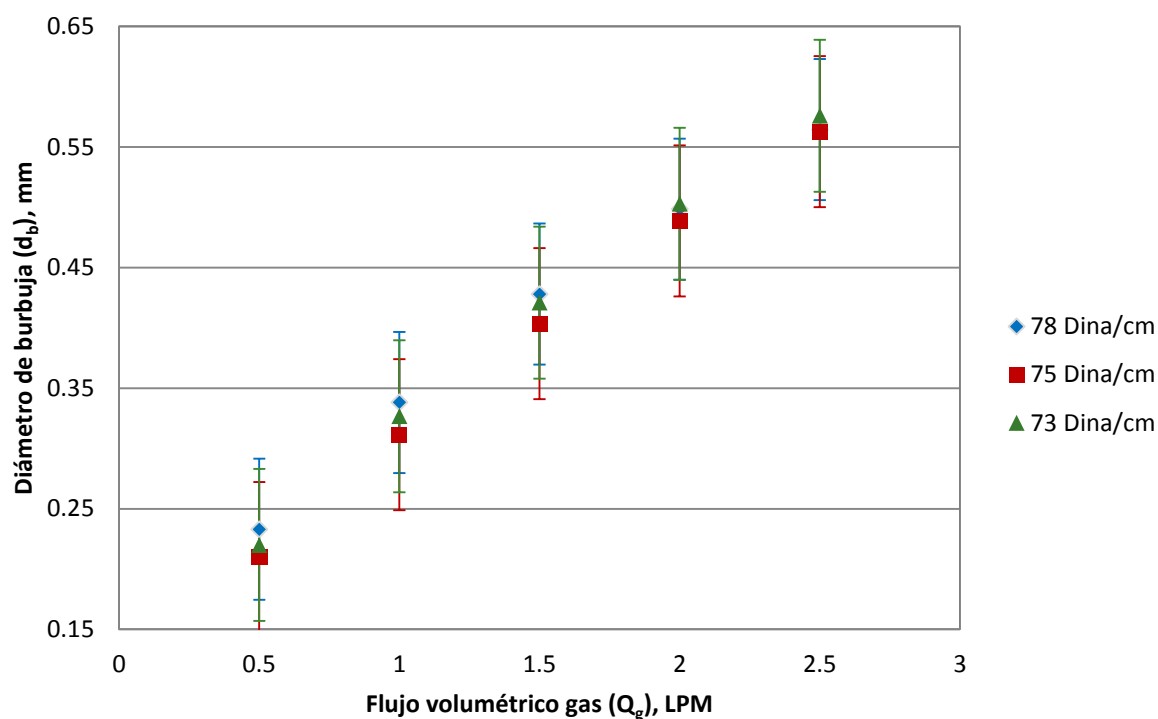


Figura 4.14. Efecto del flujo volumétrico de gas en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 3

De la Figura 4.12 a la Figura 4.14 se refleja el comportamiento de los resultados estimados del diámetro de burbuja, con estos datos se puede corroborar el hecho de que a mayor concentración de espumante; es decir, a menor tensión superficial, disminuye el diámetro de burbuja. Se espera entonces que al aumentar el flujo volumétrico del aire se genere mayor número de burbujas y se tenga más volumen de las mismas; aunque en cierto número o volumen de burbujas ya se evidenció que la coalescencia de las mismas rompe con cualquier tendencia esperada.

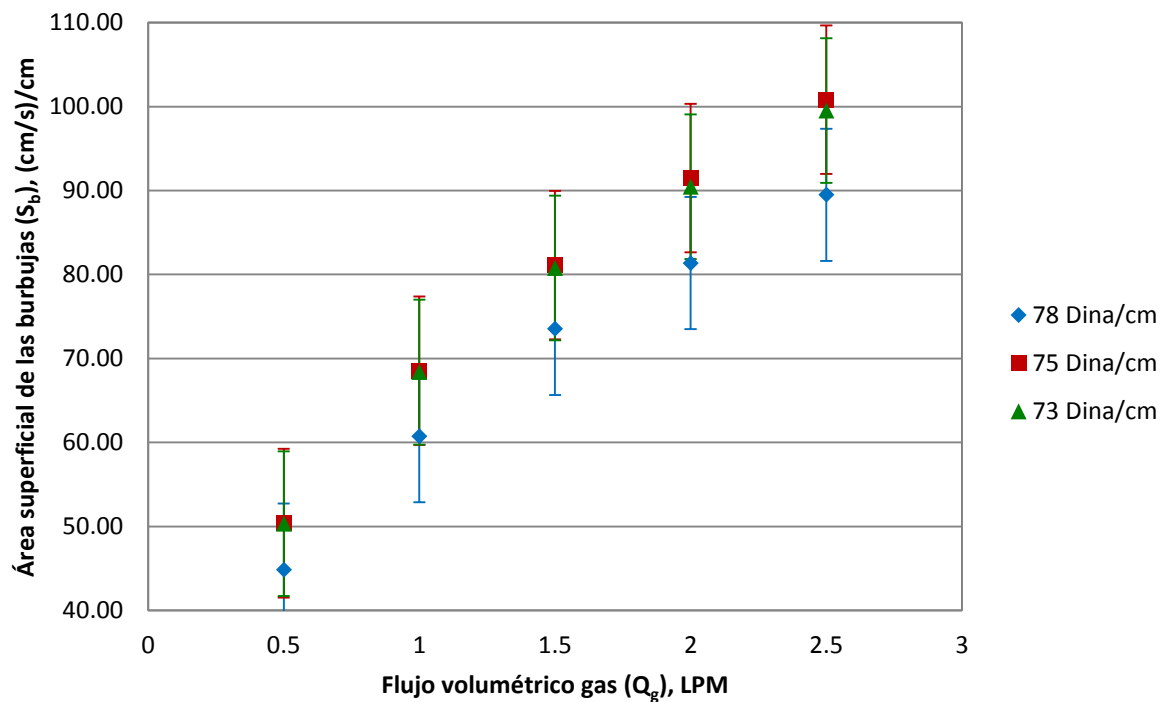


Figura 4.15. Efecto del flujo volumétrico de gas en el área superficial de las burbujas, para la relación de diámetro 2

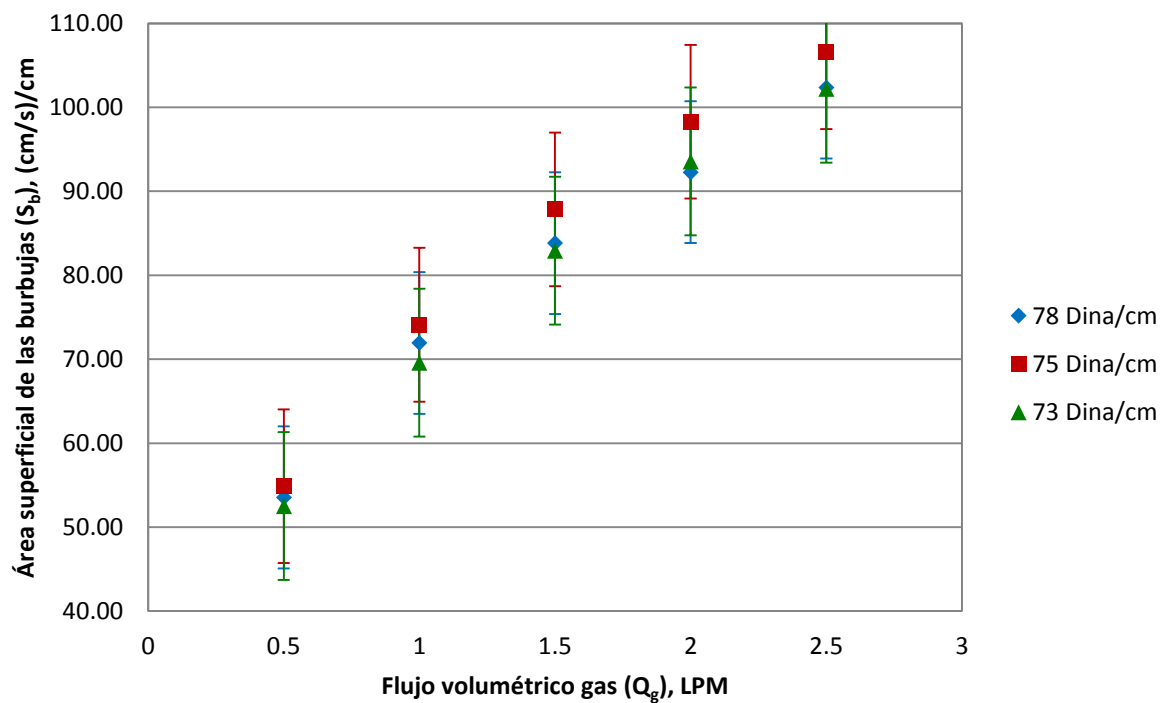


Figura 4.16. Efecto del flujo volumétrico de gas en el área superficial de las burbujas, para la relación de diámetro 2.5

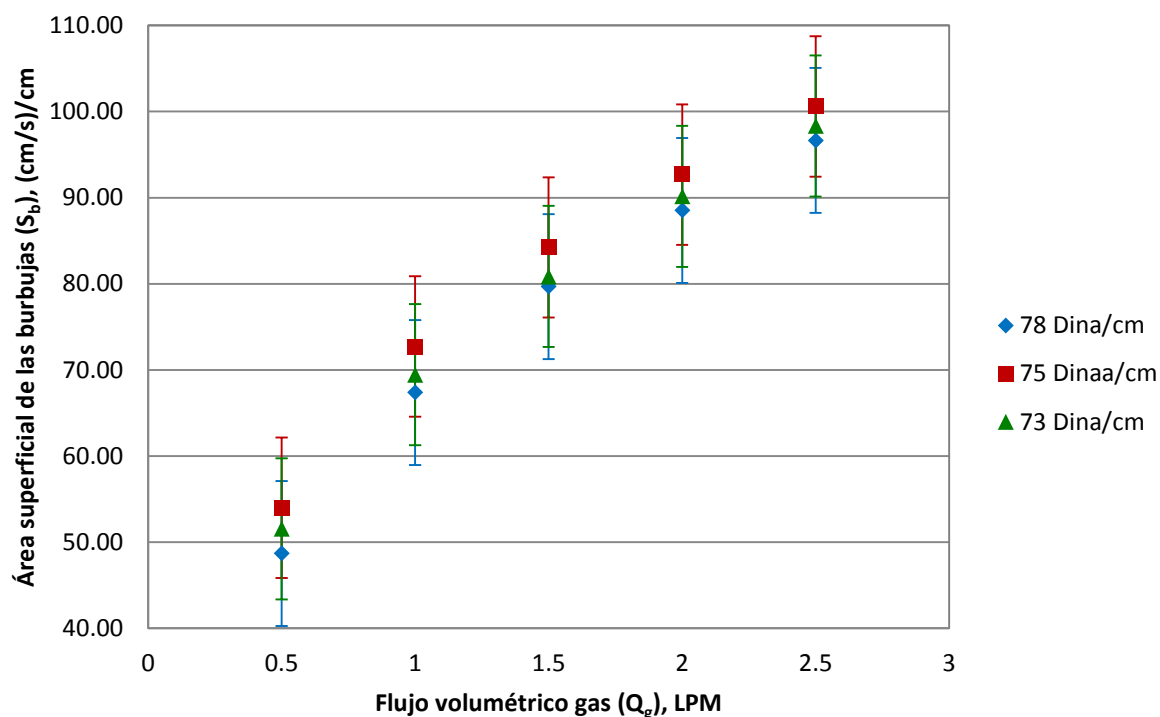


Figura 4.17. Efecto del flujo volumétrico de gas en el área superficial de las burbujas, para la relación de diámetro 3

El efecto de la superficie interfacial vapor-líquido se puede visualizar en términos del comportamiento de los valores estimados de flujo superficial de superficie de burbujas, S_b , lo cual se representa esquemáticamente en las Figs. 4.15, 4.16 y 4.17, en donde se grafican los valores experimentales del flujo volumétrico de gas y las estimaciones de S_b .

Se puede observar que para las condiciones experimentales desarrolladas en este trabajo en la columna de 7.5 cm de diámetro, el área superficial de burbujas aumenta con el flujo de aire alimentado al dispersor. Debido a la magnitud de la energía cinética generada en las relaciones de diámetro de este trabajo y al fenómeno de coalescencia de las burbujas, el efecto de la tensión superficial del líquido no es preponderante y no afecta en gran medida el diámetro promedio de burbuja.

4.2.4 Efecto del flujo volumétrico del líquido

La energía cinética desarrollada en la vena contracta del dispersor es proporcional a la caída de presión en el mismo. Esta ΔP se incrementa con los flujos de aire y agua que pasan por el dispersor. Así mismo el valor de la presión es función de la densidad de cada uno de estos fluidos.

Por lo anterior se establece que el flujo de agua que pasa a través del dispersor tiene un efecto importante en la energía cinética que se libera al salir hacia la columna. Esta energía liberada se transforma en burbujas de aire al equilibrarse el sistema mecánicamente. En las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20, se muestra el efecto que tiene el flujo volumétrico del líquido en las características de la dispersión de gas.

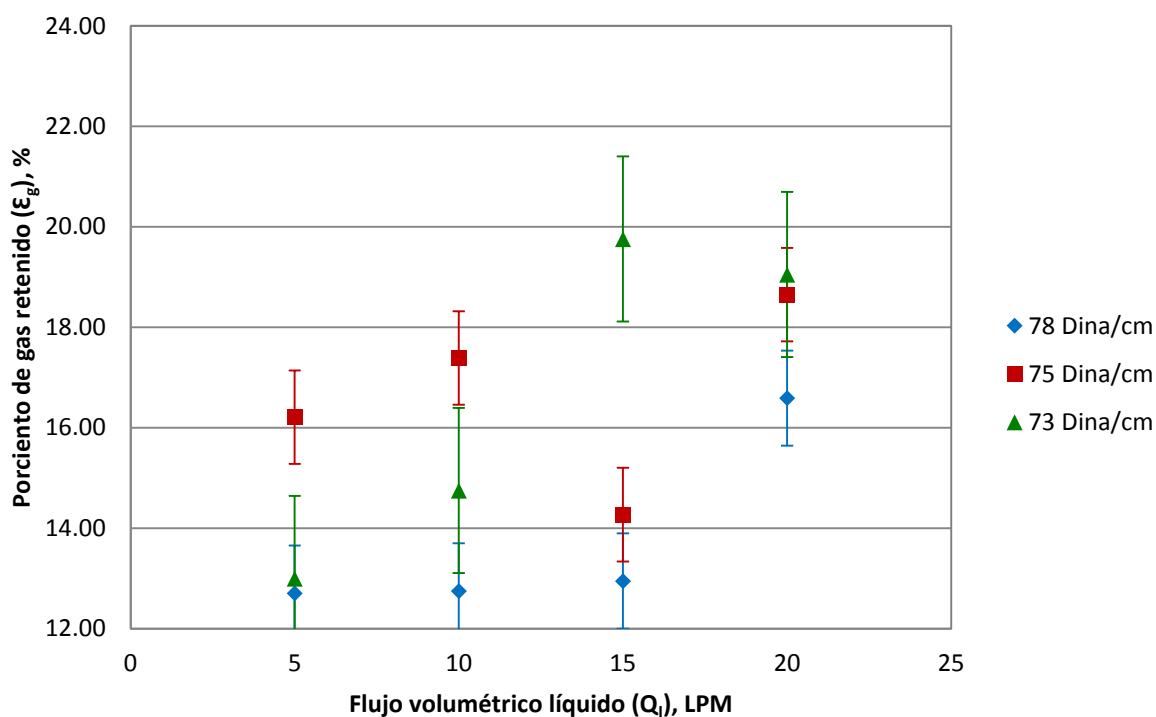


Figura 4.18. Efecto del flujo volumétrico del líquido sobre el porcentaje de gas retenido, para la relación de diámetro 2

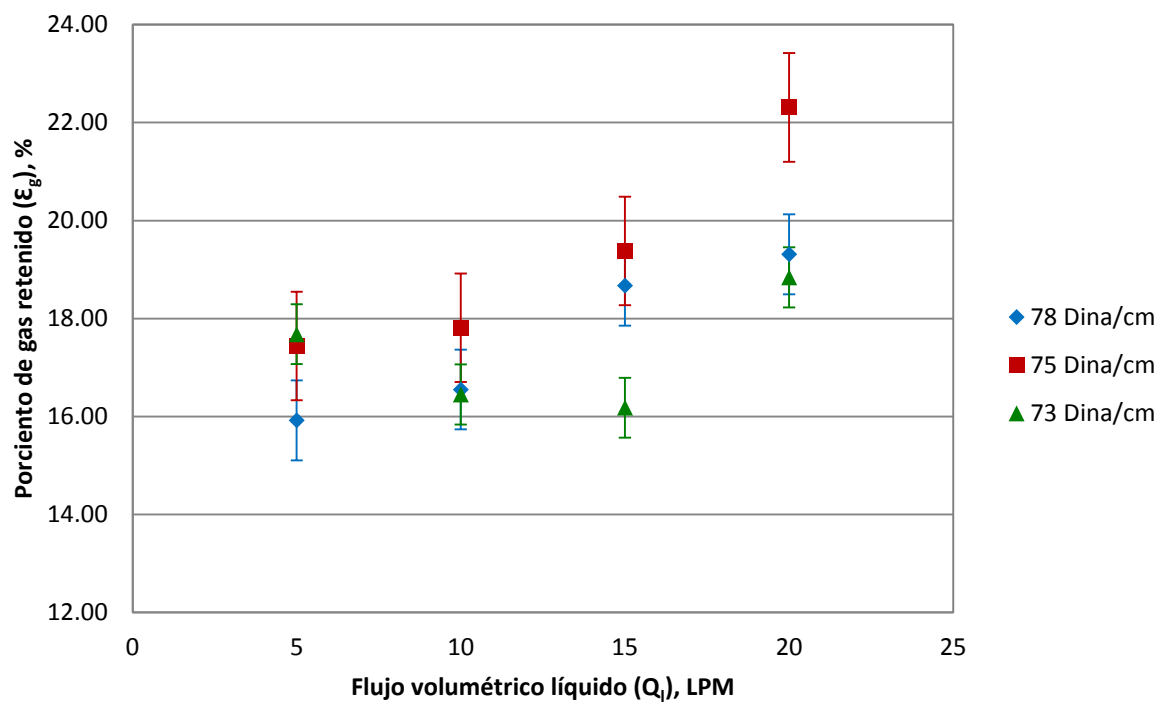


Figura 4.19. Efecto del flujo volumétrico del líquido sobre el porcentaje de gas retenido, para la relación de diámetro 2.5

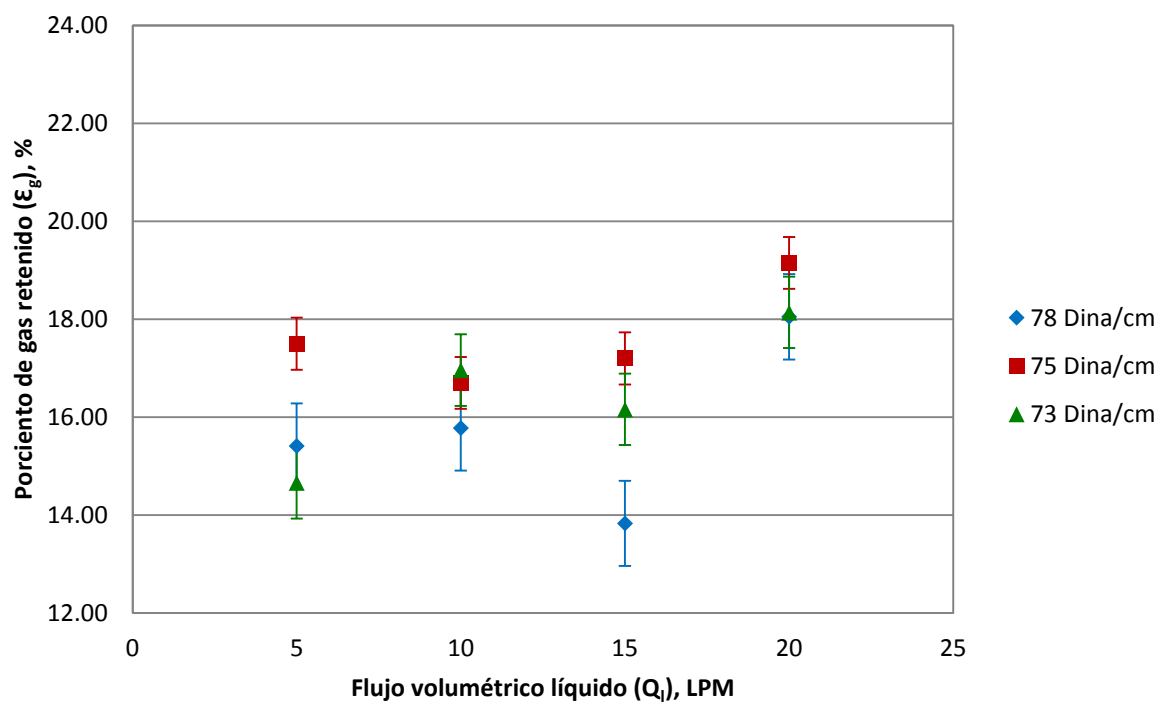


Figura 4.20. Efecto del flujo volumétrico del líquido sobre el porcentaje de gas retenido, para la relación de diámetro 3

En términos generales el porcentaje volumétrico de gas aumenta con el flujo de agua a través del ventury, aunque es menos evidente el efecto a medida que la relación de diámetro aumenta. La explicación a este comportamiento tiene que ver con la menor caída de presión que se genera cuando el diámetro menor del dispersor se acerca en valor al diámetro mayor del ventury.

En las Figs. 4.21, 4.22 y 4.23, se presenta el comportamiento del tamaño de burbuja con relación al flujo volumétrico de líquido.

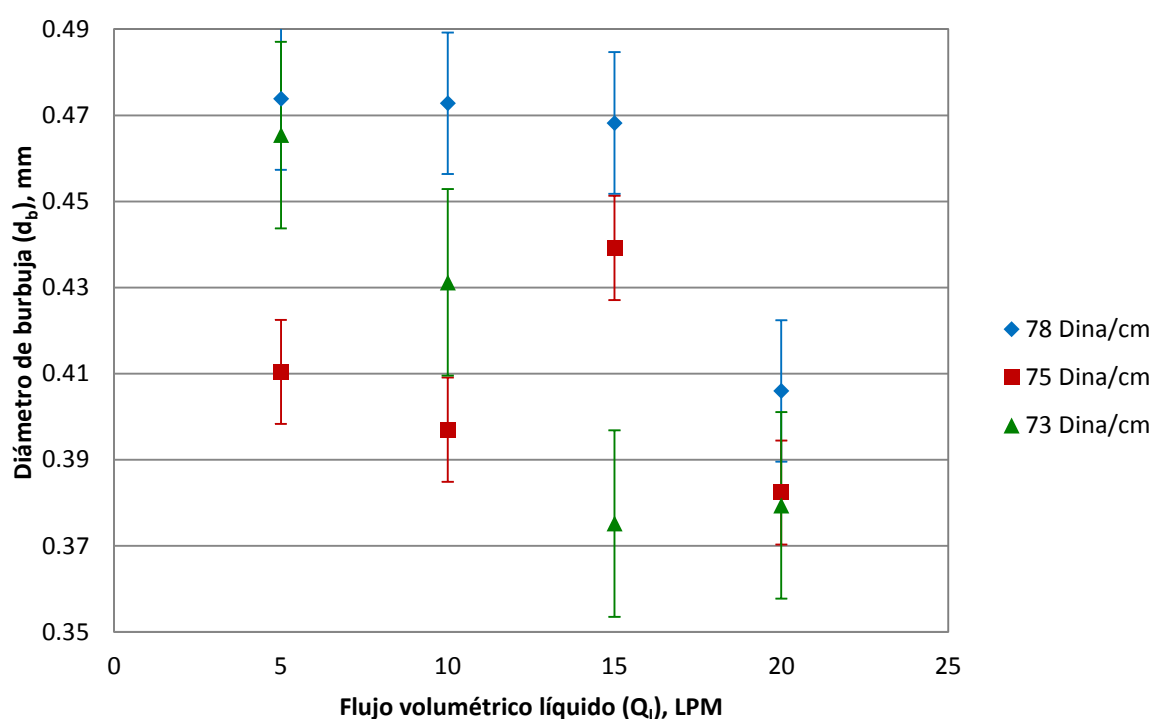


Figura 4.21. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 2

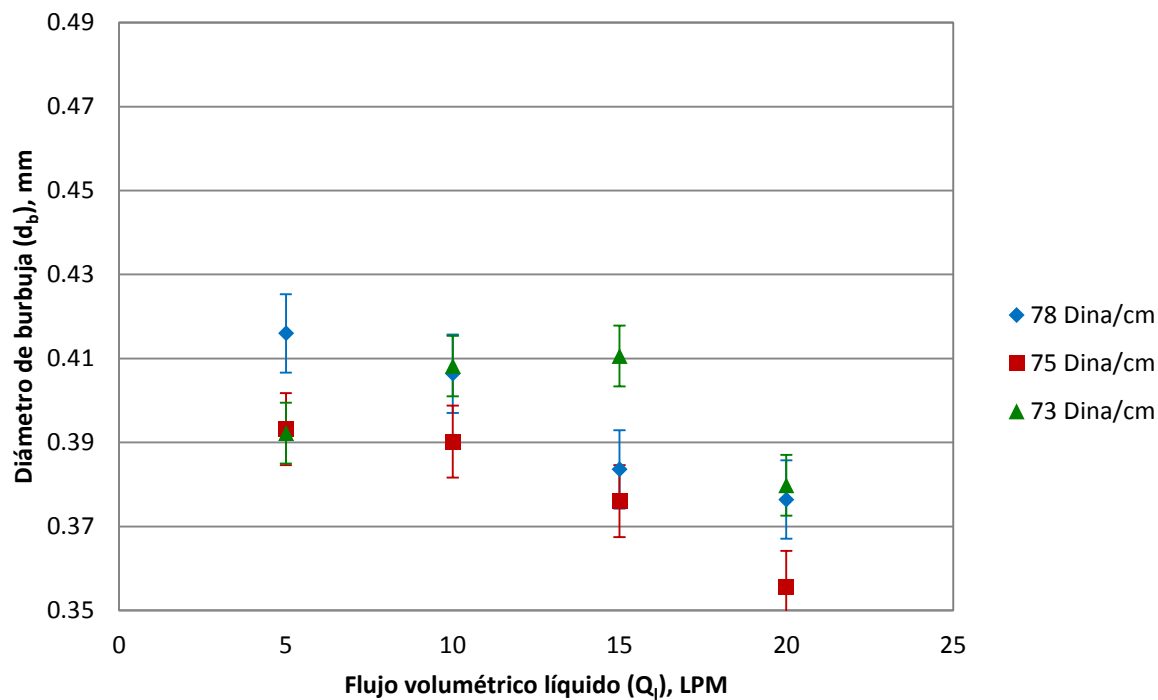


Figura 4.22. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 2.5

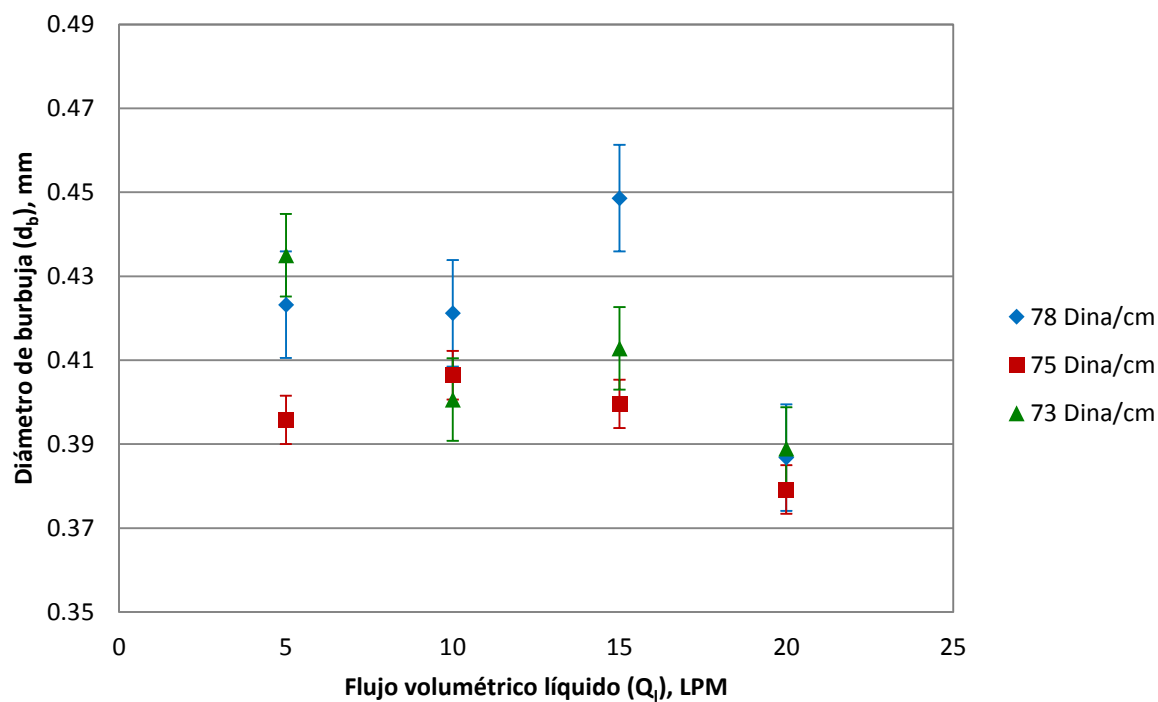


Figura 4.23. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el diámetro de burbuja, para la relación de diámetro 3

En las tres graficas anteriores (Figs. 4.21, 4.22, 4.23) se puede observar que el tamaño de burbuja disminuye con el flujo volumétrico de agua. Los tamaños mayores de burbuja (0.41 a 0.47 mm) se generan a flujo de agua de 5 a 15 litros por minuto. Tamaños menores a 0.40 mm se alcanzan cuando el flujo de líquido es mayor a 15 l/min.

En cuanto al área superficial de burbujas (S_b), la variación de esta sigue la misma tendencia que ϵ_g y es inversa a d_b , de acuerdo a la ecuación que define a S_b . Este comportamiento se muestra en las Figuras 4.24, 2.25 y 4.26.

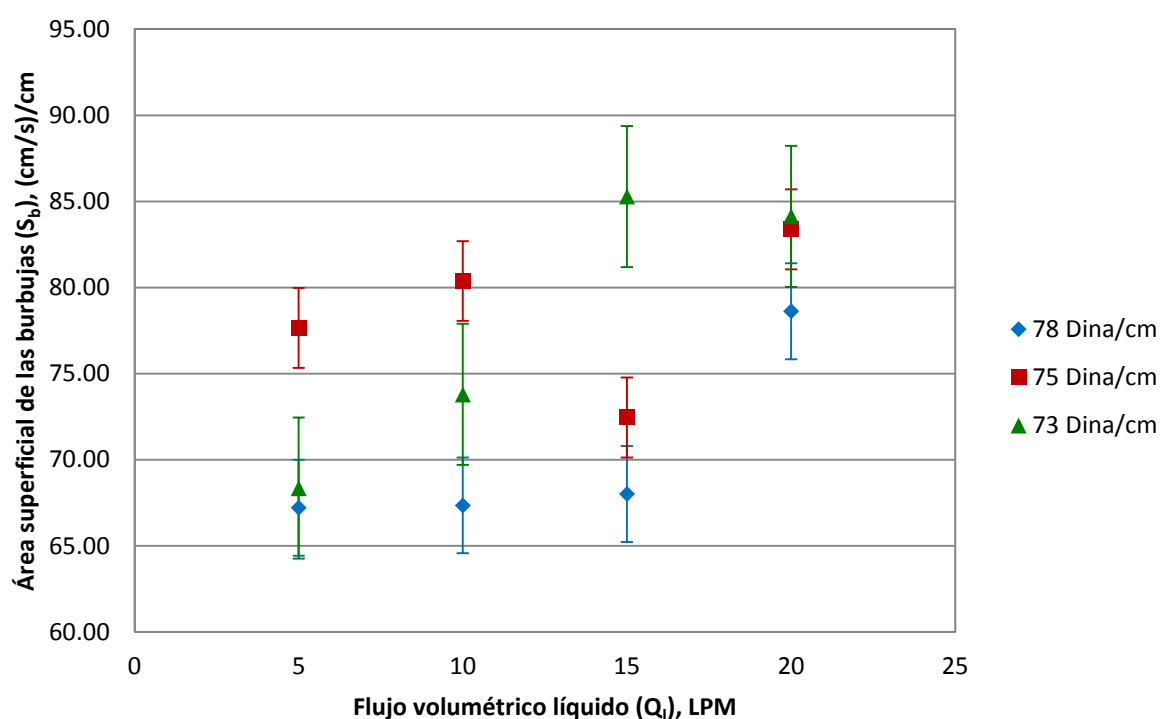


Figura 4.24. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el área superficial de la burbuja, para la relación de diámetro 2

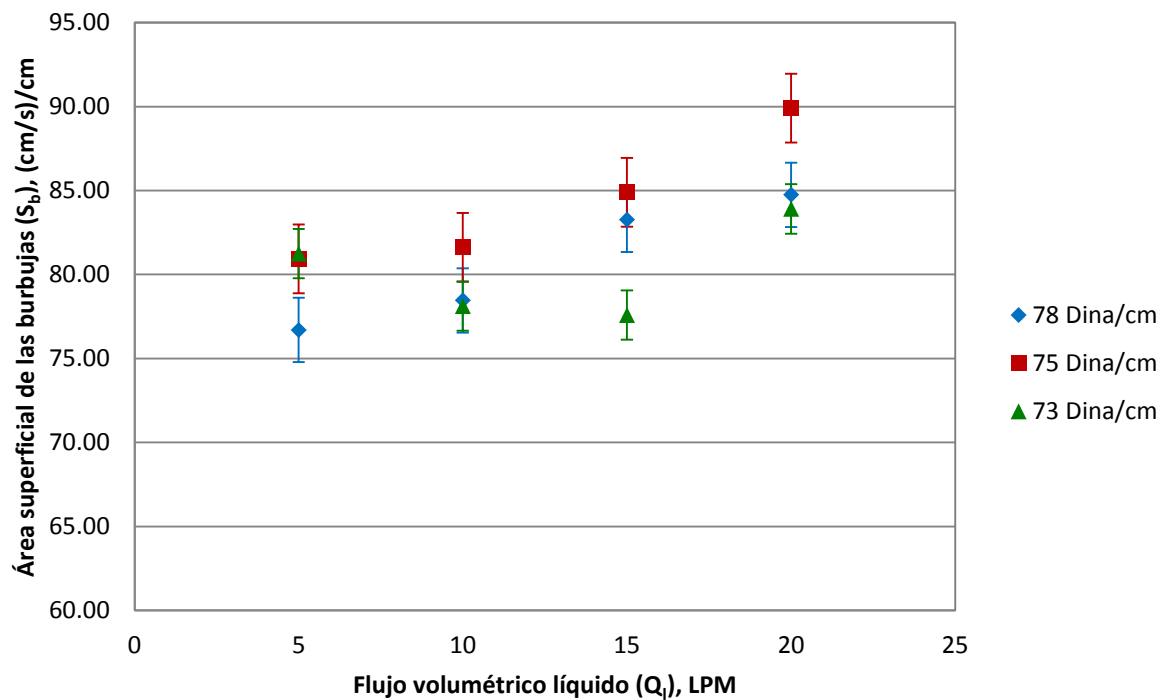


Figura 4.25. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el área superficial de la burbuja, para la relación de diámetro 2.5

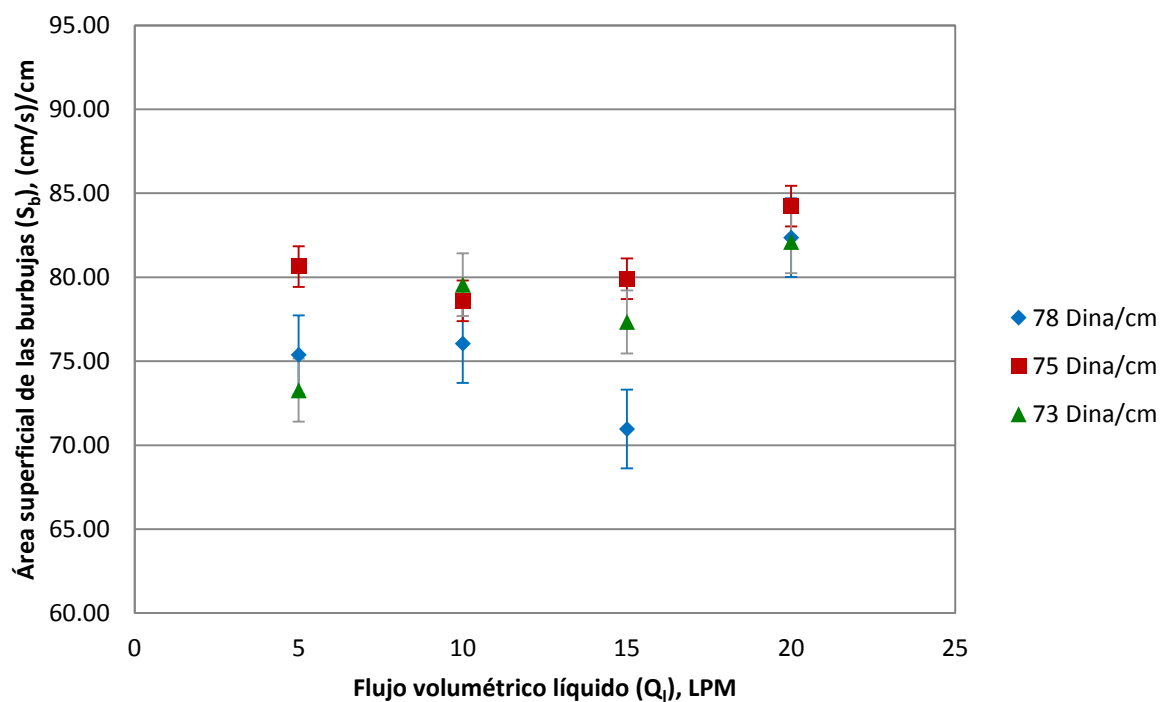


Figura 4.26. Efecto del flujo volumétrico del líquido en el área superficial de la burbuja, para la relación de diámetro 3

Es posible observar que a las menores concentraciones de espumante, el S_b se mantiene prácticamente constante; en cambio para una concentración mayor se observa una disminución en el S_b a medida que el flujo volumétrico de líquido incrementa, producto del aumento en tamaño de las burbujas. Este aumento solo puede explicarse por la coalescencia de burbujas que ingresan a la columna de flotación.

4.2.5 Efecto de la energía cinética disipada en el interior del dispersor externo tipo ventury en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro y 300 cm de altura

Como se explicó en la sección 3.2.6, la energía cinética disipada por el dispersor en el equipo de flotación fue calculada conociendo las presiones en el interior de este, tanto en el diámetro mayor como menor.

Se puede esperar que a medida que se incremente la energía cinética disipada, el tamaño de burbuja disminuye, debido a que se dispone de una cantidad de energía suficiente para crear una superficie de la interfase vapor-líquido mayor, lo cual se ve reflejado en un diámetro e burbuja menor. Este comportamiento se puede observar en la Figura 4.27.

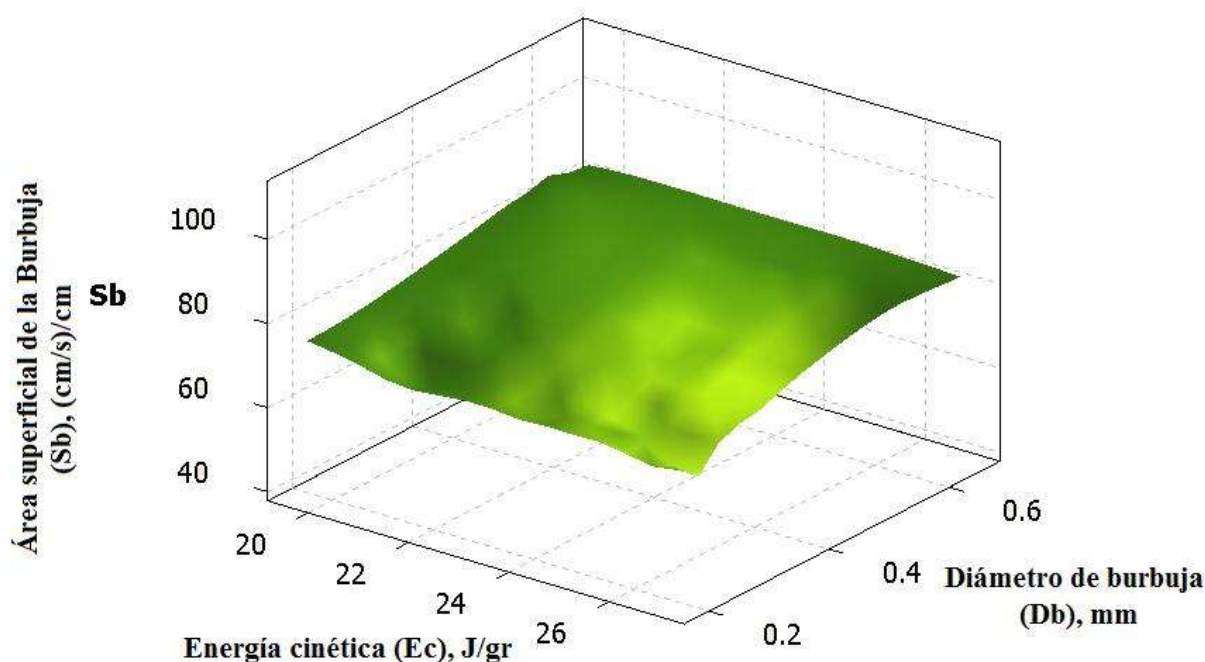


Figura 4.27. Efecto de la energía cinética disipada en el diámetro de burbuja y el área superficial de flujo de burbujas (S_b)

Se puede apreciar que el diámetro de burbuja disminuye a medida que la energía cinética aumenta; al disminuir el tamaño de burbuja, el área superficial de la burbuja aumenta. De lo anterior se puede deducir que el control de la energía cinética disipada por el dispersor de gas permite hasta cierto punto, para este estudio en particular, cierto control en las dimensiones de las características de la dispersión, hasta que la coalescencia de burbujas juegue un papel preponderante y rompa con cualquier esquema de diseño de burbujas.

4.3 Experimentos en la columna de flotación escala piloto

Se instaló el dispersor con relación de diámetro de 3 en la columna escala piloto, de 50 cm de diámetro, con la finalidad de obtener la información experimental que permita la estimación del diámetro promedio de burbuja y el cálculo de las otras características de la dispersión (d_b y ξ_g), para enseguida comparar estos valores con los predichos o diseñados mediante la ecuación de correlación obtenida con los datos experimentales recabados en la columna de 7.5 cm de diámetro.

4.3.1 Efecto de la tensión superficial

Los resultados experimentales obtenidos en la columna de flotación de escala piloto muestran que, de la misma manera que en los experimentos en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro, a medida que disminuye la tensión superficial del agua, el tamaño de las burbujas también disminuye. La Figura 4.28 muestra el comportamiento del sistema en términos de los valores de los diámetros promedios de las burbujas estimados de acuerdo al modelo de arrastre y los valores medidos de tensión superficial.

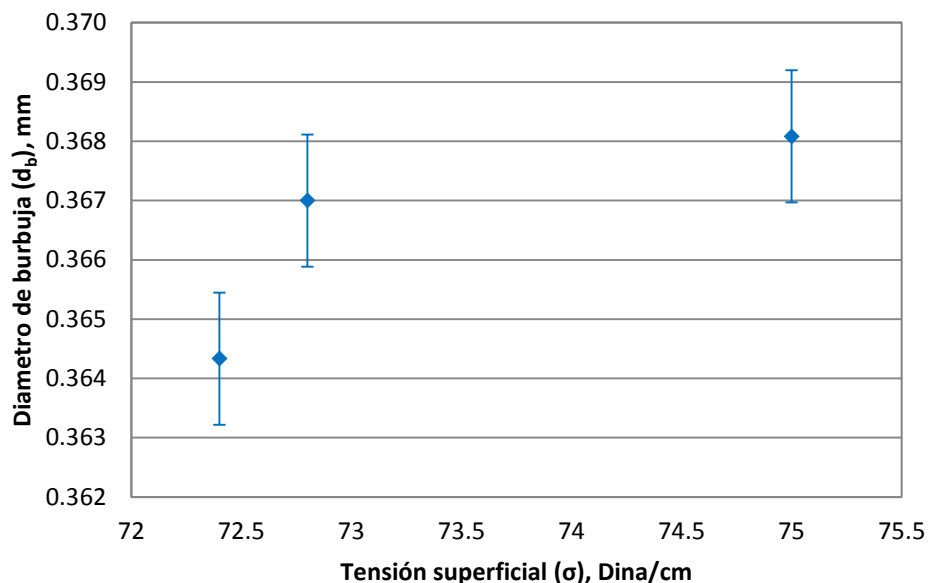


Figura 4.28. Efecto de la tensión en el diámetro de burbuja

Se observa que el tamaño de burbuja disminuye con la tensión superficial. Con el cambio en el valor de la tensión superficial se produce un cambio en el tamaño de las burbujas, lo cual conduce a una variación en el porcentaje de gas retenido; cuando disminuye la tensión superficial se anticipa que el porcentaje de gas retenido aumenta. Este comportamiento se puede observar en la Figura 4.29.

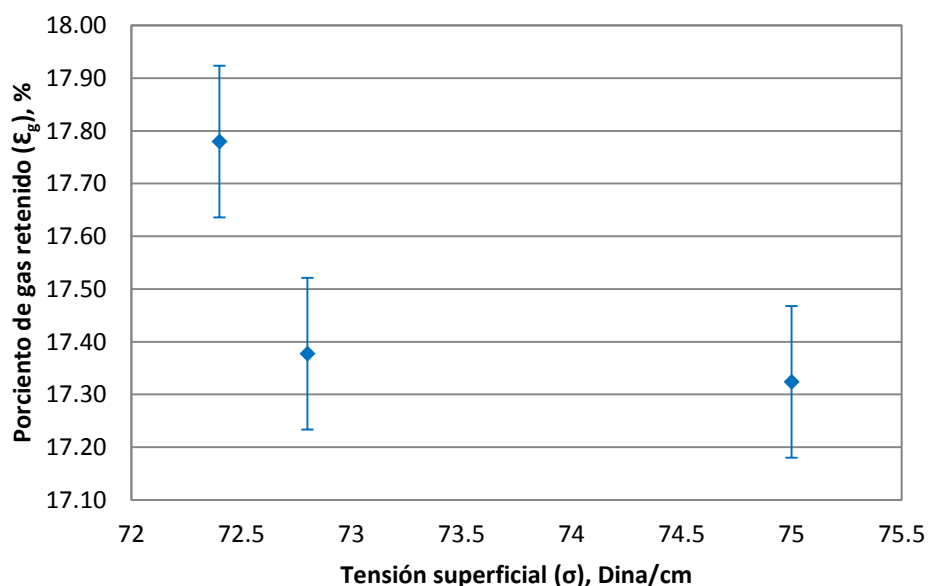


Figura 4.29. Efecto de la tensión superficial en el porcentaje de gas retenido

El flujo de área superficial de la burbuja aumenta a medida que la tensión superficial disminuye. En la figura 4.30 se observa que hay un aumento considerable en S_b a una tensión superficial de 72.8 dina/cm; esto resultados son consistentes con la disminución del tamaño de burbuja para las mismas condiciones de tensión superficial impuestas.

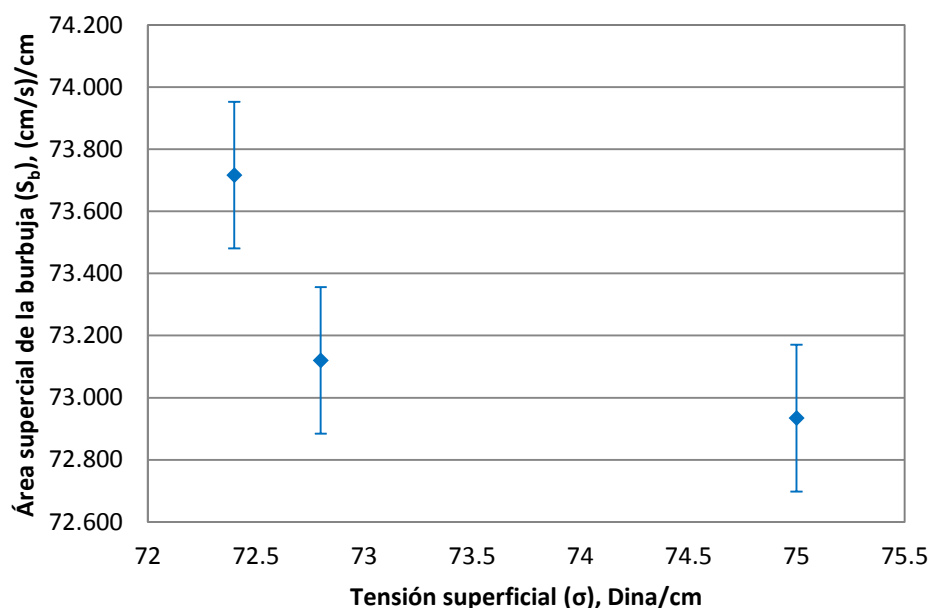


Figura 4.30. Efecto de la tensión superficial en el área superficial de la burbuja

4.3.2 Efecto del flujo volumétrico del gas

En la Figura 4.31 se muestra la influencia del flujo volumétrico de gas (Q_g) en el tamaño de burbuja. Se puede apreciar que el diámetro de burbuja tiende a incrementar a medida que Q_g aumenta; este comportamiento se debe a que Q_g está relacionado con la energía cinética disipada.

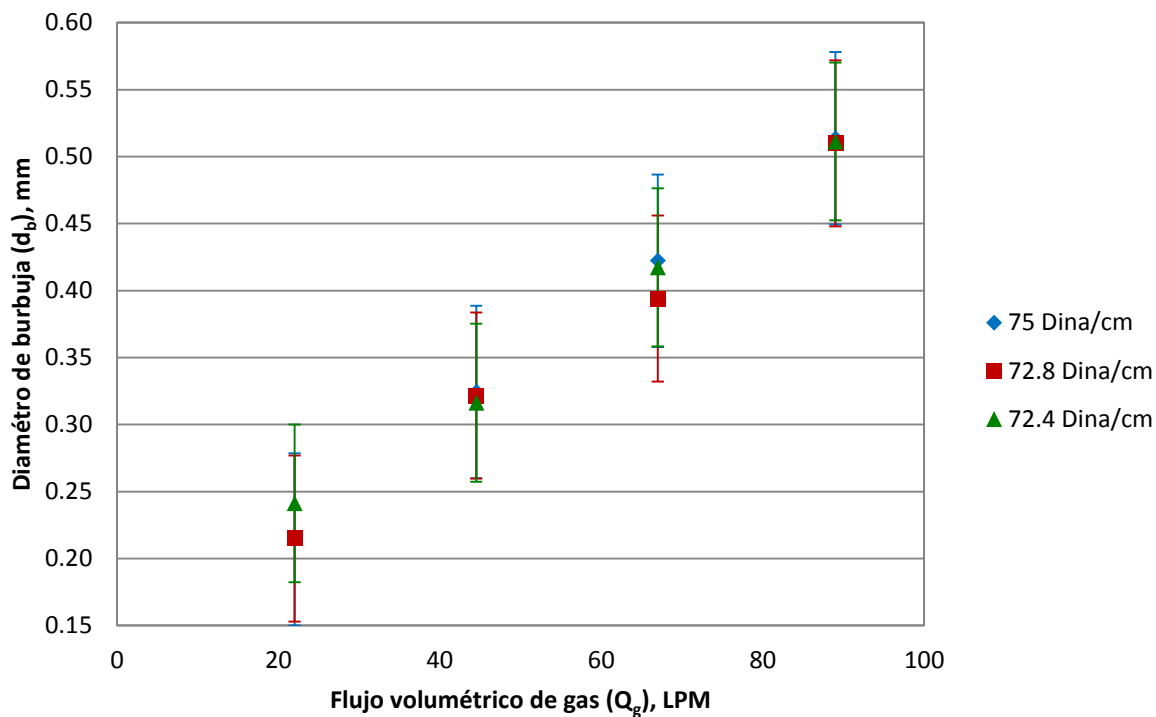


Figura 4.31. Efecto del flujo volumétrico de gas en el diámetro de burbuja

Al aumentar el tamaño de las burbujas e incrementar la cantidad de gas retenido en la columna de flotación de escala piloto, se puede esperar que el porcentaje de gas retenido aumente. Este comportamiento se presenta en la Figura 4.32, donde se puede apreciar que a fracción de gas retenido aumenta con el flujo volumétrico de gas, ya que la cantidad de gas inyectado a la columna de flotación es mayor.

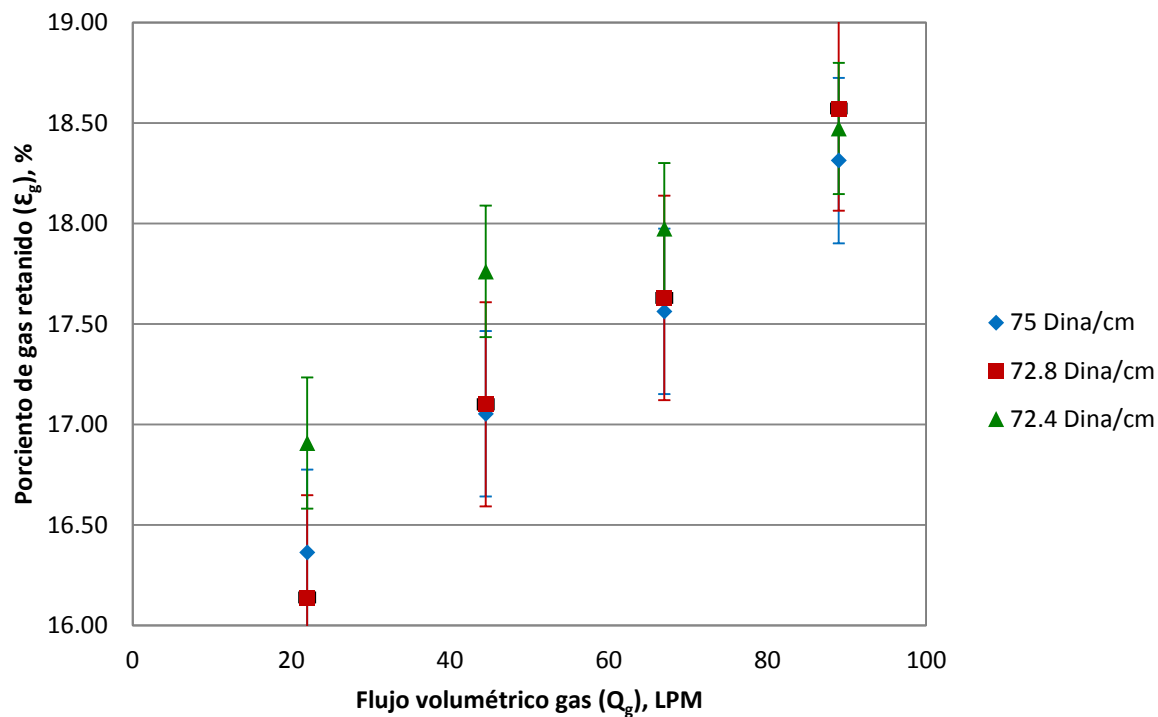


Figura 4.32. Efecto del flujo volumétrico de gas en el porcentaje de gas retenido

En la Figura 4.33 se muestra el comportamiento que tiene el flujo de área superficial de la burbuja en términos de Q_g , se espera que aumente con el incremento en el valor de esta variable [32].

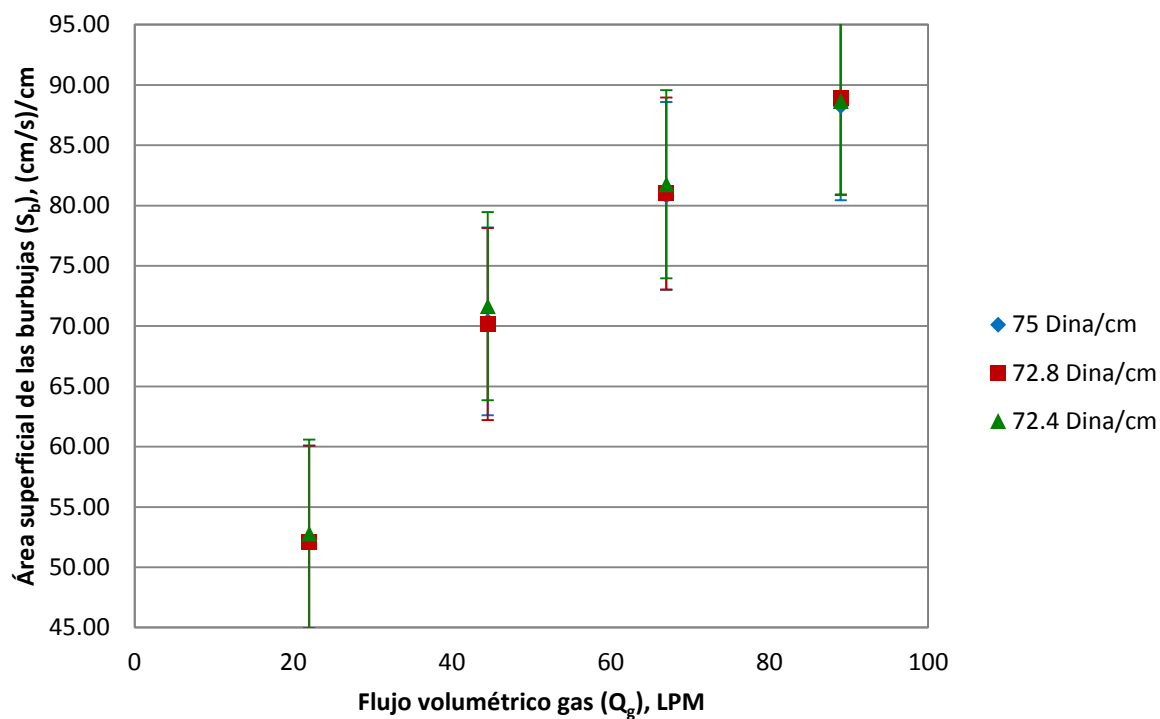


Figura 4.33. Efecto del flujo volumétrico de gas en el área de la burbuja

4.3.3 Efecto del flujo volumétrico del líquido

En la Figura 4.34 se muestra que el flujo volumétrico de líquido (Q_l) tiene una influencia en el tamaño de burbuja. Se puede observar que el diámetro de la burbuja tiende a aumentar a medida que el flujo volumétrico de líquido aumenta.

Como se explicó en párrafos anteriores, a pesar de que la caída de presión y por lo tanto la energía cinética en el dispersor aumenten, el diámetro de burbuja aumenta debido al fenómeno de coalescencia de burbujas.

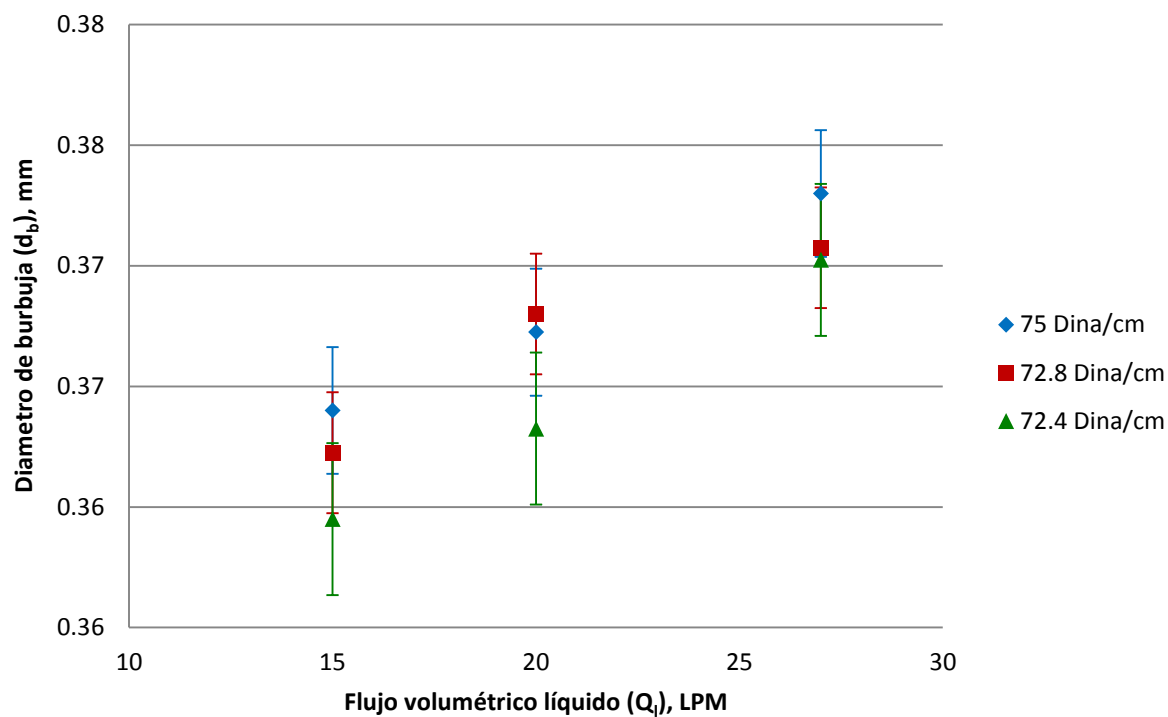


Figura 4.34. Efecto del flujo volumétrico de líquido en el diámetro de burbuja

La Figura 4.35 respalda lo mencionado en el anterior párrafo, donde las variaciones en el porcentaje de gas retenido son dependientes del fenómeno de coalescencia de burbujas, más que de las variaciones en la energía cinética del dispersor.

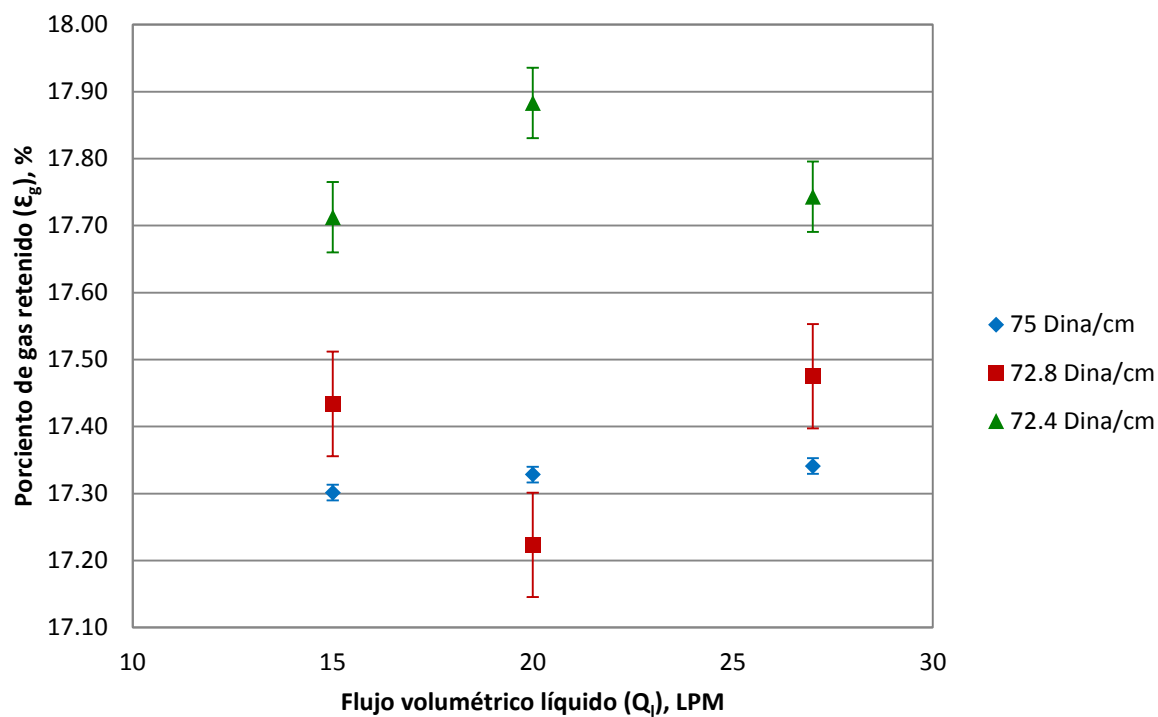


Figura 4.35. Efecto del flujo volumétrico de líquido en el porcentaje de gas retenido

En la Figura 4.36 se grafica el comportamiento del flujo de área superficial de burbujas en términos de Q_l ; mientras el flujo volumétrico de líquido aumenta, el S_b disminuye, también producto de la coalescencia de burbujas.

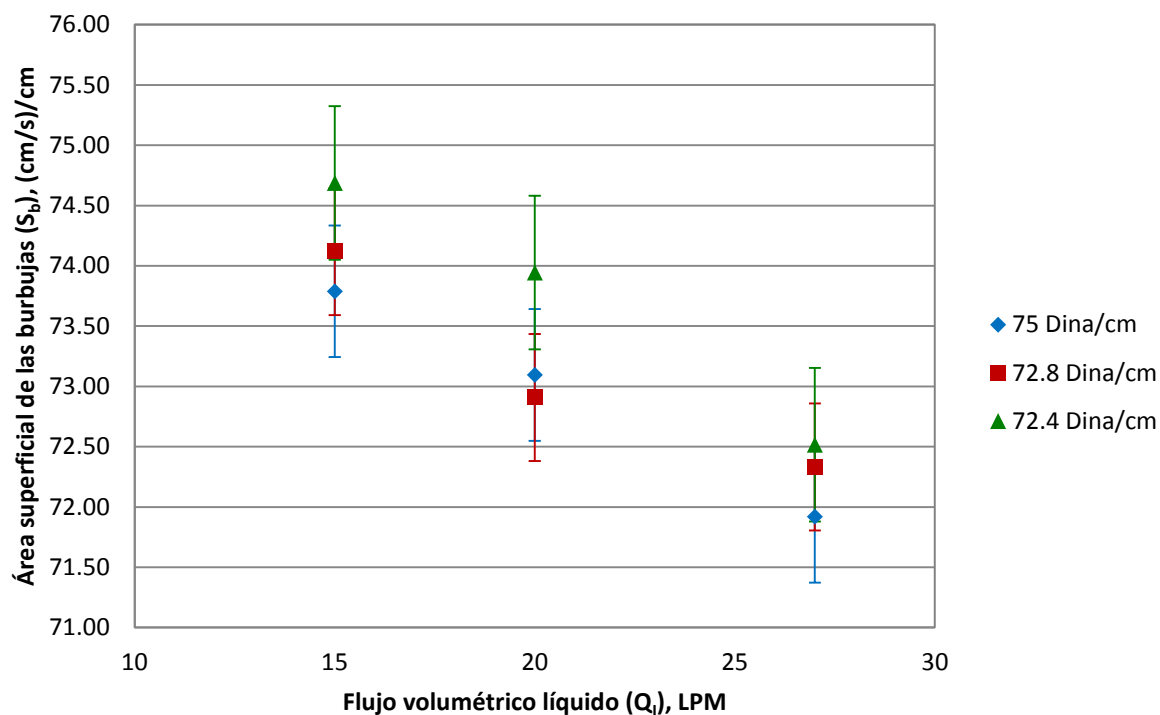


Figura 4.36. Efecto del flujo volumétrico de líquido en el área superficial de la burbuja

4.3.4 Efecto de la energía cinética disipada en el dispersor tipo ventury en la columna de flotación escala piloto

En un dispersor de gas, cuando la cantidad de energía cinética que se disipa es grande, se refleja en la formación de burbujas un poco más grandes y, por tanto, en la producción de mayor área superficial de burbujas. Este comportamiento se puede notar en la Figura 4.37, donde se aprecia que cuando se disipa la mayor cantidad de energía cinética se tiene el diámetro de burbuja mayor, y el valor de área superficial de la burbuja más elevada.

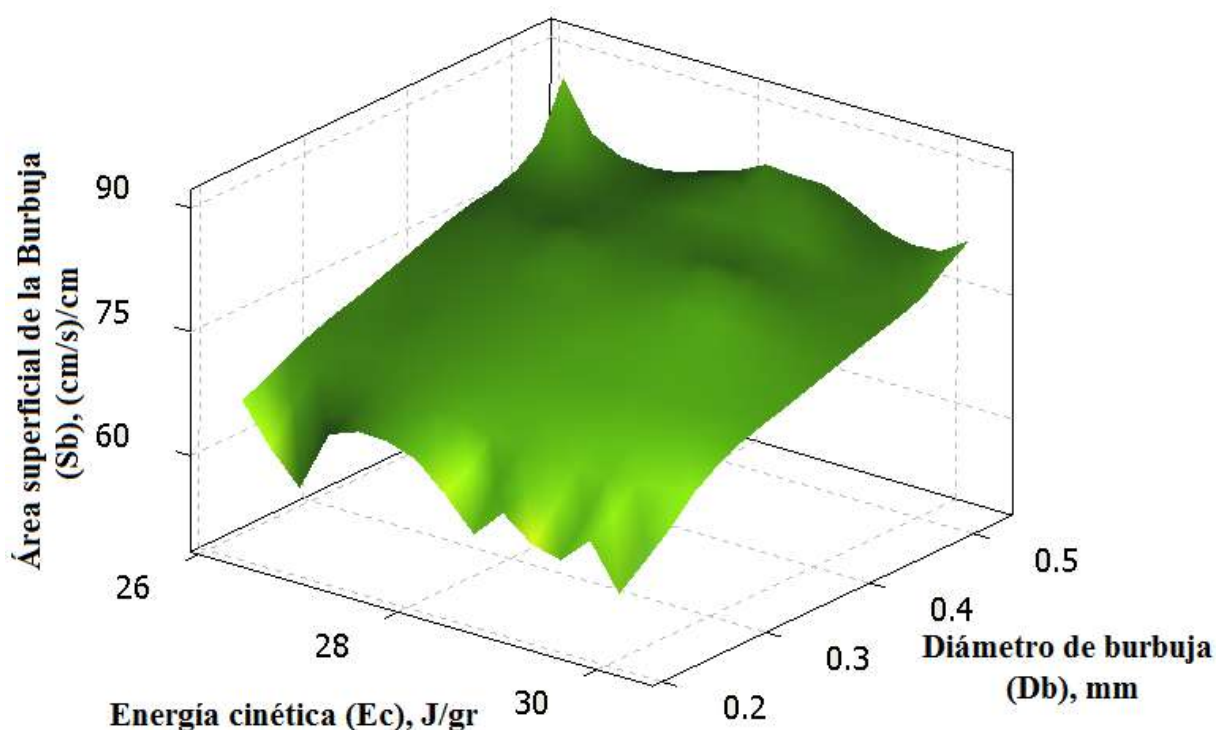


Figura 4.37. Efecto de la energía cinética disipada en el diámetro de burbuja y el área superficial de la burbuja en la columna de flotación escala piloto

4.4 Modelo matemático propuesto para la predicción del tamaño de burbuja

En base a los resultados experimentales obtenidos en la columna de flotación de laboratorio de 7.5 cm de diámetro y 300 cm de altura; se realizó un modelo lineal empírico. Como se mencionó en la sección 3.4, el modelo requiere algunos datos como el flujo volumétrico del gas, el flujo volumétrico del líquido, la caída de presión, la tensión superficial y la relación de diámetros. La ecuación obtenida para el modelo empírico se presenta a continuación:

$$d_b = 0.0255 + 0.00737 J_l - 0.451 J_g - 0.0267 \left(\frac{d_M}{d_m} \right) + 0.00451 \sigma - 0.000469 \Delta P;$$

$$R^2 = 0.957 \quad (4.2)$$

De acuerdo a la ecuación anterior, podemos determinar que la variable que tiene una mayor influencia sobre el diámetro de burbuja, es la velocidad superficial de gas, la cual tiene el coeficiente más alto, seguido por la relación de diámetro, y la variable que menos efecto tiene,

es la caída de presión generada en el interior del dispersor; esto es congruente con la tabla de correlaciones que se muestra a continuación (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Tabla de correlaciones de las variables presentes en el modelo

TABLA DE CORRELACIÓN							
	d_M/d_m	σ	Q_l	Q_g	μ	ΔP	d_b
d_M/d_m	1						
σ	0	1					
Q_l	0	0	1				
Q_g	0	0	0	1			
μ	*	*	*	*	1		
ΔP	-0.39	0.121	-0.145	-0.151	*	1	
d_b	-0.466	0.064	-0.111	0.966	*	-0.027	1

En la ecuación anterior, de acuerdo al modelo de Bernoulli desarrollado para este dispersor, el termino ΔP puede ser sustituido por la ecuación (2.5), para obtener una ecuación en términos de las características dimensionales del dispersor (relación de diámetros, mayor y menor del dispersor), así como de las variables de operación y de las características físico-químicas del medio continuo. La expresión es la siguiente:

$$d_b = 0.0255 + 0.00737 J_l - 0.451 J_g - 0.0267 \left(d_M/d_m \right) + 0.00451 \sigma - 0.000469 \left[\frac{8 \Delta_p Q_g^2}{g \pi^2} \left[\frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4} \right] \right]$$

El modelo empírico desarrollado en este trabajo en base a las características del dispersor externo tipo ventury y de las propiedades fisicoquímicas del sistema, se valida en sus predicciones contra la medición del tamaño de las burbujas que se generan. En la Figura 4.38, se muestra la validación del modelo empírico. Se puede observar que el modelo predice el tamaño de las burbujas con un error del 10% en todos los casos, lo cual es aceptable desde el punto de vista de la industria e ingeniería.

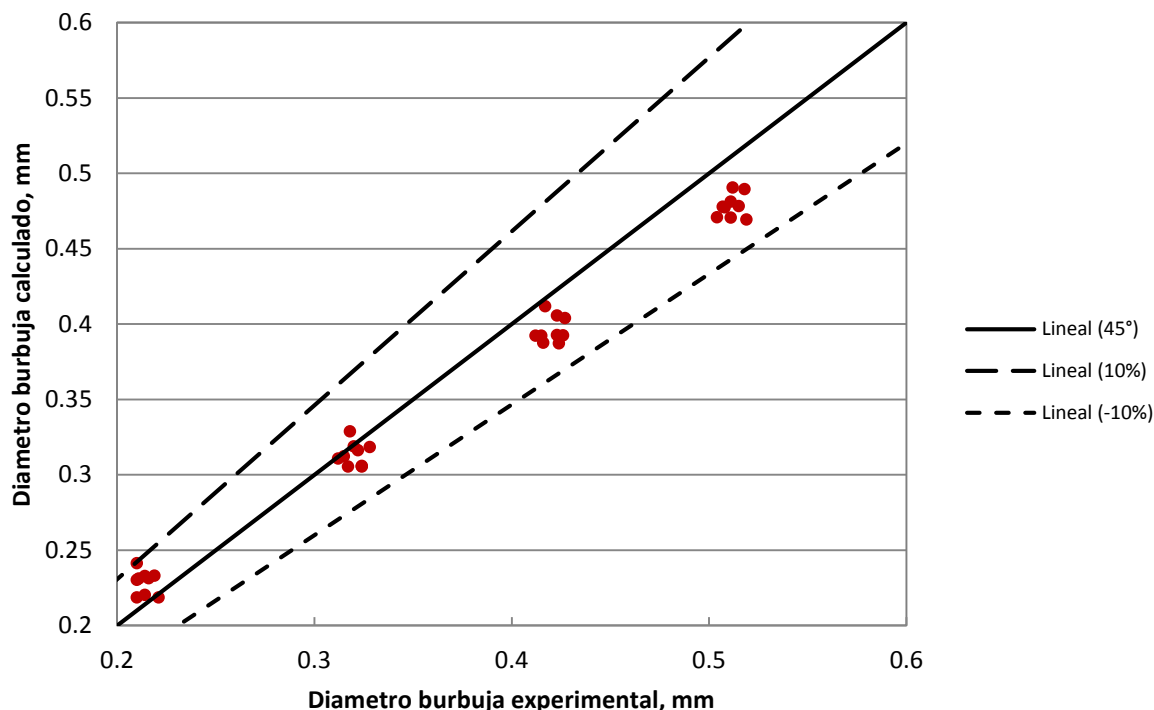


Figura 4.38. Predicción del tamaño de la burbuja con el uso del modelo empírico en la columna de flotación de escala piloto

Se observa que la mayor desviación en la convergencia de datos experimentales y calculados se presenta cuando el diámetro de burbuja aumenta. Este hecho valida las aclaraciones de párrafos anteriores que señalan el papel que juega en esta serie de experimentos el fenómeno de coalescencia de burbujas.

Sin embargo, el modelo de regresión lineal propuesto en este trabajo, que caracteriza el dispersor externo tipo ventury, aceptablemente diseña o predice el diámetro de burbuja promedio que se obtendrá bajo las condiciones experimentales que abarca este trabajo de investigación.

Cabe aclarar que el flujo superficial de aire máximo ($J_g = Q_g/A_c$) que se inyecta típicamente a los equipos de dispersión en la industria, es de alrededor de 1.0 cm/s. En este trabajo de investigación este valor máximo es de 0.95, el cual es muy cercano al utilizado industrialmente.

Por lo anterior, se establece que la desviación entre las características de la dispersión estimadas experimentalmente y predichas mediante el modelo de regresión, será menor del 10%, independientemente del gran efecto de la coalescencia de burbujas. Este fenómeno de coalescencia se presenta siempre durante la operación de las columnas o celdas de dispersión [10, 17, 18, 20, 28, 29]; incluso, este fenómeno es considerado en la teoría de arrastre o Drift-flux [21, 22].

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Los experimentos se llevaron a cabo en una columna de flotación de 7.5 cm de diámetro y en una columna de flotación de escala piloto. En ambas columnas tanto el gas como el agua se alimentaron a través del dispersor externo tipo ventury, en el cual se generaba el mezclado; así mismo los flujos volumétricos de gas y líquido eran controlados. Una vez analizados los resultados se derivan las siguientes conclusiones.

1. Es posible controlar y predecir el tamaño de burbuja producidas en un sistema de flotación aire-agua (sin presencia de sólidos) con el dispersor externo tipo ventury utilizado en este trabajo. Mediante su diseño es posible medir y controlar la caída de presión (y por lo tanto la energía cinética) en su interior.
2. Se desarrolló un modelo matemático lineal y empírico que predice el tamaño de las burbujas a partir de la relación de diámetros del dispersor externo tipo ventury, la velocidad superficial de gas, la velocidad superficial de líquido, la viscosidad del líquido y la tensión superficial del medio:

$$d_b = 0.0255 + 0.00737 J_l - 0.451 J_g - 0.0267 \left(d_M / d_m \right) + 0.00451 \sigma \\ - 0.000469 \left[\frac{8 \Delta \rho Q_g^2}{g \pi^2} \left[\frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4} \right] \right]$$

3. La adición de surfactante (aceite de pino) provoca una disminución en la tensión superficial, lo cual origina una disminución en el tamaño de burbuja y un incremento en las otras dos características de la dispersión de gas: fracción de gas retenido y área superficial de burbujas, hasta que la aparición del fenómeno de coalescencia disminuye estas dos últimas características de la dispersión.
4. El incremento en los flujos volumétrico de aire y agua afectan el tamaño de burbuja, aunque este efecto no resulta significativo en este trabajo, debido a que el fenómeno de coalescencia afecta en mayor medida las características de la dispersión originales; o sea, las que genera el dispersor.

El dispersor externo tipo ventury utilizado en el presente trabajo permite controlar el tamaño de las burbujas producidas. La simplicidad en este procedimiento de la práctica puede garantizar, en dado caso, una transferencia tecnológica relativamente simple para la aplicación de la técnica en la industria.

5.2 Recomendaciones

1. Establecer las condiciones de operación del dispersor de gas de manera tal que el fenómeno de coalescencia de burbujas altere en menor medida las características de la dispersión; es decir, a valores de J_g menores a 1 cm/s y flujos de líquido que eviten el aumento en el diámetro de burbuja.
2. Estudiar el efecto que genera la presencia de solidos hidrófobos e hidrófilos en una pulpa mineral, en el tamaño de burbuja y en general en las características de la dispersión.
3. Realizar la instrumentación de la columna de flotación para poder tener mediciones más acertadas y en tiempo real.
4. Estudiar el fenómeno que se presenta al incorporar al sistema agentes colectores y reguladores de pH.

5.3 Aportaciones

Se realizó un modelo empírico del dispersor externo tipo ventury, mediante el cual es posible predecir el tamaño de burbuja, mediante a las variables de operación (flujo volumétrico de gas, flujo volumétrico de líquido), variables fisicoquímicas del medio (tensión superficial, viscosidad), y a las características de diseño del dispersor (relación de diámetro).

BIBLIOGRAFIA.

1. G. Vallebuona, A.C.y.F.R., *Caracterización de la distribución de burbujas en celdas de flotación de minerales*. CONAMET/SAM, 2006.
2. Alcalá Cruz E., F.C.A., Beltran Alfonso A., *Manual de entrenamiento en concentración de minerales*. SERGEOTECMIN.
3. Jameson, G., S. Nam, and M.M. Young, *Physical factors affecting recovery rates in flotation*. Miner. Sci. Eng. 1977. **9**(3): p. 103-118.
4. Diaz-Penafiel, P., Dobby, G. S., *Kinetic studies in flotation columns: Bubble size effect*. Miner. Eng., 1994. **7**(4): p. 465-478.
5. Grau R.A., H., K., *Visual technique for measuring bubble size in flotation machines*. Miner. Eng., 2002. **15**(7): p. 507-513.
6. Arbiter, N., Harris, C. C., *Flotation kinetics*. 1962, New York: AIME. 215-246.
7. Barigou M., G.M., *A capillary suction probe for bubble size measurement*. Vol. 2. 1991: Sci. Technol. 318-326.
8. Cheng Y. H., M.M.W., Salama A. I. A., *Bubble generation by a two-phase ejector*, in *Third International Symposium on Column Flotation*. 1996.
9. Camarasa, E., et al., *Influence of coalescence behaviour of the liquid and of gas sparging on hydrodynamics and bubble characteristics in a bubble column*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 1999. **38**(4-6): p. 329-344.
10. Tavera, F.J., C.O. Gomez, and J.A. Finch, *Estimation of gas holdup in froths by electrical conductivity: Application of the standard addition method*. Minerals Engineering, 1998. **11**(10): p. 941-947.
11. Maxwell, J.C., *A treatise on electricity and magnetism*. Vol. 1. 1881: Clarendon press.
12. Mandal, A., G. Kundu, and D. Mukherjee, *A Comparative Study of Gas Holdup, Bubble Size Distribution and Interfacial Area in a Downflow Bubble Column*. Chemical Engineering Research and Design, 2005. **83**(4): p. 423-428.
13. Escudero G. R., T.M.F.J., *Balance de la ecuacion de bernoulli y la generacion de burbujas para un dispersor tipo jet* Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 2010. **14**(2): p. 13-14.
14. Barrera Mendoza, G.E., *“CONTROL DE TAMAÑO DE BURBUJAS EN SISTEMAS DE FLOTACIÓN UTILIZANDO DISPERSORES DE GAS TIPO JET DE ORIFICIO DE DESCARGA DE ABERTURA VARIABLE”*, in *Instituto de Investigaciones Metalúrgicas*. 2012, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMICH).
15. Silberman, E., *Air-Water Mixture Flow Through Orfices, Bends, and other Fittings in a Horizontal Pipe*. Project Report. 1960: St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory.
16. Spyridopoulos M., S.S.N.S., Cilliers J., *Effect of humic substances and particles on bubble coalescence and foam stability in relation to dissolved air flotation*, in *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2004. p. 37-52.
17. K., T., *Surface Tension and Surfactant*, in *RBU Functional Polymers* 2006, NAFTA.

18. Diaz-Penafiel, P. and G.S. Dobby, *Kinetic studies in flotation columns: Bubble size effect*. Minerals Engineering, 1994. **7**(4): p. 465-478.
19. Kulkarni, A.A. and J.B. Joshi, *Bubble Formation and Bubble Rise Velocity in Gas-Liquid Systems: A Review*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005. **44**(16): p. 5873-5931.
20. Grau, R.A. and J.S. Laskowski, *Role of Frothers in Bubble Generation and Coalescence in a Mechanical Flotation Cell*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2006. **84**(2): p. 170-182.
21. Masliyah, J.H. *Hindered settling in a multi-species particle system*. Chemical Engineering Science, 1979. **34**(9): p. 1166-1168.
22. Jamialahmadi, M., et al., *Study of Bubble Formation Under Constant Flow Conditions*. Chemical Engineering Research and Design, 2001. **79**(5): p. 523-532.
23. Maxwell, J.C. and J.J. Thompson, *A treatise on electricity and magnetism*. Vol. 2. 1904: Clarendon.
24. Perry, J.H., *Chemical engineers' handbook*. Journal of Chemical Education, 1950. **27**(9): p. 533.
25. Simpson, J., et al., *Modelación empírica de flotación en columna a escala piloto*. revista de metalurgia, 2010. **46**(2): p. 101-108.
26. Grau, R.A., J.S. Laskowski, and K. Heiskanen, *Effect of frothers on bubble size*. International Journal of Mineral Processing, 2005. **76**(4): p. 225-233.
27. Gomez, C.O., R. Escudero, and J.A. Finch, *Determining equivalent pore diameter for rigid porous spargers*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2000. **78**(4): p. 785-792.
28. Tse, K., et al., *Small bubble formation via a coalescence dependent break-up mechanism*. Chemical Engineering Science, 2003. **58**(2): p. 275-286.
29. Tavera, F., R. Escudero, and J. Finch, *Gas holdup in flotation columns: laboratory measurements*. International Journal of Mineral Processing, 2001. **61**(1): p. 23-40.
30. Reyes, M., et al., *Cinética de separación de Cu (II) por técnicas de flotación iónica, en celdas con dispersores flexibles*. revista de metalurgia, 2010. **46**(2): p. 109-120.
31. Orozco López, Y.R., *Estudio del Efecto del tipo y concentración de espumante en la selectividad del proceso de flotación a escala laboratorio*. 2012.
32. Fonseca Mora, J.A., *Análisis, modelación y simulación del proceso de flotación en una celda de contacto*. 2012.

ANEXO A

Tabla A.1. Resultados experimentales en la columna de flotación de 7.5 cm de diámetro

Relación diámetro (cm)			σ	Q_l	J_l	Q_g	J_g	μ	E_g	ΔP	d_b	S_b	E_c
D mayor	D menor	Relación	Dina/cm	cm ³ /s	cm/s	cm ³ /s	cm/s	gr/cm s	%	grf/cm ²	mm	(cm/s)/(cm)	J/gr
2.54	1.27	2	78	333.33	7.545	41.67	0.943	0.01	19.01	231.80	0.58	97.57	23.18
2.54	1.27	2	78	333.33	7.545	33.33	0.755	0.01	17.46	234.93	0.51	89.64	23.49
2.54	1.27	2	78	333.33	7.545	25.00	0.566	0.01	18.55	236.56	0.39	87.06	23.66
2.54	1.27	2	78	333.33	7.545	16.67	0.377	0.01	14.86	239.01	0.32	69.86	23.90
2.54	1.27	2	78	333.33	7.545	8.33	0.189	0.01	11.51	241.05	0.23	48.99	24.10
2.54	1.27	2	78	250.00	5.659	41.67	0.943	0.01	17.03	237.24	0.62	91.12	23.72
2.54	1.27	2	78	250.00	5.659	33.33	0.755	0.01	13.91	239.28	0.58	77.52	23.93
2.54	1.27	2	78	250.00	5.659	25.00	0.566	0.01	12.54	241.18	0.49	69.43	24.12
2.54	1.27	2	78	250.00	5.659	16.67	0.377	0.01	10.94	243.36	0.39	58.79	24.34
2.54	1.27	2	78	250.00	5.659	8.33	0.189	0.01	9.04	248.52	0.26	43.20	24.85
2.54	1.27	2	78	166.67	3.773	41.67	0.943	0.01	16.43	242.68	0.64	89.12	24.27
2.54	1.27	2	78	166.67	3.773	33.33	0.755	0.01	14.19	245.13	0.58	78.59	24.51
2.54	1.27	2	78	166.67	3.773	25.00	0.566	0.01	12.16	247.84	0.50	68.04	24.78
2.54	1.27	2	78	166.67	3.773	16.67	0.377	0.01	10.49	250.16	0.40	57.30	25.02
2.54	1.27	2	78	166.67	3.773	8.33	0.189	0.01	9.19	252.87	0.26	43.70	25.29
2.54	1.27	2	78	83.33	1.886	41.67	0.943	0.01	15.67	247.44	0.66	86.26	24.74
2.54	1.27	2	78	83.33	1.886	33.33	0.755	0.01	14.48	248.80	0.57	79.70	24.88
2.54	1.27	2	78	83.33	1.886	25.00	0.566	0.01	12.56	250.56	0.49	69.58	25.06
2.54	1.27	2	78	83.33	1.886	16.67	0.377	0.01	10.41	252.87	0.40	57.02	25.29
2.54	1.27	2	78	83.33	1.886	8.33	0.189	0.01	9.14	254.23	0.26	43.53	25.42
2.54	1.27	2	75	333.33	7.545	41.67	0.943	0.01	21.78	201.89	0.54	105.18	20.19
2.54	1.27	2	75	333.33	7.545	33.33	0.755	0.01	19.94	204.20	0.47	96.32	20.42
2.54	1.27	2	75	333.33	7.545	25.00	0.566	0.01	18.62	208.01	0.39	87.06	20.80
2.54	1.27	2	75	333.33	7.545	16.67	0.377	0.01	17.02	215.89	0.30	74.46	21.59
2.54	1.27	2	75	333.33	7.545	8.33	0.189	0.01	14.18	224.32	0.21	53.89	22.43
2.54	1.27	2	75	250.00	5.659	41.67	0.943	0.01	18.75	196.45	0.59	96.73	19.65
2.54	1.27	2	75	250.00	5.659	33.33	0.755	0.01	17.23	198.08	0.51	88.94	19.81
2.54	1.27	2	75	250.00	5.659	25.00	0.566	0.01	13.74	199.17	0.46	73.65	19.92
2.54	1.27	2	75	250.00	5.659	16.67	0.377	0.01	11.22	204.20	0.38	59.72	20.42
2.54	1.27	2	75	250.00	5.659	8.33	0.189	0.01	9.00	207.47	0.26	43.20	20.75
2.54	1.27	2	75	166.67	3.773	41.67	0.943	0.01	20.76	229.49	0.55	102.52	22.95
2.54	1.27	2	75	166.67	3.773	33.33	0.755	0.01	18.06	231.80	0.50	91.27	23.18
2.54	1.27	2	75	166.67	3.773	25.00	0.566	0.01	16.78	233.70	0.41	82.61	23.37
2.54	1.27	2	75	166.67	3.773	16.67	0.377	0.01	15.79	235.88	0.32	71.86	23.59
2.54	1.27	2	75	166.67	3.773	8.33	0.189	0.01	13.92	237.92	0.21	53.64	23.79

2.54	1.27	2	75	83.33	1.886	41.67	0.943	0.01	19.46	232.21	0.57	98.93	23.22
2.54	1.27	2	75	83.33	1.886	33.33	0.755	0.01	17.44	233.84	0.51	89.47	23.38
2.54	1.27	2	75	83.33	1.886	25.00	0.566	0.01	16.26	236.02	0.42	81.23	23.60
2.54	1.27	2	75	83.33	1.886	16.67	0.377	0.01	14.15	237.92	0.33	68.18	23.79
2.54	1.27	2	75	83.33	1.886	8.33	0.189	0.01	12.22	239.96	0.22	50.53	24.00
2.54	1.27	2	73	333.33	7.545	41.67	0.943	0.01	21.37	227.72	0.54	104.21	22.77
2.54	1.27	2	73	333.33	7.545	33.33	0.755	0.01	20.64	231.12	0.46	97.99	23.11
2.54	1.27	2	73	333.33	7.545	25.00	0.566	0.01	18.79	233.03	0.39	87.51	23.30
2.54	1.27	2	73	333.33	7.545	16.67	0.377	0.01	17.24	236.29	0.30	74.95	23.63
2.54	1.27	2	73	333.33	7.545	8.33	0.189	0.01	15.50	239.28	0.20	56.03	23.93
2.54	1.27	2	73	250.00	5.659	41.67	0.943	0.01	20.98	234.66	0.55	103.08	23.47
2.54	1.27	2	73	250.00	5.659	33.33	0.755	0.01	20.64	237.38	0.46	97.99	23.74
2.54	1.27	2	73	250.00	5.659	25.00	0.566	0.01	19.89	239.96	0.38	89.82	24.00
2.54	1.27	2	73	250.00	5.659	16.67	0.377	0.01	18.74	243.49	0.29	77.78	24.35
2.54	1.27	2	73	250.00	5.659	8.33	0.189	0.01	16.81	247.71	0.20	57.74	24.77
2.54	1.27	2	73	166.67	3.773	41.67	0.943	0.01	19.59	242.54	0.57	99.28	24.25
2.54	1.27	2	73	166.67	3.773	33.33	0.755	0.01	16.25	245.80	0.53	85.74	24.58
2.54	1.27	2	73	166.67	3.773	25.00	0.566	0.01	14.32	248.66	0.45	75.45	24.87
2.54	1.27	2	73	166.67	3.773	16.67	0.377	0.01	12.25	250.84	0.36	62.88	25.08
2.54	1.27	2	73	166.67	3.773	8.33	0.189	0.01	9.96	252.87	0.25	45.64	25.29
2.54	1.27	2	73	83.33	1.886	41.67	0.943	0.01	17.13	246.76	0.62	91.57	24.68
2.54	1.27	2	73	83.33	1.886	33.33	0.755	0.01	14.58	249.20	0.57	80.13	24.92
2.54	1.27	2	73	83.33	1.886	25.00	0.566	0.01	12.76	251.24	0.48	70.30	25.12
2.54	1.27	2	73	83.33	1.886	16.67	0.377	0.01	10.67	252.87	0.39	57.89	25.29
2.54	1.27	2	73	83.33	1.886	8.33	0.189	0.01	8.57	254.91	0.27	41.92	25.49
3.175	1.27	2.5	78	333.33	7.545	41.67	0.943	0.01	22.40	251.24	0.53	106.77	25.12
3.175	1.27	2.5	78	333.33	7.545	33.33	0.755	0.01	20.53	252.87	0.46	97.78	25.29
3.175	1.27	2.5	78	333.33	7.545	25.00	0.566	0.01	18.95	256.27	0.39	87.96	25.63
3.175	1.27	2.5	78	333.33	7.545	16.67	0.377	0.01	17.40	259.67	0.30	75.20	25.97
3.175	1.27	2.5	78	333.33	7.545	8.33	0.189	0.01	15.51	262.73	0.20	56.03	26.27
3.175	1.27	2.5	78	250.00	5.659	41.67	0.943	0.01	20.91	256.41	0.55	103.08	25.64
3.175	1.27	2.5	78	250.00	5.659	33.33	0.755	0.01	19.52	258.99	0.48	95.31	25.90
3.175	1.27	2.5	78	250.00	5.659	25.00	0.566	0.01	18.85	260.35	0.39	87.73	26.04
3.175	1.27	2.5	78	250.00	5.659	16.67	0.377	0.01	17.11	263.34	0.30	74.70	26.33
3.175	1.27	2.5	78	250.00	5.659	8.33	0.189	0.01	15.23	266.20	0.20	55.48	26.62
3.175	1.27	2.5	78	166.67	3.773	41.67	0.943	0.01	19.96	261.03	0.56	100.33	26.10
3.175	1.27	2.5	78	166.67	3.773	33.33	0.755	0.01	17.51	262.39	0.51	89.64	26.24
3.175	1.27	2.5	78	166.67	3.773	25.00	0.566	0.01	16.22	264.84	0.42	81.23	26.48
3.175	1.27	2.5	78	166.67	3.773	16.67	0.377	0.01	14.79	266.47	0.33	69.65	26.65
3.175	1.27	2.5	78	166.67	3.773	8.33	0.189	0.01	12.72	268.92	0.22	51.44	26.89
3.175	1.27	2.5	78	83.33	1.886	41.67	0.943	0.01	19.58	264.43	0.57	99.28	26.44

3.175	1.27	2.5	78	83.33	1.886	33.33	0.755	0.01	16.45	264.09	0.52	86.39	26.41
3.175	1.27	2.5	78	83.33	1.886	25.00	0.566	0.01	15.25	265.99	0.43	78.41	26.60
3.175	1.27	2.5	78	83.33	1.886	16.67	0.377	0.01	14.22	268.03	0.33	68.18	26.80
3.175	1.27	2.5	78	83.33	1.886	8.33	0.189	0.01	12.56	269.53	0.22	51.21	26.95
3.175	1.27	2.5	75	333.33	7.545	41.67	0.943	0.01	23.77	248.80	0.52	109.88	24.88
3.175	1.27	2.5	75	333.33	7.545	33.33	0.755	0.01	23.06	254.23	0.44	103.12	25.42
3.175	1.27	2.5	75	333.33	7.545	25.00	0.566	0.01	22.34	257.63	0.36	94.58	25.76
3.175	1.27	2.5	75	333.33	7.545	16.67	0.377	0.01	21.12	259.67	0.28	81.42	25.97
3.175	1.27	2.5	75	333.33	7.545	8.33	0.189	0.01	19.32	263.41	0.19	60.52	26.34
3.175	1.27	2.5	75	250.00	5.659	41.67	0.943	0.01	21.67	256.95	0.54	104.99	25.70
3.175	1.27	2.5	75	250.00	5.659	33.33	0.755	0.01	20.82	260.35	0.46	98.41	26.04
3.175	1.27	2.5	75	250.00	5.659	25.00	0.566	0.01	19.78	263.00	0.38	89.59	26.30
3.175	1.27	2.5	75	250.00	5.659	16.67	0.377	0.01	17.58	265.79	0.30	75.70	26.58
3.175	1.27	2.5	75	250.00	5.659	8.33	0.189	0.01	15.29	267.83	0.20	55.75	26.78
3.175	1.27	2.5	75	166.67	3.773	41.67	0.943	0.01	21.73	263.07	0.54	105.18	26.31
3.175	1.27	2.5	75	166.67	3.773	33.33	0.755	0.01	19.86	263.75	0.47	96.12	26.38
3.175	1.27	2.5	75	166.67	3.773	25.00	0.566	0.01	17.47	265.72	0.40	84.46	26.57
3.175	1.27	2.5	75	166.67	3.773	16.67	0.377	0.01	14.72	267.63	0.33	69.43	26.76
3.175	1.27	2.5	75	166.67	3.773	8.33	0.189	0.01	13.62	269.12	0.21	52.89	26.91
3.175	1.27	2.5	75	83.33	1.886	41.67	0.943	0.01	22.14	264.29	0.53	106.17	26.43
3.175	1.27	2.5	75	83.33	1.886	33.33	0.755	0.01	19.64	265.79	0.47	95.51	26.58
3.175	1.27	2.5	75	83.33	1.886	25.00	0.566	0.01	16.84	267.29	0.41	82.81	26.73
3.175	1.27	2.5	75	83.33	1.886	16.67	0.377	0.01	14.88	269.12	0.32	69.86	26.91
3.175	1.27	2.5	75	83.33	1.886	8.33	0.189	0.01	12.07	270.41	0.23	50.30	27.04
3.175	1.27	2.5	73	333.33	7.545	41.67	0.943	0.01	22.41	250.16	0.53	106.77	25.02
3.175	1.27	2.5	73	333.33	7.545	33.33	0.755	0.01	20.42	252.33	0.46	97.57	25.23
3.175	1.27	2.5	73	333.33	7.545	25.00	0.566	0.01	18.65	254.98	0.39	87.28	25.50
3.175	1.27	2.5	73	333.33	7.545	16.67	0.377	0.01	16.38	257.97	0.31	73.25	25.80
3.175	1.27	2.5	73	333.33	7.545	8.33	0.189	0.01	14.66	261.03	0.21	54.67	26.10
3.175	1.27	2.5	73	250.00	5.659	41.67	0.943	0.01	19.78	255.93	0.57	99.80	25.59
3.175	1.27	2.5	73	250.00	5.659	33.33	0.755	0.01	17.73	257.97	0.50	90.36	25.80
3.175	1.27	2.5	73	250.00	5.659	25.00	0.566	0.01	15.90	259.67	0.42	80.27	25.97
3.175	1.27	2.5	73	250.00	5.659	16.67	0.377	0.01	13.64	263.07	0.34	66.77	26.31
3.175	1.27	2.5	73	250.00	5.659	8.33	0.189	0.01	12.35	265.65	0.22	50.75	26.57
3.175	1.27	2.5	73	166.67	3.773	41.67	0.943	0.01	19.70	261.03	0.57	99.63	26.10
3.175	1.27	2.5	73	166.67	3.773	33.33	0.755	0.01	17.81	262.39	0.50	90.54	26.24
3.175	1.27	2.5	73	166.67	3.773	25.00	0.566	0.01	15.64	263.75	0.43	79.52	26.38
3.175	1.27	2.5	73	166.67	3.773	16.67	0.377	0.01	14.53	266.47	0.33	69.01	26.65
3.175	1.27	2.5	73	166.67	3.773	8.33	0.189	0.01	13.04	267.83	0.22	51.92	26.78
3.175	1.27	2.5	73	83.33	1.886	41.67	0.943	0.01	20.81	261.78	0.55	102.70	26.18
3.175	1.27	2.5	73	83.33	1.886	33.33	0.755	0.01	19.73	262.73	0.47	95.71	26.27

3.175	1.27	2.5	73	83.33	1.886	25.00	0.566	0.01	17.62	263.68	0.40	84.67	26.37
3.175	1.27	2.5	73	83.33	1.886	16.67	0.377	0.01	15.19	264.97	0.32	70.52	26.50
3.175	1.27	2.5	73	83.33	1.886	8.33	0.189	0.01	13.46	265.79	0.22	52.64	26.58
3.81	1.27	3	78	333.33	7.545	41.67	0.943	0.01	21.71	226.23	0.54	104.99	22.62
3.81	1.27	3	78	333.33	7.545	33.33	0.755	0.01	20.39	227.45	0.47	97.36	22.75
3.81	1.27	3	78	333.33	7.545	25.00	0.566	0.01	18.50	228.40	0.39	86.84	22.84
3.81	1.27	3	78	333.33	7.545	16.67	0.377	0.01	16.85	231.80	0.31	74.21	23.18
3.81	1.27	3	78	333.33	7.545	8.33	0.189	0.01	11.16	233.57	0.23	48.37	23.36
3.81	1.27	3	78	250.00	5.659	41.67	0.943	0.01	18.71	223.24	0.59	96.73	22.32
3.81	1.27	3	78	250.00	5.659	33.33	0.755	0.01	15.15	226.23	0.55	82.16	22.62
3.81	1.27	3	78	250.00	5.659	25.00	0.566	0.01	13.22	228.81	0.47	71.93	22.88
3.81	1.27	3	78	250.00	5.659	16.67	0.377	0.01	11.03	231.80	0.38	59.10	23.18
3.81	1.27	3	78	250.00	5.659	8.33	0.189	0.01	9.65	235.88	0.25	44.91	23.59
3.81	1.27	3	78	166.67	3.773	41.67	0.943	0.01	16.90	216.85	0.62	90.69	21.68
3.81	1.27	3	78	166.67	3.773	33.33	0.755	0.01	16.66	218.89	0.52	87.23	21.89
3.81	1.27	3	78	166.67	3.773	25.00	0.566	0.01	16.11	221.47	0.42	80.84	22.15
3.81	1.27	3	78	166.67	3.773	16.67	0.377	0.01	14.99	223.37	0.32	70.08	22.34
3.81	1.27	3	78	166.67	3.773	8.33	0.189	0.01	12.69	225.28	0.22	51.44	22.53
3.81	1.27	3	78	83.33	1.886	41.67	0.943	0.01	17.91	206.51	0.60	94.16	20.65
3.81	1.27	3	78	83.33	1.886	33.33	0.755	0.01	16.74	208.69	0.52	87.40	20.87
3.81	1.27	3	78	83.33	1.886	25.00	0.566	0.01	15.54	210.46	0.43	79.14	21.05
3.81	1.27	3	78	83.33	1.886	16.67	0.377	0.01	13.38	212.90	0.34	66.19	21.29
3.81	1.27	3	78	83.33	1.886	8.33	0.189	0.01	12.01	214.81	0.23	50.08	21.48
3.81	1.27	3	75	333.33	7.545	41.67	0.943	0.01	21.31	212.09	0.54	104.02	21.21
3.81	1.27	3	75	333.33	7.545	33.33	0.755	0.01	20.05	214.13	0.47	96.53	21.41
3.81	1.27	3	75	333.33	7.545	25.00	0.566	0.01	19.27	215.76	0.38	88.65	21.58
3.81	1.27	3	75	333.33	7.545	16.67	0.377	0.01	17.58	217.53	0.30	75.70	21.75
3.81	1.27	3	75	333.33	7.545	8.33	0.189	0.01	15.81	219.43	0.20	56.31	21.94
3.81	1.27	3	75	250.00	5.659	41.67	0.943	0.01	19.67	209.37	0.57	99.45	20.94
3.81	1.27	3	75	250.00	5.659	33.33	0.755	0.01	18.11	211.41	0.50	91.46	21.14
3.81	1.27	3	75	250.00	5.659	25.00	0.566	0.01	16.97	213.18	0.41	83.22	21.32
3.81	1.27	3	75	250.00	5.659	16.67	0.377	0.01	16.18	215.62	0.31	72.78	21.56
3.81	1.27	3	75	250.00	5.659	8.33	0.189	0.01	13.44	216.85	0.22	52.64	21.68
3.81	1.27	3	75	166.67	3.773	41.67	0.943	0.01	19.05	212.09	0.58	97.73	21.21
3.81	1.27	3	75	166.67	3.773	33.33	0.755	0.01	17.66	214.54	0.50	90.18	21.45
3.81	1.27	3	75	166.67	3.773	25.00	0.566	0.01	16.34	215.49	0.42	81.42	21.55
3.81	1.27	3	75	166.67	3.773	16.67	0.377	0.01	15.16	217.53	0.32	70.52	21.75
3.81	1.27	3	75	166.67	3.773	8.33	0.189	0.01	13.72	218.89	0.21	53.13	21.89
3.81	1.27	3	75	83.33	1.886	41.67	0.943	0.01	20.27	208.01	0.56	101.23	20.80
3.81	1.27	3	75	83.33	1.886	33.33	0.755	0.01	18.48	210.73	0.49	92.58	21.07
3.81	1.27	3	75	83.33	1.886	25.00	0.566	0.01	17.18	212.09	0.41	83.63	21.21

3.81	1.27	3	75	83.33	1.886	16.67	0.377	0.01	15.79	214.81	0.32	71.86	21.48
3.81	1.27	3	75	83.33	1.886	8.33	0.189	0.01	14.15	216.17	0.21	53.89	21.62
3.81	1.27	3	73	333.33	7.545	41.67	0.943	0.01	20.34	201.89	0.56	101.41	20.19
3.81	1.27	3	73	333.33	7.545	33.33	0.755	0.01	19.06	202.57	0.48	94.12	20.26
3.81	1.27	3	73	333.33	7.545	25.00	0.566	0.01	18.27	206.11	0.39	86.39	20.61
3.81	1.27	3	73	333.33	7.545	16.67	0.377	0.01	16.57	209.78	0.31	73.73	20.98
3.81	1.27	3	73	333.33	7.545	8.33	0.189	0.01	14.79	211.41	0.21	54.94	21.14
3.81	1.27	3	73	250.00	5.659	41.67	0.943	0.01	18.68	201.62	0.59	96.57	20.16
3.81	1.27	3	73	250.00	5.659	33.33	0.755	0.01	17.11	204.88	0.51	88.42	20.49
3.81	1.27	3	73	250.00	5.659	25.00	0.566	0.01	15.96	206.79	0.42	80.46	20.68
3.81	1.27	3	73	250.00	5.659	16.67	0.377	0.01	15.16	209.78	0.32	70.52	20.98
3.81	1.27	3	73	250.00	5.659	8.33	0.189	0.01	12.40	211.82	0.22	50.75	21.18
3.81	1.27	3	73	166.67	3.773	41.67	0.943	0.01	20.28	205.43	0.56	101.23	20.54
3.81	1.27	3	73	166.67	3.773	33.33	0.755	0.01	18.74	207.87	0.49	93.15	20.79
3.81	1.27	3	73	166.67	3.773	25.00	0.566	0.01	16.44	209.64	0.42	81.81	20.96
3.81	1.27	3	73	166.67	3.773	16.67	0.377	0.01	14.66	211.95	0.33	69.43	21.20
3.81	1.27	3	73	166.67	3.773	8.33	0.189	0.01	13.15	213.45	0.22	52.16	21.34
3.81	1.27	3	73	83.33	1.886	41.67	0.943	0.01	17.92	205.97	0.60	94.16	20.60
3.81	1.27	3	73	83.33	1.886	33.33	0.755	0.01	15.98	208.01	0.53	84.94	20.80
3.81	1.27	3	73	83.33	1.886	25.00	0.566	0.01	14.11	210.46	0.45	74.79	21.05
3.81	1.27	3	73	83.33	1.886	16.67	0.377	0.01	12.68	212.50	0.35	64.12	21.25
3.81	1.27	3	73	83.33	1.886	8.33	0.189	0.01	11.23	214.67	0.23	48.37	21.47

ANEXO B

Tabla B.1. Resultados experimentales de la columna de flotación de escala piloto

Relación diámetro (cm)			σ	Q_l	J_l	Q_g	J_g	μ	ϵ_g	ΔP	$d_{b \text{ exp}}$	$d_{b \text{ mod}}$	S_b	E_c
D mayor	D menor	Relación	(Dina/cm)	(cm ³ /s)	(cm/s)	(cm ³ /s)	(cm/s)	(gr/cm ³)	(%)	(grf/cm ²)	(mm)	(mm)	(cm/s)/(cm)	J/gr
3.81	1.27	3	75	250.00	0.127	366.67	0.187	0.01	16.36	267.83	0.21	0.241	53.35	26.78
3.81	1.27	3	75	250.00	0.127	741.67	0.378	0.01	17.01	265.11	0.318	0.329	71.27	26.51
3.81	1.27	3	75	250.00	0.127	1116.67	0.569	0.01	17.67	271.91	0.417	0.412	81.83	27.19
3.81	1.27	3	75	250.00	0.127	1483.33	0.755	0.01	18.17	303.18	0.511	0.481	88.70	30.32
3.81	1.27	3	75	333.33	0.170	366.67	0.187	0.01	16.25	285.50	0.214	0.233	52.36	28.55
3.81	1.27	3	75	333.33	0.170	741.67	0.378	0.01	17.22	285.50	0.32	0.319	70.82	28.55
3.81	1.27	3	75	333.33	0.170	1116.67	0.569	0.01	17.43	284.14	0.423	0.406	80.67	28.41
3.81	1.27	3	75	333.33	0.170	1483.33	0.755	0.01	18.41	282.78	0.512	0.490	88.53	28.28
3.81	1.27	3	75	450.00	0.229	366.67	0.187	0.01	16.49	284.14	0.219	0.233	51.16	28.41
3.81	1.27	3	75	450.00	0.229	741.67	0.378	0.01	16.93	285.50	0.328	0.318	69.10	28.55
3.81	1.27	3	75	450.00	0.229	1116.67	0.569	0.01	17.59	286.86	0.427	0.404	79.91	28.69
3.81	1.27	3	75	450.00	0.229	1483.33	0.755	0.01	18.36	284.14	0.518	0.489	87.50	28.41
3.81	1.27	3	72.8	250.00	0.127	366.67	0.187	0.01	16.39	295.02	0.21	0.219	53.35	29.50
3.81	1.27	3	72.8	250.00	0.127	741.67	0.378	0.01	17.13	293.66	0.317	0.305	71.49	29.37
3.81	1.27	3	72.8	250.00	0.127	1116.67	0.569	0.01	17.76	292.30	0.415	0.392	82.22	29.23
3.81	1.27	3	72.8	250.00	0.127	1483.33	0.755	0.01	18.46	289.58	0.507	0.478	89.40	28.96
3.81	1.27	3	72.8	333.33	0.170	366.67	0.187	0.01	16.23	290.94	0.214	0.220	52.36	29.09
3.81	1.27	3	72.8	333.33	0.170	741.67	0.378	0.01	16.78	292.30	0.324	0.306	69.95	29.23
3.81	1.27	3	72.8	333.33	0.170	1116.67	0.569	0.01	17.23	290.94	0.426	0.393	80.10	29.09
3.81	1.27	3	72.8	333.33	0.170	1483.33	0.755	0.01	18.64	289.58	0.508	0.477	89.23	28.96
3.81	1.27	3	72.8	450.00	0.229	366.67	0.187	0.01	16.02	293.66	0.221	0.219	50.70	29.37
3.81	1.27	3	72.8	450.00	0.229	741.67	0.378	0.01	17.39	292.30	0.324	0.305	69.95	29.23
3.81	1.27	3	72.8	450.00	0.229	1116.67	0.569	0.01	17.90	289.58	0.423	0.393	80.67	28.96
3.81	1.27	3	72.8	450.00	0.229	1483.33	0.755	0.01	18.59	286.86	0.515	0.478	88.01	28.69
3.81	1.27	3	72.4	250.00	0.127	366.67	0.187	0.01	16.42	300.46	0.21	0.214	53.35	30.05
3.81	1.27	3	72.4	250.00	0.127	741.67	0.378	0.01	17.74	288.22	0.312	0.306	72.64	28.82
3.81	1.27	3	72.4	250.00	0.127	1116.67	0.569	0.01	18.05	278.71	0.412	0.397	82.82	27.87
3.81	1.27	3	72.4	250.00	0.127	1483.33	0.755	0.01	18.64	266.47	0.504	0.487	89.93	26.65
3.81	1.27	3	72.4	333.33	0.170	366.67	0.187	0.01	17.10	300.46	0.211	0.214	53.10	30.05
3.81	1.27	3	72.4	333.33	0.170	741.67	0.378	0.01	17.92	297.74	0.315	0.301	71.95	29.77
3.81	1.27	3	72.4	333.33	0.170	1116.67	0.569	0.01	18.03	274.63	0.416	0.398	82.03	27.46
3.81	1.27	3	72.4	333.33	0.170	1483.33	0.755	0.01	18.48	263.75	0.511	0.488	88.70	26.38
3.81	1.27	3	72.4	450.00	0.229	366.67	0.187	0.01	17.21	301.82	0.216	0.213	51.87	30.18

3.81	1.27	3	72.4	450.00	0.229	741.67	0.378	0.01	17.63	297.74	0.322	0.301	70.38	29.77
3.81	1.27	3	72.4	450.00	0.229	1116.67	0.569	0.01	17.84	265.11	0.424	0.402	80.48	26.51
3.81	1.27	3	72.4	450.00	0.229	1483.33	0.755	0.01	18.29	262.39	0.519	0.488	87.34	26.24

ANEXO C

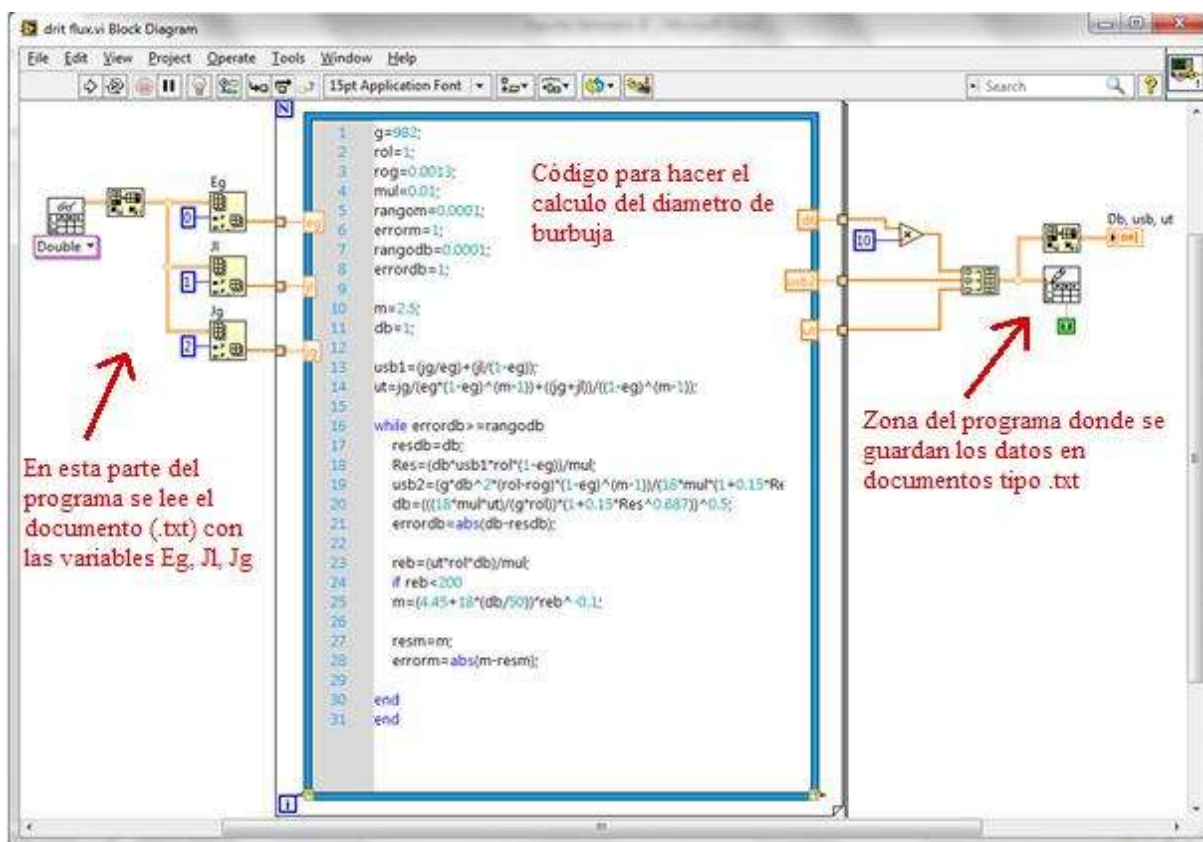


Figura C.1. Programa Drift-Flux para el calcular el diámetro de burbuja (Diagrama de Bloques)

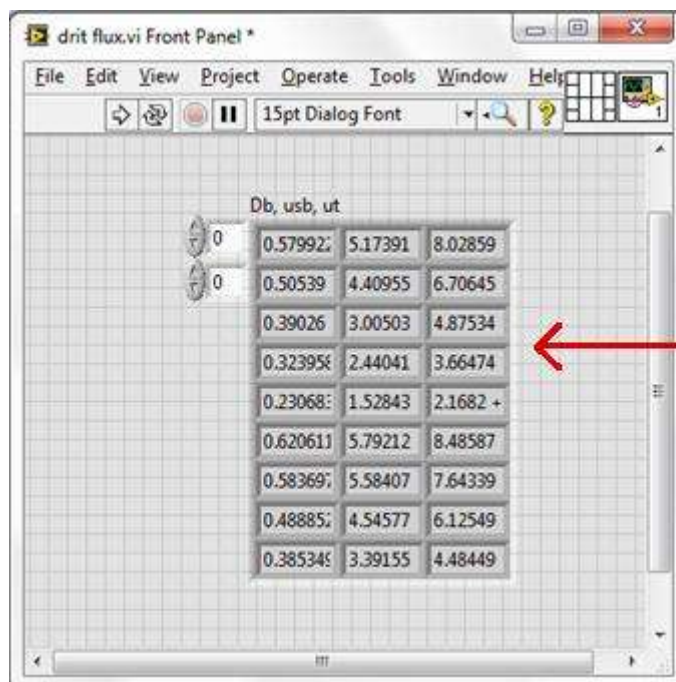


Tabla en la cual se muestran los valores del diámetro de burbuja, a partir del código Drift-flux, además de los valores de usb, ut.

Figura C.2. Programa Drift-Flux para calcular el diámetro de burbuja (Panel Frontal)