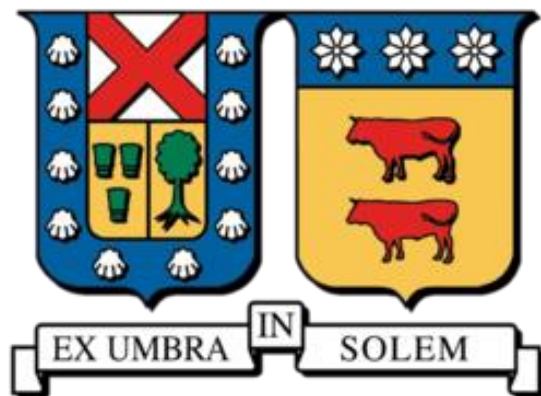


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL  
VALPARAÍSO – CHILE



**“CARACTERIZACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE AGUA  
EN ESPUMAS DE FLOTACIÓN”**

**Martina Andrea Witting Muñoz**

Memoria de Título como requisito para optar al título de:  
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

Profesor Guía: Dr. Juan Yianatos Bernardino

Profesor Correferente: M.Cs. Paulina Vallejos Aravena

Valparaíso, 10 de Enero de 2020

## Agradecimientos

*A mis padres, Patricia Muñoz y Ricardo Witting, por ser mi más grande apoyo en la vida, cada uno a su especial manera. Gracias por su apoyo y amor incondicional. Es gracias a ustedes que he llegado a donde estoy en la vida. Gracias madre por enseñarme todos los valores que me han llevado a ser una gran mujer. Gracias por inculcarme la perseverancia, la responsabilidad, la paciencia, la honestidad. Me diste todas las herramientas necesarias para tomar mis propias decisiones y hacerlo de la mejor manera, gracias por enseñarme a luchar en esta vida, esa es tu huella en mí, eres mi mejor ejemplo a seguir, ejemplo de perseverancia diaria. Te admiro de aquí al infinito mamita linda. A mi pequeñita Alexandra Witting, por ser mi compañera, por su amor y apoyo. Siempre nos tendremos la una a la otra.*

*A mi Ritita linda, por ser mi cómplice y mi compañera eterna, por criarme y transmitirme toda su sabiduría, y por sobre todo, por llenarme de amor. Aunque ya no estés aquí, te llevo día a día en mi corazón, y sé que estarías muy orgullosa de mí en el día de hoy, eres mi angelito que me cuida a donde sea que vaya.*

*A mi mejor amiga en la vida, y la hermana que yo elegí, mi Camila Barra. Consejera, compañera, amiga y hermana. Compartimos hermosos cuatro años viviendo juntas, los mejores cuatro años de mi vida universitaria. Fuiste un apoyo incondicional y el pilar más fuerte que tuve, sin toda tu ayuda y apoyo no sé si lo hubiese logrado. La vida universitaria nos juntó, y soy una agradecida de la vida por ello. Siempre estás ahí para darme una palabra de aliento, un consejo, y ser siempre mi pepe grillo.*

*A mis grandes amigos Consuelo, Mario y Exequiel, por ser un apoyo y un pilar fundamental en estos años, por enseñarme que los amigos son la familia que nosotros elegimos, y por formar esta hermosa familia que es la Kuna family. Con ustedes compartí alegrías, penas, triunfos y derrotas. Gracias por celebrar conmigo mis triunfos, por contener mis lágrimas, por soportar mis colapsos de estrés, por las celebraciones, por esas largas noches de estudio, y por sobre, por la compañía incondicional que son! Los amo con todo mi corazón. La universidad nos juntó, y ahora nada me separara de mi familia Kuna.*

*A mis profesores, Juan Yianatos y Paulina Vallejos, por la gran disposición, apoyo y paciencia. Gracias por transmitirme su conocimiento de este campo tan interesante y entretenido que es la minería y flotación.*

*Al proyecto Fondecyt 1160547 por el financiamiento para realizar esta memoria.*

## Resumen

En el proceso de flotación, la zona de espuma ha sido ampliamente estudiada debido a la complejidad de los fenómenos que en ella ocurren y a la influencia que tiene en el rendimiento global del proceso. Para ello, la zona de espuma se evalúa independiente del proceso de colección.

En la actualidad, el transporte de espuma es un campo sobre el cual aún existen aristas que investigar. En base a ello, se propuso estudiar la recuperación de agua en pos de desarrollar un modelo capaz de predecir el comportamiento de la recuperación de agua en espumas de flotación, en base a la medición de flujo de agua recuperada en el concentrado.

En el presente trabajo, se desarrolló un modelo empírico para predecir el comportamiento del flujo de agua recuperada en el concentrado en un sistema bifásico (espuma – agua) a partir de un diseño factorial  $3^3$ , donde se evaluó el efecto de la velocidad superficial de aire ( $J_g$ ), la profundidad de espuma ( $H_f$ ) y el porcentaje de área efectiva de la celda ( $A_{eff}$ ).

Además, se obtuvo información complementaria sobre variables como la distribución del tamaño de burbujas en espuma, velocidad de transporte de espuma y tasa de colapso utilizando el sistema *Visiofroth* para análisis de imágenes. Se observó una relación potencial entre el flujo de agua recuperada en el concentrado y la velocidad de transporte de espuma, donde ambas son consecuencias de las variables de operación controladas ( $J_g$ ,  $H_f$  y  $A_{eff}$ ). La correlación obtenida presentó un coeficiente de determinación de 0,9895.

El software estadístico Minitab 18, mostró que el presente modelo se ajustó adecuadamente a los resultados experimentales. Esto se evaluó en base al coeficiente de determinación obtenido, el cual fue de 0,9751.

Finalmente se estudió el efecto que tiene la disminución de la distancia máxima de transporte de espuma al rebalse de la celda de flotación en la recuperación de agua. Para esto se realizaron experimentos a 100, 80, 60, 40 y 20 [cm] de distancia al rebalse, donde se observó un aumento en el flujo de agua recuperada al disminuir la distancia al rebalse. Además, se observó turbulencia en la zona de espuma cuando la distancia al rebalse fue menor a 40 [cm].

# Índice General

Agradecimientos .....	2
Resumen .....	3
Índice General.....	4
Índice de Figuras .....	6
Índice de Tablas.....	8
Nomenclatura.....	9
Introducción.....	10
Objetivos y alcances .....	12
CAPITULO 1: Fundamentos de la flotación de minerales.....	13
1.1. Características del proceso de flotación .....	13
1.2. Zona de colección.....	16
1.3. Zona de espuma.....	18
1.4. Equipos de flotación .....	20
1.4.1. Celdas mecánicas .....	20
1.4.2. Celdas neumáticas .....	21
1.5. Recuperación de agua en espumas de flotación .....	22
1.5.1. Factores que afectan la recuperación de agua .....	22
1.5.2. Modelos de recuperación de agua teóricos y semi teóricos .....	23
1.5.3. Modelos empíricos de recuperación de agua industriales y a escala piloto .....	26
CAPITULO 2: Procedimiento experimental .....	34
2.1. Descripción del equipo de flotación .....	34
2.2. Descripción de accesorios e instrumentos .....	36
2.2.1. Cámara VisioFroth.....	36
2.2.2. Bomba peristáltica.....	38

2.2.3. Sensor de diferencia de presión.....	38
2.2.4. Flujómetro másico.....	39
2.3. Condiciones de operación de la celda bidimensional.....	40
2.4. Metodología de medición.....	40
CAPITULO 3: Diseño experimental.....	42
3.1. Diseño experimental.....	42
CAPITULO 4: Resultados.....	47
4.1. Resultados experimentales.....	47
4.2. Modelo empírico de recuperación de agua.....	55
4.3. Análisis de altura de espuma v/s tasa de colapso.....	63
4.4. Análisis de distancia al rebalse.....	66
CAPITULO 5: Conclusiones y recomendaciones.....	75
Referencias.....	77
Anexos.....	79
Anexo A: Especificaciones técnicas de medidor de flujo másico Aalborg.....	79
Anexo B: Curva de calibración de bombas peristálticas.....	80
Anexo C: Resultados Experimentales.....	82
Anexo D: Comparación de Resultados Experimentales vs Predicción del Modelo.....	86

## Índice de Figuras

Figura 1.1. Esquema del proceso de flotación de minerales. ....	14
Figura 1.2. Espesor de burbuja. ....	24
Figura 1.3. Celda de flotación utilizada por Moys. ....	24
Figura 1.4. Recuperación de agua con modelo de Savassi et al. (1998). ....	28
Figura 1.5. Vista lateral de la celda de 3.5[ L] utilizada por Wang et al. (2016). ....	31
Figura 1.6. Recuperación de agua estimada a partir del modelo versus experimental. ....	32
Figura 2. 1. Celda bidimensional, de una celda industrial autoaspirante de 130 [m <sup>3</sup> ]. ....	34
Figura 2. 2. Esquema de celda bidimensional. ....	35
Figura 2. 3. Vista frontal de cámara Visiofroth. ....	37
Figura 2. 4. Bomba Peristáltica. ....	38
Figura 2. 5. Sensor diferencial de presión (Modelo Sitrans P DS III. ....	39
Figura 2. 6. Flujómetro másico utilizado. ....	39
Figura 3. 1. (a) Esquema de celda de flotación. ....	43
Figura 4. 1. Flujo de agua recuperada, área efectiva de 65 %. ....	47
Figura 4. 2. Flujo de agua recuperada, área efectiva de 70 %. ....	48
Figura 4. 3. Flujo de agua recuperada, área efectiva de 75 %. ....	49
Figura 4. 4. Flujo de agua recuperada, altura de espuma 4 [cm]. ....	50
Figura 4. 5. Recuperación de agua vs velocidad de transporte de espuma ( <i>Visiofroth</i> ). ....	51
Figura 4. 6. Análisis de tasa de colapso para los experimentos realizados. ....	52
Figura 4. 7. Diámetro medio Sauter, como función de la velocidad superficial de gas. ....	54
Figura 4. 8. Flujo de agua recuperada estimada versus la registrada experimentalmente. ....	58
Figura 4. 9. Resultado experimental, área efectiva del 65%. ....	58
Figura 4. 10. Resultado experimental, área efectiva del 70%. ....	59
Figura 4. 11. Resultado experimental, área efectiva del 75%. ....	59
Figura 4. 12. Modelo de flujo de agua recuperada, área efectiva de 65 % ....	60
Figura 4. 13. Modelo de flujo de agua recuperada, área efectiva de 70 % ....	61
Figura 4. 14. Modelo de flujo de agua recuperada, área efectiva de 75%. ....	61
Figura 4. 15. Posición de cámara Visiofroth para las mediciones realizadas. ....	63
Figura 4. 16. Tasa de colapso vs altura de espuma en la zona de descarga. ....	64

Figura 4. 17. Diámetro de burbuja vs altura de espuma en la zona de descarga. ....	65
Figura 4. 18. Experimentos para análisis de distancia al rebalse. ....	66
Figura 4. 19. Recuperación de agua vs distancia al rebalse. ....	67
Figura 4. 20. Efecto del ángulo <i>frothcrowder</i> . ....	68
Figura 4. 21. Experimento A (100 [cm]). ....	69
Figura 4. 22. Experimento B (80 [cm]) ....	70
Figura 4. 23. Recirculación de burbujas en zona de colección, experimento B (80 [cm])...	70
Figura 4. 24. Experimento C (60 [cm]). ....	71
Figura 4. 25. Experimento D (40 [cm]). ....	72
Figura 4. 26. Altura máxima de espuma. ....	73
Figura B. 1. Contrastación bomba peristáltica 1. ....	81
Figura B. 2. Contrastación bomba peristáltica 2. ....	81

## Índice de Tablas

Tabla 1.1. Base de datos utilizada para el modelo de Uribe et al. (1999). .....	29
Tabla 1.2. Resumen de experimentos realizados.....	31
Tabla 3. 1. Niveles de diseño experimental.....	42
Tabla 3. 2. Valores de $J_g$ en zona de espuma de acuerdo a su área efectiva. ....	44
Tabla 3. 3. Condiciones del diseño experimental.....	45
Tabla 4. 1. Diámetro de burbuja para los valores de " $J_g$ " analizados. ....	54
Tabla 4. 2. Resultados estadísticos de las tres variables en la recuperación de agua. ....	55
Tabla 4. 3. Resultados estadísticos del efecto de las variables en la recuperación de agua. ....	57
Tabla 4. 4. Rango de validez del modelo. ....	57
Tabla 4. 5. Condiciones de operación para análisis de tasa de colapso.....	63
Tabla 4. 6. Distribución de tamaño de burbuja para los experimentos realizados. ....	65
Tabla 4. 7. Distancia al rebalse.....	66
Tabla 4. 8. Altura máxima de espuma para cada experimento.....	74
Tabla C. 1. Resultados de flujo de agua recuperada y concentración de gas. ....	83
Tabla C. 2. Resultados de velocidad de transporte de espuma y D50.....	84
Tabla C. 3. Resultados de D80 y tasa de colapso.....	85
Tabla D. 1. Resultados experimentales y predicción de modelo.....	86

## Nomenclatura

$a$	Fracción de aire que sale de la celda al concentrado
$D$	Diámetro de la columna de flotación
$D_{32}$	Diámetro promedio Sauter
$F_s$	Flujo másico de sólidos
$G$	Flujo de gas
$g$	Constante de gravedad
$H_f$	Altura de espuma
$J_B$	Velocidad superficial bias
$J_C$	Velocidad superficial de agua en el concentrado
$J_F$	Velocidad superficial de alimentación de pulpa
$J_g$	Velocidad superficial de gas
$J_W$	Velocidad superficial de agua de lavado
$k_{wd}$	Constante de drenaje de agua
$P_w$	Constante del modelo de Harris (2000), Ec (10)
$Q_a$	Flujo volumétrico de aire en la celda
$Q_F$	Flujo volumétrico de pulpa de alimentación
$Q_w$	Flujo volumétrico de agua
$R_{cs}$	Fracción de solidos recuperados en el concentrado
$R_{cw}$	Recuperación de agua desde la fase de pulpa a la fase de espuma
$R_{fw}$	Recuperación de agua desde la fase de espuma hacia el concentrado
$R_w$	Recuperación fraccional del agua de alimentación en el concentrado
$r$	Velocidad de agitación
$r'$	Radio de burbuja
$S_B$	Flujo superficial de área de burbuja
$V_{eff}$	Volumen efectivo de la zona de colección
$V_f$	Volumen efectivo en la zona de espuma
$WR$	Recuperación de agua
$\alpha$	Recuperación de aire
$\beta$	Constante relacionada con las características de la espuma
$\varepsilon_{go}$	Concentración de gas
$\sigma$	Constante del modelo de Harris (2000), Ec (10)
$\rho$	Densidad del agua
$\rho_p$	Densidad de partícula
$\eta$	Viscosidad del agua en la espuma
$\tau_f$	Tiempo de residencia de la espuma
$\tau_p$	Tiempo medio de residencia de la pulpa
$\Omega$	Constante del modelo de Harris (2000), Ec (10)
$v$	Velocidad de transporte de espuma ( <i>Visiofroth</i> ), Ec (14)
$\chi$	Constante del modelo de Harris (2000), Ec (10)

## Introducción

La flotación es una de las técnicas más importantes de procesamiento de minerales. Corresponde a un complejo proceso selectivo y es utilizada para lograr separaciones específicas de diversos minerales. Inicialmente, la flotación fue utilizada para el tratamiento de sulfuros de cobre, plomo y zinc, pero su campo de aplicación se ha expandido hasta incluir platino, níquel, oro, óxidos y minerales no metálicos tales como fosfatos y carbón.

La separación por flotación se desarrolla en un sistema trifásico (gas – sólido – líquido), en el que una serie de mecanismos y sub procesos tienen lugar, con objeto de lograr la separación de especies minerales, a partir de las diferencias en las propiedades superficiales entre el material valioso y aquel que no tiene valor (ganga).

Para entender fenomenológicamente como afectan las variables estudiadas en la recuperación de agua, es necesario saber que en la flotación existen dos zonas principales, zona de pulpa (colección de mineral) y zona de espuma (limpieza). En la zona de pulpa, el mineral valioso (hidrófobo) es colectado por las burbujas de aire que se generan en el equipo, las cuales transportan las partículas colectadas a la zona de espuma. Esta última zona cumple la función de ‘limpiar’ el mineral que llega desde la zona de colección arrastrando ganga (mineral no valioso). El grado de limpieza o rechazo que ejerce la espuma está dado por la altura de ésta, ya que mientras mayor sea la distancia vertical que el mineral recorre para rebalsar, mayor probabilidad de rechazo tendrá. Una vez que el mineral llega al tope de la espuma, es rebalsado hacia la canaleta de concentrado a una velocidad que depende de la estabilidad, la altura y porcentaje de sólidos en la espuma.

La zona de espuma es la encargada de minimizar la recuperación por arrastre de partículas hidrófilas (ganga), que producen esta disminución en la ley de concentrado. El flujo neto de partículas arrastradas al concentrado de una celda está determinado por dos mecanismos opuestos: (a) Flujo ascendente de sólidos finos arrastrados a través de la espuma; (b) Flujo descendente (retorno) de material hacia la zona de pulpa por gravedad (Savassi et al., 1998).

En este trabajo se presenta un estudio de la recuperación de agua, evaluada a través del flujo volumétrico [lpm] de agua en el concentrado de una celda de flotación bidimensional a escala de laboratorio. Se evalúa la altura de espuma, la velocidad superficial de aire que ingresa a la celda y el área efectiva de espuma, con el fin de estudiar el impacto de estas variables en la recuperación de agua y la velocidad de transporte de espuma para una celda piloto.

## Objetivos y alcances

### Objetivo General

Evaluar la recuperación de agua en espumas de flotación, en función de variables, como: flujo de aire, altura de espuma y área efectiva de espuma en una celda de flotación.

### Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo empírico que permita predecir el comportamiento del flujo de agua recuperada al concentrado en espumas de flotación, mediante un diseño factorial a partir de experimentos realizados en una celda prototipo bidimensional de flotación a escala de laboratorio.
- Estudiar el comportamiento de la velocidad de descarga de espuma, distribución de tamaño de burbuja y tasa de colapso de burbujas, al variar las condiciones de operación en una celda de flotación bidimensional.
- Estudiar y analizar el comportamiento del flujo de agua recuperada al concentrado respecto a la variación de la distancia al rebalse en una celda de flotación bidimensional.

# CAPITULO 1: Fundamentos de la flotación de minerales

## 1.1. Características del proceso de flotación

La flotación de minerales es un proceso de separación físico – químico que utiliza las diferencias en las propiedades superficiales de los minerales valiosos y no valiosos (también llamado ganga) para obtener la selectividad deseada del mineral de interés. Este proceso involucra tres fases (sólido, líquido y gas) (Wills, 2006).

El proceso de flotación se puede aplicar como método de concentración en el área de procesamiento de minerales. Se emplea para separar partículas hidrófobas (o flotables) de otras que son de tipo hidrófilas, en una suspensión acuosa, mediante la inyección de burbujas de gas.

La Figura 1.1 (a) muestra un esquema del proceso del proceso de flotación. El proceso de flotación se puede dividir en dos zonas independientes entre sí: zona de colección (pulpa) y zona de limpieza (o de espuma), las que se complementan para efectuar el proceso de separación (Yianatos & Vinnett, 2015). La Figura 1.1. (b) muestra un diagrama de las dos zonas.

La recuperación de minerales valiosos mediante el proceso de flotación se basa en la interacción que existe entre las burbujas y las partículas de sólido suspendido en el agua. El sólido ingresa al sistema y, gracias a la disipación de energía, las partículas de mineral colisionan con las burbujas en la zona de pulpa. Las partículas se adhieren en forma selectiva, formando el agregado partícula – burbuja (colección). La eficiencia del proceso de colección de las partículas de mineral depende de múltiples factores que ocurren en la zona de pulpa (también llamada zona de colección). Una vez colectadas las partículas se transportan a la zona de espuma, donde se separan de la ganga y se recuperan en el concentrado (Yianatos & Vinnett, 2015).

La formación del agregado partícula – burbuja involucra los siguientes mecanismos de recuperación del mineral (Wills, 2006):

- Colección selectiva del mineral valioso por las burbujas de aire o *true flotation*
- Arrastre no selectivo de partículas finas a través de la espuma debido al agua recuperada en la corriente de concentrado.

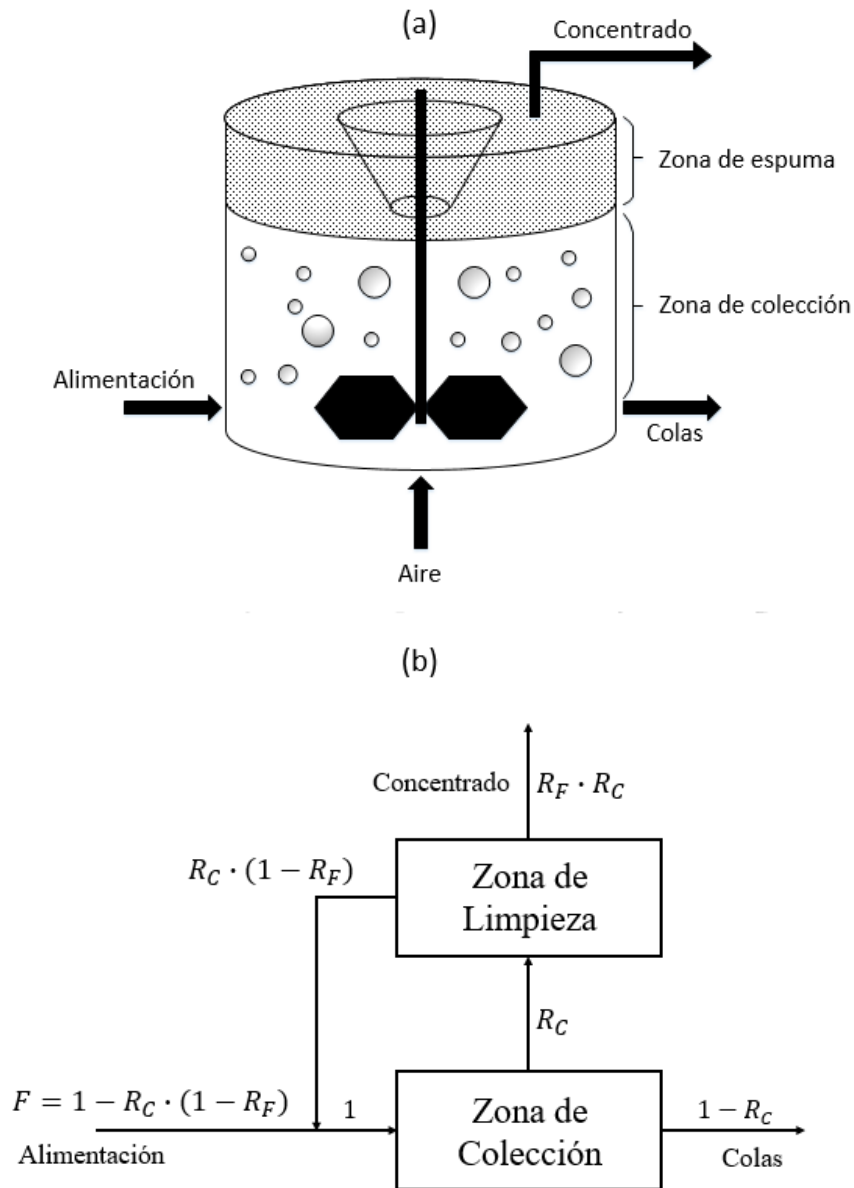


Figura 1.1. (a) Esquema del proceso de flotación de minerales (b) Diagrama de la zona de colección y limpieza (Finch & Dobby, 1990).

La flotación se puede dividir en los siguientes subprocesos:

- Introducción del material de alimentación.
- Colisión y coacción del mineral (formación del agregado partícula – burbuja).
- Transporte del agregado desde la zona de pulpa a la zona de espuma.
- Transporte de la espuma al concentrado (descarga de concentrado).
- Retorno del mineral desde la espuma a la zona de pulpa.

Cada una de estas etapas depende de diversos factores, asociados a las características de los minerales (tamaño de las partículas, naturaleza del mineral, propiedades superficiales, acondicionamiento, etc.) y a las condiciones hidrodinámicas del proceso (tamaño de burbuja, flujo de aire, concentración de gas, etc.)

En la zona de coacción ocurre la formación del agregado partícula-burbuja y en la zona de limpieza (espuma) ocurre el transporte y enriquecimiento del mineral colectado hacia el concentrado (Yianatos & Vinnett, 2015). En la Figura 1.1. (b) " $R_C$ " representa la recuperación de mineral valioso en la zona de coacción y " $R_F$ " la recuperación en la zona de espuma. En base a esto, es posible estimar la recuperación global en un equipo de flotación, en base a las recuperaciones de la zona de coacción y zona de espuma, realizando un balance de materia en el proceso (al interior del equipo de flotación).

La recuperación global, " $R_G$ " corresponde a la razón entre el flujo de concentrado (mineral valioso a la salida de la zona de limpieza) y el flujo de mineral valioso alimentado al equipo (F). Al formular lo anterior en función de la recuperación en la zona de coacción ( $R_C$ ) y la recuperación en la zona de espuma ( $R_F$ ), se obtiene la siguiente expresión, Ec (1).

$$R_G = \frac{R_C \cdot R_F}{1 - R_C \cdot (1 - R_F)} \quad (1)$$

## 1.2. Zona de colección

En esta zona ocurre el primer contacto entre las partículas de mineral y las burbujas de gas ascendentes. La eficiencia de colección y recuperación de las partículas dependen de los eventos de colisión y adhesión necesarios para formar el agregado partícula-burbuja. La probabilidad que ocurran estos eventos se representa generalmente como un modelo de primer orden (Yianatos & Vinnett, 2015).

Las principales variables que influyen en el proceso de concentración de un tipo de mineral por flotación son:

- Tiempo de residencia y régimen de mezcla
- Reactivos (tipo y dosificación).
- Tamaño de partículas y liberación.
- Flujo y dispersión del gas.
- Porcentaje de sólidos

Estas variables operacionales, junto con la ley de alimentación, tienen un efecto significativo en la ley de concentrado y en la recuperación del mineral de interés.

De estas variables, se describirán únicamente dos de ellas: tiempo de residencia y dispersión de gas, debido a la relevancia que poseen en el presente estudio.

El tiempo medio de residencia de la pulpa en la zona de colección corresponde a uno de los factores que afecta a la ley de concentrado y la recuperación de mineral. Este se define como el tiempo medio que pasan las partículas de mineral en un equipo de flotación.

Un aumento en el tiempo de residencia, aumenta la probabilidad de colisión y adhesión del agregado partícula – burbuja, lo que genera un aumento de la recuperación de mineral en el concentrado. En base a ello, al aumentar el tiempo de residencia de la pulpa, aumenta la recuperación en la zona de colección.

El tiempo puede estimarse mediante la razón entre el volumen efectivo de la zona de colección ( $V_{eff}$ ) y el flujo volumétrico de pulpa de alimentación ( $Q_F$ ), Ec. (2).

$$\tau_P = \frac{V_{eff}}{Q_F} \quad (2)$$

Este se puede regular variando el flujo de alimentación, el porcentaje de sólidos en la alimentación o la altura de la zona de colección.

La dispersión de gas juega un rol fundamental en la colección del mineral valioso y en el transporte en la zona de espuma (selectividad).

Para evaluar la dispersión de gas a escala industrial, se analizan las siguientes variables del proceso:

- I) La velocidad superficial de gas ( $J_g$ ). La cual se define como la relación entre el caudal de gas ( $Q_G$ ) y el área de la sección transversal del equipo ( $A_C$ ) según la Ec. (3).

$$J_G = \frac{Q_G}{A_C} \quad (3)$$

Este índice permite comparar la operación de equipos de flotación (en relación al flujo de gas empleado) que poseen diferentes áreas de sección transversal y distintos diseños.

- II) La distribución de tamaño de burbuja, representada por el diámetro promedio Sauter ( $D_{32}$ ).

- III) La concentración o *holdup* de gas ( $\varepsilon_{go}$ ) en la zona de colección.

- IV) El flujo superficial de área de burbuja ( $S_B$ ), como índice para determinar la tasa de generación de superficie de contacto. Se utiliza como índice global para evaluar la dispersión de gas en equipos de flotación. Además, es un parámetro importante para evaluar la capacidad de transporte de mineral valioso en equipos de flotación industrial (Yianatos & Contreras, 2010).

El parámetro  $S_B$  se obtiene según la Ec. (4).

$$S_B = 6 \cdot \frac{J_G}{D_{32}} \quad (4)$$

El flujo de gas tiene una gran influencia en la recuperación de minerales, dado que la recuperación de mineral aumenta con el aumento del flujo de gas. Este aumento en la

recuperación se debe al aumento del área superficial de las burbujas lo cual permite coleccionar una mayor cantidad de mineral que será recuperada en el concentrado.

Por otra parte, un aumento excesivo del flujo de gas puede perjudicar el proceso de flotación debido al incremento de turbulencia, al aumento del tamaño de las burbujas, el arrastre de ganga fina al concentrado y a la pérdida de la interfase pulpa – espuma (consecuencia del incremento de la turbulencia) (Yianatos & Vinnett, 2015).

### 1.3. Zona de espuma

En esta zona, las burbujas cargadas de mineral forman el lecho de espuma y son transportadas al rebalse de concentrado. Se ha intentado describir y modelar este fenómeno, pero su complejidad ha limitado la cantidad de modelos que puedan relacionar el impacto de las variables operacionales en la recuperación o selectividad de la espuma. Las principales variables operacionales que impactan en la zona de espuma son (Yianatos & Vinnett, 2015):

- Velocidad superficial de gas ( $J_G$ ) y altura de espuma ( $H_f$ )
- Agua de lavado (en columnas de flotación)
- Bias

La velocidad superficial de gas condiciona el transporte de burbujas cargadas hacia la corriente de concentrado. Al aumentar la velocidad superficial de gas, disminuye el tiempo de residencia de las burbujas en la zona de espuma, lo cual aumenta la recuperación de espuma debido a que se produce un mayor transporte de burbujas hacia corriente de concentrado. Adicionalmente, al aumentar la velocidad superficial de gas, aumenta el flujo de agua al concentrado. Esto implica un aumento de la recuperación no selectiva de sólidos finos no valiosos por arrastre. Razón por la cual la regulación de  $J_G$  debe considerar una operación adecuada en la zona de colección y un transporte de espuma adecuado.

La altura de espuma también modifica el transporte de burbujas cargadas hacia el concentrado. Al disminuir la altura de espuma, disminuye el tiempo de residencia de las burbujas en la zona de espuma, lo cual resulta en un mayor flujo de líquido en el concentrado, lo cual genera aumento en el arrastre.

En base a lo anterior, es importante seleccionar un rango de profundidad de espuma y velocidad superficial de gas que garanticen un buen compromiso entre el tiempo de residencia del gas en la zona de limpieza y el flujo de agua obtenido en la corriente de concentrado.

El agua de lavado se utiliza para evitar el arrastre de ganga fina al concentrado. Se agrega generalmente en los equipos de limpieza (como columnas de flotación, por ejemplo) sobre el tope o al interior de la espuma. Tiene dos funciones básicas:

- Reemplazar el agua de alimentación que es recuperada en el concentrado en equipos convencionales, lo cual reduce el arrastre de partículas hidrófilas.
- Aumentar la estabilidad de la espuma, por menor coalescencia de las burbujas.

Con la adición de agua de lavado se genera un aumento en la selectividad del proceso, sin pérdida significativa de recuperación de material valioso (Yianatos et al., 1988). Su efectividad depende del flujo empleado y de la homogeneidad de la adición, ya que la distribución de ésta debe abarcar por completo el área de espuma, sin perjudicar el transporte de material valioso.

En base a lo anterior, la velocidad superficial de agua de lavado ( $J_W$ ) corresponde a la razón entre el caudal de agua de lavado y el área transversal del equipo de flotación. Esta velocidad superficial de agua de lavado debe permitir la formación de un lecho de espuma estable. Además, debe permitir que se alcance un flujo neto de agua descendente a través de la interfase pulpa – espuma (flujo de *bias*) para tener un efecto favorable.

El *bias* representa la fracción neta de agua que fluye a través de la espuma y es uno de los principales responsables del aumento de la ley de concentrado en equipos de limpieza, debido al rechazo de la ganga fina arrastrada hidráulicamente. El *bias* es positivo cuando el flujo de agua de lavado es superior al flujo de agua recuperada en el concentrado (Yianatos & Vinnett, 2015).

## 1.4. Equipos de flotación

Las cuatro funciones principales de un equipo de flotación son:

- (i) Dispersar aire en la zona de pulpa.
- (ii) Proporcionar energía para aumentar la probabilidad de colisión entre burbujas y partículas en suspensión.
- (iii) Mantener una interfase pulpa/espuma estable.
- (iv) Facilitar el transporte de espuma.

Los equipos de flotación, independiente de su escala, se pueden clasificar en dos tipos: mecánicos y neumáticos. Los primeros son más utilizados en la industria minera (Mesa & Brito-Parada, 2019).

### 1.4.1. Celdas mecánicas

Las celdas mecánicas están equipadas con un impulsor para generar una región altamente turbulenta, que mantiene las partículas en suspensión, dispersa las burbujas de aire y promueve la colisión entre partículas y burbujas. Las celdas mecánicas pueden clasificarse en base al sistema de inyección de aire y pueden ser de tipo auto-aireadas o de aire forzado. Ambas tecnologías de aireación se utilizan ampliamente en las plantas de procesamiento de minerales, pero las celdas de aire forzado permiten un mejor control del aire suministrado, desacoplando esta variable de la velocidad del impulsor. El control del flujo de aire y la altura de espuma es relevante para optimizar el proceso de flotación (Mesa & Brito-Parada, 2019).

Hoy en día, el volumen unitario de las celdas de flotación ha aumentado significativamente, existen equipos que superan los 600 [m<sup>3</sup>], como el caso de la SuperCell<sup>TM</sup> de FLSmidth 660 [m<sup>3</sup>] (Aprim 2019), y la Outotec tankcell® e - series flotation de 630 [m<sup>3</sup>] (Outotec, 2019).

Este aumento en el volumen de las celdas mecánicas ofrece ventajas económicas y técnicas. En relación a ellas, se utiliza un control individual y poseen un menor consumo de energía. Por un lado, la hidrodinámica de la zona de colección depende del tamaño, la forma, la velocidad y posición del mecanismo de agitación (*sparger*, si son de tipo autoaspirante o aire

forzado, y el sistemas de rotor estator, etc.). Por otro lado, la recuperación de la espuma disminuirá debido a la mayor distancia al labio de descarga. Al contar con una mayor área transversal, se ve afectado el transporte de espuma. Para reducir este problema se han incorporado aceleradores de espuma, rebalses internos circulares y radiales con la finalidad de disminuir el área de la sección transversal y por ende aumentar la recuperación de espuma.

#### 1.4.2. Celdas neumáticas

Las celdas neumáticas de flotación se diferencian de las celdas mecánicas convencionales en cuatro características principales (Yianatos & Vinnett, 2015):

- Ausencia de agitación mecánica
- Sistema de generación de burbujas
- Incorporación de agua de lavado
- Geometría (mayor razón altura: diámetro)

Las celdas neumáticas no usan impulsores, sino que se generan burbujas inyectando el aire en la celda a alta presión o velocidad (Mesa & Brito-Parada, 2019).

Este tipo de celdas se clasifican según la forma en la cual contactan la pulpa con el aire, y pueden ser de tipo cocorriente o contracorriente (Mesa & Brito-Parada, 2019). Cabe destacar que no todos los modelos de celdas neumáticas utilizan de agua de lavado, como por ejemplo las celdas Imhoflot (Yianatos & Vinnett, 2015). Otro ejemplo de estos equipos son las celdas neumáticas Jameson. Las cuales al día de hoy son capaces de procesar caudales de alimentación de 1200 [m<sup>3</sup>/h], como la celda Jameson modelo B6500/24 de 6,5 [m] de diámetro (Glencore Company, 2019).

## 1.5. Recuperación de agua en espumas de flotación

La recuperación de agua se define como la fracción del agua que ingresa a la celda que es recuperada en el flujo de concentrado. Es uno de los parámetros clave en el modelamiento del proceso de flotación, debido a que tiene un efecto significativo en el arrastre de minerales (Zheng et al., 2006).

La recuperación de espuma y el arrastre están asociadas con la recuperación de agua e influyen en la recuperación de minerales y la ley del concentrado, respectivamente. Esto debido a que una mayor retención de líquido disminuye la coalescencia de las burbujas, ayudando a obtener una espuma más estable, y con ello, mejorando la recuperación de mineral valioso. Por otro lado, al existir una mayor recuperación de agua, es posible generar un mayor arrastre de ganga, lo cual afecta la ley del concentrado.

### 1.5.1. Factores que afectan la recuperación de agua

La recuperación de agua es un proceso de dos etapas:

1. Transferencia de agua de la fase de pulpa a la fase de espuma
2. Transferencia de agua desde la fase de espuma al concentrado.

La cantidad de agua que ingresa a la fase de espuma desde la fase de pulpa está estrechamente relacionada con las condiciones de la pulpa, como el área de superficie de burbujas, la concentración de espumante, la concentración de sólidos suspendidos y la condición de carga de burbujas. Solo una cierta fracción del agua que ingresa a la fase de espuma es recuperada en el concentrado. El resto regresa a la fase de pulpa por drenaje gravitacional y por colapso de las burbujas. Estos dos pasos de transferencia no son totalmente independientes entre sí. La cantidad de agua que entra en la fase de espuma determina las características de la espuma (movilidad de la espuma, estabilidad y retención de sólidos/líquido/aire) y, por lo tanto, influye en la recuperación del agua y partículas sólidas en la fase de espuma que van al concentrado (Zheng et al., 2006).

Por otro lado, la teoría del drenaje describe cómo la recuperación de agua también depende del movimiento y distribución de ésta a lo largo de los *Plateau Borders* en la espuma. La ecuación de drenaje representa un equilibrio entre tres fuerzas (Neethling et al., 2003):

- La gravedad
- La resistencia viscosa de las burbujas ascendentes
- La capilaridad que surge de los cambios en la estructura de la espuma

Según lo planteado por Wang et al., (2016), el aire ingresa en la pulpa de una celda de flotación y se convierte en un enjambre de pequeñas burbujas, dispersado por un impulsor en todas las direcciones dentro de la zona turbulenta. Después de la unión de minerales valiosos a las burbujas, éstas ascienden con el agua que las rodea (estela de las burbujas) hasta la interfase entre la zona de colección y la zona de espuma.

El agua que ingresa a la espuma se ve fuertemente afectada por las condiciones de operación en la fase de pulpa, la velocidad superficial del gas, la distribución del tamaño de la burbuja, la velocidad del impulsor, la concentración de espumante y la carga de burbujas.

La recuperación de agua ha sido modelada, en algunos casos, en relación a la recuperación de sólidos. En otros enfoques, se han encontrado relaciones empíricas entre la recuperación de agua y las condiciones de operación del equipo, además de modelar la física del fenómeno. A continuación se presentan los enfoques de algunos modelos que han sido propuestos hasta la fecha.

#### 1.5.2. Modelos de recuperación de agua teóricos y semi teóricos

##### ***Modelo de Moys (1978)***

Moys (1978) desarrolló un modelo semi teórico de recuperación de agua basándose en los principios fundamentales de la física, utilizando un modelo de tipo flujo pistón, realizando experimentos en una celda de flotación a escala de laboratorio.

En este modelo, la recuperación de agua fue considerada como un proceso de dos etapas. En la primera, el agua ingresa desde la fase de la pulpa hacia la fase espuma en la película (o capa límite) de las burbujas de aire. En esta etapa se supone que el espesor de la película se mantiene constante, Figura 1.2, donde " $\varepsilon$ " corresponde al espesor de la capa límite y " $D_b$ " al diámetro de la burbuja. Una vez que el agua se encuentra en la fase de espuma, ésta drena hacia la fase de pulpa a una velocidad que es proporcional a la concentración de agua en el nivel de espuma de estudio. Se estimó el valor de la capa límite de 0,6 [mm] y la constante de drenaje de 0,05[s<sup>-1</sup>].

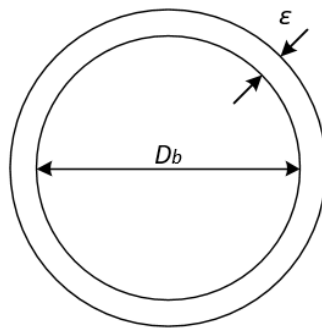


Figura 1.2. Espesor de burbuja.

En la Figura 1.3 se muestra la celda a escala de laboratorio, de 20 [cm<sup>2</sup>] de área transversal, utilizada por Moys en su trabajo. Se presentan los puntos de muestreo que fueron utilizados para llevar a cabo el estudio.

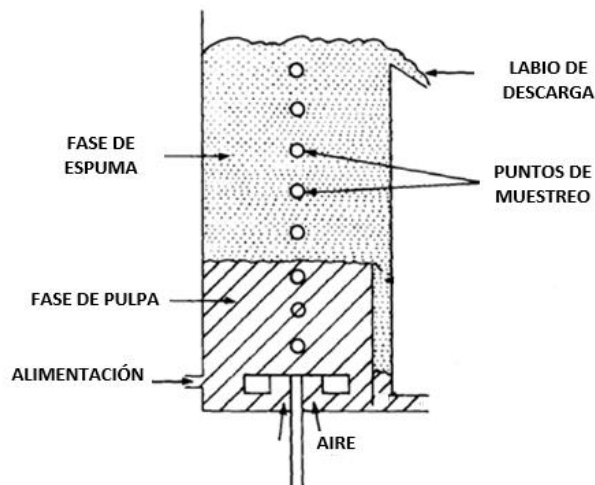


Figura 1.3. Celda de flotación utilizada por Moys (Moys, 1978).

Otros de los supuestos principales de este modelo son los siguientes:

- El área de la sección transversal de la espuma se mantiene constante.
- El cambio en la concentración de aire a distintos niveles de espuma es despreciable.
- La constante de drenaje de agua (o constante cinética de primer orden) se asume independiente del nivel de la espuma.

Se plantea el siguiente modelo (Moys, 1978), Ec. (5).

$$R_{fw} = \alpha \cdot \exp(-k_{wd} \cdot \tau_f) \quad (5)$$

Donde " $R_{fw}$ " corresponde a la recuperación de agua, " $\alpha$ " a la recuperación de aire, " $k_{wd}$ " a la constante de drenaje del agua, y " $\tau_f$ " corresponde al tiempo de residencia de la espuma.

En la Ec. 5, se aprecia el decaimiento que tiene la recuperación de agua en relación al tiempo de residencia de la espuma. A mayor tiempo de residencia, existe una mayor probabilidad de que el agua drene a través de los *Plateau Borders*.

Por otro lado, se aprecia que la recuperación de agua y la recuperación de aire muestran una proporcionalidad directa, donde a mayor recuperación de aire aumenta el transporte de agua en las burbujas, lo cual implica un aumento en la recuperación de agua (Moys, 1978).

En una investigación posterior realizada por Zheng et al. (2006), se evaluó el modelo de Moys (1984) utilizando un conjunto de datos provenientes de una celda Outokumpu de 3 [m<sup>3</sup>] de la planta de concentración de cobre Mount Isa (Queensland) de la minera Xstrata, y se observó que el modelo se ajusta bien a los datos obtenidos experimentalmente.

### ***Modelo de Neethling et al. (2003)***

Neethling et al. (2003) desarrollaron un modelo teórico, basado en experimentos realizados en una columna de flotación a escala de laboratorio, para calcular la recuperación de agua a partir de la longitud de los *Plateau Borders* y del área de la sección transversal de éstos.

Se supone que la mayor parte del agua se retiene y se mueve en los *Plateau Borders*, los cuales se presentan en la espuma como una red de canales de drenaje interconectados, distribuidos casi al azar.

Se aprecia que en una espuma estable, con velocidad de gas relativamente baja, el área de la sección transversal de los *Plateau Borders* disminuye rápidamente con la altura sobre la interfase pulpa-espuma, antes de llegar al nivel de rebalse del concentrado. Para la mayoría de las alturas de la espuma, cualquier disminución en el contenido de agua es causada principalmente por coalescencia, es decir, aumento en el radio de la burbuja y, por lo tanto, una disminución en la longitud de *Plateau Borders* (Neethling et al., 2003).

### 1.5.3. Modelos empíricos industriales y a escala piloto de recuperación de agua

#### ***Modelo de Alford (1990)***

El modelo de Alford fue obtenido de manera empírica, desarrollado en columnas de flotación industrial, con la finalidad de estimar el flujo volumétrico de agua en el concentrado en función del flujo másico de sólidos en el concentrado, Ec (6), (Alford, 1990):

$$Q_w = 2,41 \cdot F_s^{1,23} \quad (6)$$

Donde " $Q_w$ " corresponde al flujo volumétrico de agua y " $F_s$ " al flujo másico de sólidos.

Este estudio se realizó en columnas de flotación con un rango de diámetro de 1,2 – 3,5 [m], utilizando un mineral de plomo/zinc, para analizar el comportamiento de la recuperación de agua con el flujo de aire y el flujo de sólidos en el concentrado. Se pudo observar una correlación entre la recuperación de agua y el flujo másico de sólidos en el concentrado.

El modelo presentado es empírico, por lo cual solo puede ser aplicado en el rango de condiciones a las cuales se realizaron estos experimentos.

### ***Modelo de Savassi et al. (1998)***

Savassi et al. (1998) propusieron un modelo empírico para determinar la recuperación de agua como una función potencial del tiempo medio de residencia de la espuma, Ec. (7), (Savassi et al., 1998):

$$R_{fw} = 63,905 \cdot \tau_f^{-0,926} \quad (7)$$

Donde " $R_{fw}$ " corresponde a la recuperación de agua y " $\tau_f$ " al tiempo de residencia de la espuma.

Donde el tiempo medio de residencia se calculó como, Ec. (8).

$$\tau_f = \frac{H_f}{J_g} \quad (8)$$

El trabajo experimental fue realizado en una celda de flotación continua de capacidad 16,5 [L], usando sílice hidrófila. La alimentación fue de 25 [L/min] en los cinco experimentos. En cada prueba de laboratorio se registró:

- El % de sólidos en la alimentación.
- Altura de espuma en [mm].
- Caudal de aire en [L/min].
- Flujo másico de sílice en el concentrado [g/s].
- Flujo másico de agua en el concentrado [g/s]

El modelo es empírico, por lo cual solo debe ser aplicado bajo condiciones similares a las cuales se realizaron estos experimentos.

En el trabajo realizado por Zheng et al. (2006), se aplicó el modelo de Savassi et al. (1998) al conjunto de datos de Mt Isa Xtrata, para ajustar los datos experimentales a diferentes flujos de aire (Figura 1.4a) y para diferentes alturas de espuma (Figura 1.4b).

El modelo de Savassi et al. (1998) se ajusta bien a los datos experimentales para diferentes alturas de espuma a flujo de aire constante y para diferentes flujos de aire a altura de espuma constante. Sin embargo, la recuperación de agua no se comportó de forma similar para los

diferentes flujos de aire y para las diferentes alturas de espuma, incluso para el mismo tiempo de residencia de espuma. Esto indica que el usar el tiempo medio de residencia de la espuma para determinar la recuperación de agua es inadecuado para distinguir el efecto del flujo de aire y altura de la espuma. También se puede apreciar que la recuperación de agua es más sensible a la altura de espuma que al flujo de aire (Zheng et al., 2006).

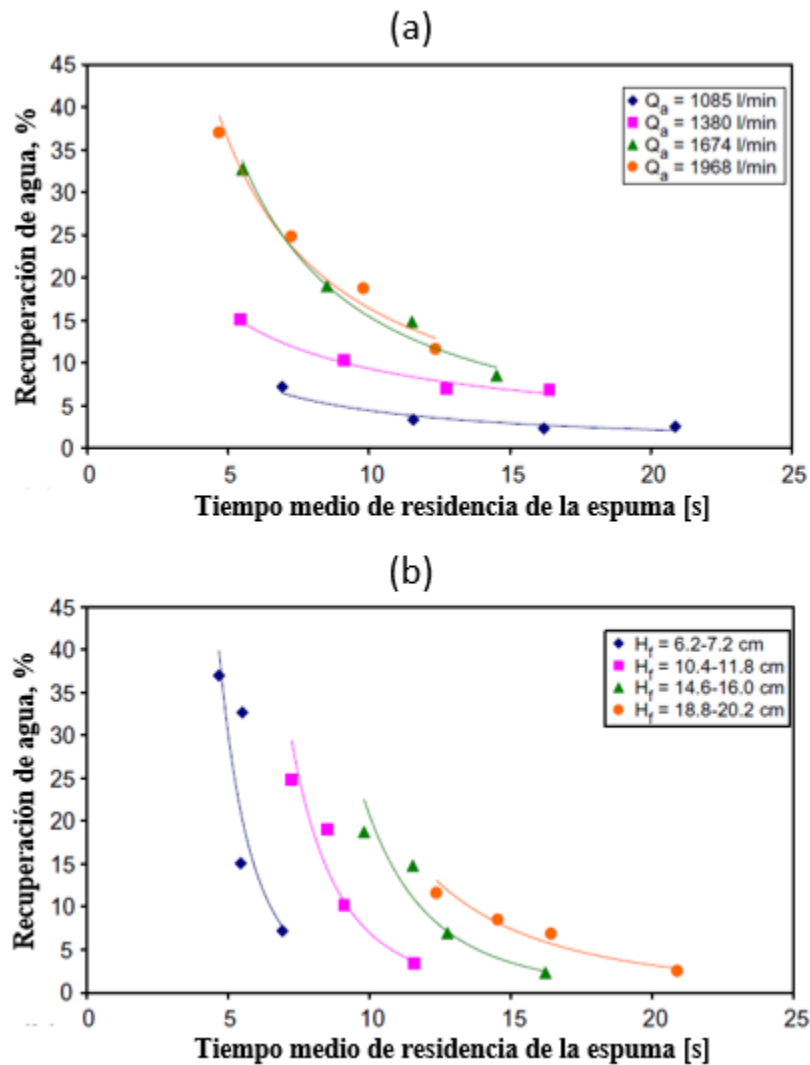


Figura 1.4. Recuperación de agua con modelo de Savassi et al. (1998) (a) para diferentes flujos de aire, (b) para diferentes alturas de espuma, según Zheng et al. (2006).

### **Modelo de Uribe et al. (1999)**

El modelo estadístico desarrollado por Uribe et al. (1999) expresa la velocidad superficial del agua en columnas de flotación, basándose en el balance de agua alrededor de ésta. Para ello utiliza la recuperación de sólidos, velocidad superficial del bias, altura de espuma y diámetro de columna. El modelo fue desarrollado teniendo en cuenta una base de datos de 139 pruebas experimentales en columnas, procesando diferentes tipos de minerales y operando bajo diversas condiciones experimentales, como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Base de datos utilizada para el modelo de Uribe et al. (1999).

<i>Procedencia</i>	<i>Mineral</i>	<i>Diámetro Columna [m]</i>	<i>Altura Columna [m]</i>	<i>Número de Pruebas</i>
<b>Compañía Fresnillo. Zac., México</b>	Pb – Zn	0,057	11	30
<b>Unidad El Monte. Hgo, México</b>	Pb – Zn	0,057	11	40
<b>Falconbridge. Ont, Canada</b>	Cu – Ni	0,91	11	34
<b>Ottan. Ont, Canada</b>	Zn	0,91	13	31
<b>Cuajone, Perú</b>	Cu - Mo	1,2	9	4

El modelo se obtuvo utilizando el software comercial Statistica MR (Versión 4.5), capaz de manejar sistemas no lineales. Empleando un intervalo de confianza del 95%, el modelo resultante es, Ec. (9), (Uribe et al., 1999).

$$J_C = (0,25R_{CS}^{0,35} - 0,4J_B) \cdot H_f^{0,28} \cdot D^{-0,2} \quad (9)$$

Donde " $J_C$ " corresponde a la velocidad superficial de agua en el concentrado, " $R_{CS}$ " a la fracción de sólidos recuperados en el concentrado, " $J_B$ " a la velocidad superficial bias, " $H_f$ " a la altura de espuma, y " $D$ " corresponde al diámetro de la columna de flotación.

### ***Modelo de Harris (2000)***

Harris (2000) usó un modelo empírico de recuperación de agua basándose en el trabajo de Gorain et al. (1998). En este caso, la recuperación de agua de la pulpa a la espuma y de la espuma al concentrado se modelan por separado. El agua en la fase pulpa se trata como un componente de la misma manera que los minerales en el sistema. Además, se asume que la recuperación del agua desde la fase de pulpa hasta la fase de espuma sigue una cinética de primer orden. El trabajo se realizó en una planta piloto de platino.

El modelo de Harris (2000) se muestra en la Ec (10), (Zheng et al., 2006).

$$R_w = 1 - \frac{1}{1 + P_w \cdot S_b \cdot \tau_p \cdot \Omega \cdot \exp(\sigma \cdot V_f - \chi \cdot \tau_f)} \quad (10)$$

Donde " $R_w$ " corresponde a la recuperación fraccional de agua de alimentación en el concentrado, " $S_b$ " al flujo superficial de área de burbuja, " $\tau_p$ " al tiempo de residencia de la pulpa, " $V_f$ " al volumen efectivo de la zona de espuma, " $\tau_f$ " al tiempo de residencia de la espuma y " $P_w$ ", " $\Omega$ ", " $\sigma$ ", " $\chi$ " corresponden a constantes establecidas por Harris en su modelo.

En el trabajo realizado por Zheng et al. (2006) se aplicó el modelo propuesto por Harris (2000) al conjunto de datos de Mt Isa Xtrata, para diferentes flujos de alimentación.

El enfoque de Harris (2000) consiste en modelar la recuperación del agua de la fase pulpa a la fase espuma como un proceso de primer orden, y modelar la recuperación del agua de la fase espuma, en función del tiempo medio de residencia de espuma y el volumen de espuma, y se adapta bien a los datos de la planta Mt Isa de Xtrata (Zheng et al., 2006).

### ***Modelo de Wang et al. (2016)***

Wang et al. (2016) desarrollaron un diseño factorial experimental de flotación para investigar los efectos principales y combinados del flujo de gas, la altura de la espuma, la velocidad del impulsor y la densidad de ganga en la recuperación de agua. Se utilizó una mezcla de

calcopirita y minerales de ganga en una celda de flotación batch de 3,5 [L]. La Figura 1.5 muestra de forma esquemática las dimensiones del equipo experimental, junto con el nivel de medición de las pruebas realizadas.

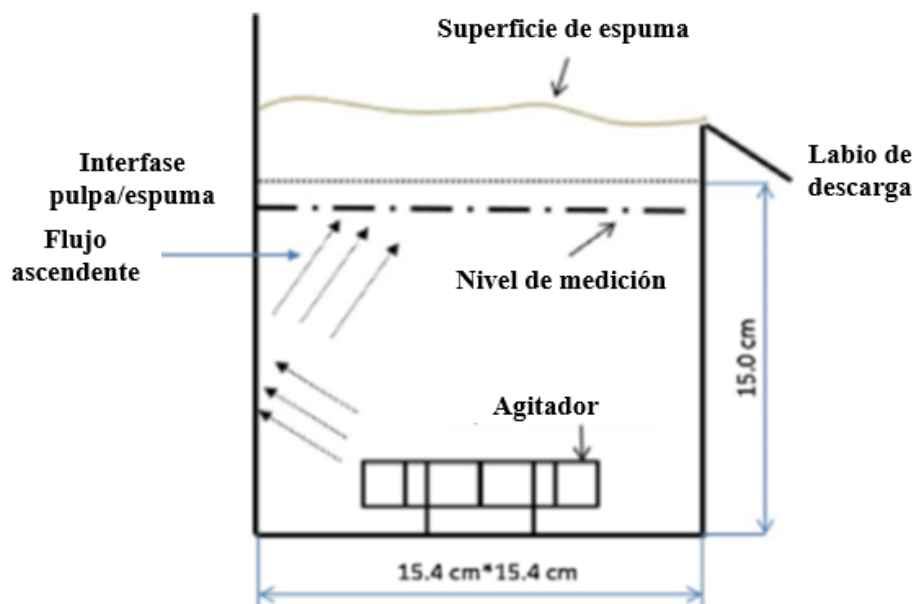


Figura 1.5. Vista lateral de la celda de 3.5 [L] utilizada por Wang et al. (2016).

Se definió la recuperación de agua como la razón del agua recuperada al concentrado respecto al agua inicialmente agregada a la celda de flotación más el agua agregada para mantener el nivel de pulpa.

Se utilizó un diseño experimental de tipo factorial de cuatro factores y dos niveles, considerando además un punto central. Los experimentos realizados fueron los siguientes:

Tabla 1.2. Resumen de experimentos realizados (Wang et al., 2016).

<i>Nivel</i>	<i>Velocidad de agitación [rpm]</i>	<i>Gravedad Específica</i>	<i>Flujo de aire [l/min]</i>	<i>Altura de espuma [cm]</i>
<b>Alto</b>	1200	5,26	14,5	2
<b>Medio</b>	1000	-	11,5	1,5
<b>Bajo</b>	800	2,65	8,5	1

Los resultados se analizaron con el software estadístico Minitab 17, aplicando un intervalo de confianza del 95%. El modelo de regresión obtenido es, Ec (11):

$$WR = 8,083255 + 0,00877r + 2,83948G - 11,24258H_f + 0,000176(r \cdot \rho_p) - 0,67094(G \cdot H_f) \quad (11)$$

Donde “WR” corresponde a la recuperación de agua registrada en valores de porcentaje, “r” es la velocidad de agitación en rpm, “G” corresponde al flujo de gas en lpm, “H<sub>F</sub>” es la altura de espuma registrada en cm, y “ρ<sub>p</sub>” corresponde a la gravedad específica.

La Figura 1.6 muestra la recuperación de agua estimada usando la Ec. (11) versus la recuperación de agua experimental. El modelo obtenido por Wang et al. (2016) proporciona una buena estimación de la recuperación de agua.

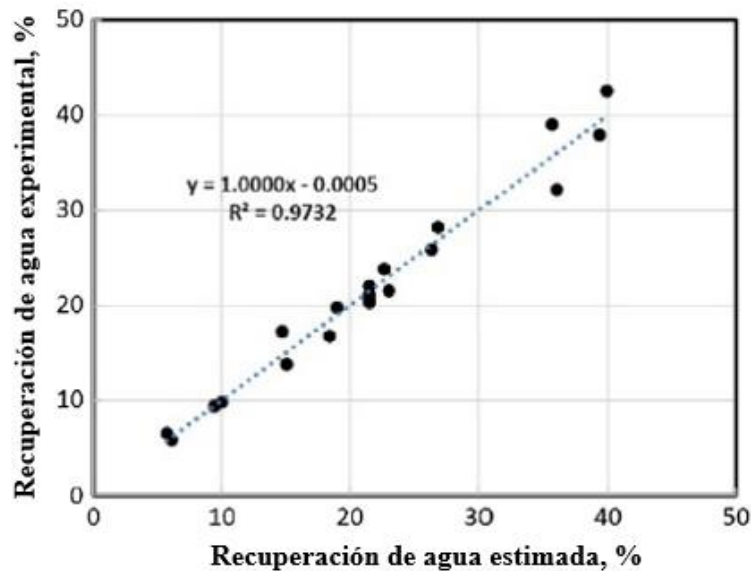


Figura 1.6. Recuperación de agua estimada a partir del modelo versus experimental (Wang et al., 2016).

Los resultados obtenidos mostraron que la recuperación de agua depende significativamente de:

- Altura de espuma
- Flujo de gas
- Velocidad del impulsor
- La interacción entre la velocidad del impulsor y la gravedad específica de partículas
- La interacción entre el flujo de gas y la altura de la espuma

La recuperación de agua resultó menos sensible al flujo de gas a medida que aumenta la altura de la espuma, y más sensible a la altura de la espuma a medida que aumenta el flujo de gas.

En esta memoria se presenta el estudio de la recuperación de agua como función de la altura de espuma y el flujo de gas, y adicionalmente se analiza el efecto de la disminución de la distancia (horizontal) hasta el labio de descarga en una celda de flotación. La disminución de esta distancia genera un impacto en el área disponible de la zona de espuma, lo cual afecta su comportamiento hidrodinámico, y por ende, tiene un efecto en la recuperación de agua. El efecto de ésta variable, combinada con la variación en la velocidad superficial de gas y la altura de espuma, es un área que no ha sido reportada hasta la fecha, razón por la cual se analiza en el presente trabajo.

## CAPITULO 2: Procedimiento experimental

### 2.1. Descripción del equipo de flotación

En el presente trabajo de memoria se realizaron experimentos de laboratorio para estudiar la recuperación de agua en la espuma de flotación. En base a ello, a continuación se describe el equipo de flotación, los instrumentos y accesorios utilizados para este propósito.

Se trabajó con una celda prototipo de flotación bidimensional con el propósito de caracterizar la zona de espuma de un sistema agua - aire. La celda representa una sección radial superior de una celda de flotación industrial, que comprende desde el acelerador de descarga de espuma (*frothcrowder*) al rebalse (labio de descarga) (Leiva, 2011). Además, la sección abarca verticalmente la zona de colección y la zona espuma. La región que representa la celda bidimensional con respecto a una celda de flotación industrial, se muestra en la Figura 2.1 mediante las líneas segmentadas.

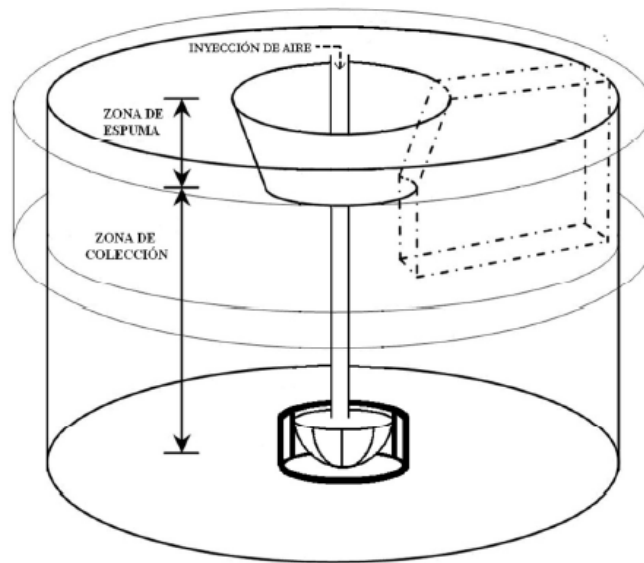


Figura 2. 1. Celda bidimensional delimitada por una línea punteada, de una celda industrial autoaspirante de 130 [m<sup>3</sup>] (Leiva, 2011).

La celda es de acrílico transparente, utilizando placas de 1 [cm] de espesor, con dimensiones de 140 x 140 [cm] (largo y altura) y un ancho de 15 [cm]. Las dimensiones utilizadas

corresponden a la sección radial (corte seccional) de una celda real, marca Wemco, modelo “Smart Cell 130” de 130 [m<sup>3</sup>] de capacidad (Leiva, 2011).

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de la celda bidimensional, junto con la instalación de una cámara Visiofroth para la adquisición de imágenes (MetsoMinerals, 2006). La cámara se ubica en la parte superior del equipo, a 40 cm sobre la espuma, y a 10 [cm] del borde de descarga. La instalación también incluye una bomba peristáltica y un estanque de 50 [L], el cual tiene por objetivo mantener una cantidad constante de agua en el interior de la celda, logrando un estado estacionario en el sistema, debido a que el líquido que se descarga al concentrado recircula de vuelta a la celda, manteniendo constante el nivel de agua en la celda.

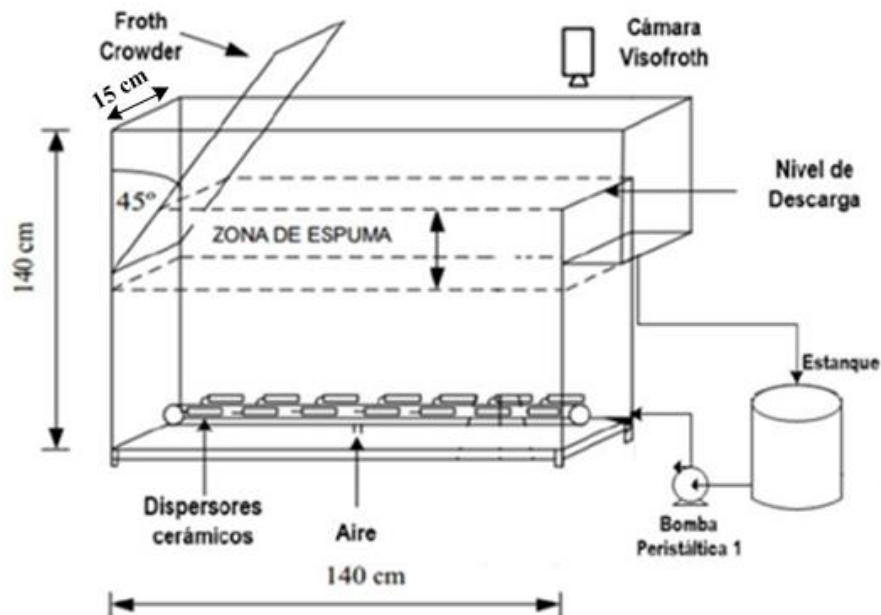


Figura 2. 2. Esquina de celda bidimensional (Leiva, 2011).

La celda posee un acelerador de espuma (*frothcrowder*) cuyo ángulo y/o posición pueden ser modificados. Sin embargo, los experimentos realizados se llevaron a cabo a un ángulo *frothcrowder* fijo, de 45°, el cual fue utilizado como referencia a partir de la celda autoaspirante Wemco, modelo “Smart Cell 130” mencionada anteriormente (Leiva, 2011). Adicionalmente, se utilizó un regulador de presión y un flujómetro másico para medir el flujo de aire que ingresa a la celda de flotación. La regulación del flujo de aire se realizó con una

válvula de control, que recibe una señal del traductor IP, la cual es enviada desde la interfaz computacional HMI InTouch (Wonderware, 2019).

La generación de burbujas se realizó mediante de 24 *spargers* porosos de 50 [cm<sup>2</sup>] de área cada uno, distribuidos uniformemente en el fondo de la celda.

## 2.2. Descripción de accesorios e instrumentos

### 2.2.1. Cámara VisioFroth

*Visiofroth* es un sistema de análisis de imágenes en tiempo real que permite obtener propiedades de las espumas de flotación (MetsoMinerals, 2006). De esta forma permite la captura y procesamiento cuantitativo automático de información sobre la apariencia y la velocidad de descarga de espumas de flotación. Estas cámaras son comúnmente utilizadas para control industrial.

La versión de *VisioFroth* utilizada en este trabajo posee iluminación LED, para iluminar la superficie de la espuma. Las imágenes son transmitidas vía fibra óptica a una unidad central de procesamiento, en este caso un computador.

La central de procesamiento usa una secuencia de imágenes para calcular parámetros específicos de la espuma. El sistema entrega velocidad de descarga de la espuma, distribución de tamaño de burbujas en el tope de espuma, índices de color y brillo, y tasa de colapso de burbujas.

*Visiofroth* permite estimar la velocidad de descarga de espuma (en las direcciones “X” e “Y”). Para ello, calcula el desplazamiento entre 2 imágenes consecutivas (específicamente el desplazamiento en píxeles entre estas imágenes), utilizando la transformada de Fourier modificada (Leiva, 2011).

La distribución de tamaño de burbujas es usada a menudo para conocer la calidad del concentrado o detectar la necesidad de agregar reactivos. Para la medición de tamaño de burbujas, *Visiofroth* utiliza técnicas de “*Watershed*” para delinear contornos de burbujas

dentro de una imagen y calcular el área superficial (Runge et al., 2007). En la versión disponible de *Visiofroth*, es posible obtener los valores de D80 y D50 de la distribución de tamaño de las burbujas, en porcentaje. D50 representa el diámetro bajo el cual se encuentra el 50[%] de las burbujas presentes en la muestra, y D80 representa el diámetro bajo el cual se encuentra el 80[%] de las burbujas.

Como resultado del análisis de imágenes, se utiliza el diámetro equivalente de una burbuja (en el tope de espume) para estimar la distribución de tamaño de burbujas. La cantidad de burbujas dentro de diferentes clases de tamaño se reporta dentro del sistema para obtener resultados estadísticos, por ejemplo, histogramas.

La forma usual de presentar los resultados es a través de la distribución acumulada pasante, la que suma las fracciones parciales bajo un diámetro determinado.

Adicionalmente, se registra la tasa de colapso, que corresponde a la tasa a la cual colapsan las burbujas en la superficie de la espuma, lo cual tiene un fuerte impacto en la recuperación y en el *dropback* de material dentro de esta fase. El sistema *Visiofroth* realiza capturas de imágenes cada 15 segundos (según el campo de visión delimitado que su cámara posee) para luego entregar una medida asociada con la tasa de colapso superficial de burbujas, obtenida a partir de las diferencias dinámicas entre los histogramas de las imágenes capturadas (Leiva, 2011).

La Figuras 2.3 muestra la instalación de la cámara en la celda de flotación utilizada.



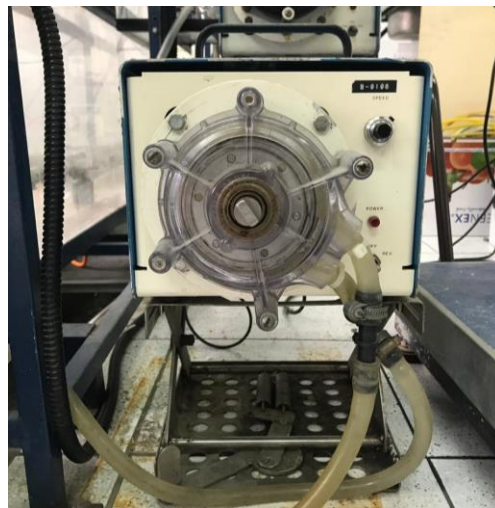
Figura 2. 3. Vista frontal de cámara Visiofroth.

### 2.2.2. Bomba peristáltica

Para realizar las experiencias se utilizó una bomba peristáltica Masterflex, que opera en el rango de 0 a 8 [LPM], controlado de manera remota a través de la interfaz HMI InTouch, Figura 2.4.

En algunas experiencias fue necesario utilizar una segunda bomba peristáltica en paralelo, para aumentar el flujo de recirculación a la celda.

En el Anexo B se presentan las curvas de calibración de ambas bombas.



*Figura 2. 4. Bomba Peristáltica.*

### 2.2.3. Sensor de diferencia de presión

Para medir la concentración de gas, se utilizó un medidor de diferencia de presión marca Siemens, modelo Sitrans P DS III, Figura 2.5. (Siemens, 2019).

El transmisor de presión digital está diseñado para medir presión relativa, presión absoluta, presión diferencial, flujo y nivel de llenado. Posee un rango de medición de 0 – 1 [mbar] a 0 – 700 [bar].



Figura 2. 5. Sensor diferencial de presión (Modelo Sitrans P DS III) (Siemens, 2019).

#### 2.2.4. Flujómetro másico.

Se utilizó un flujómetro másico Aalborg, modelo GMF 67 (ficha técnica en Anexo A) para medir el flujo de aire que ingresa a la celda de flotación. Éste trabaja en un rango de flujo de 0 a 500 [l/min] y puede operar a una presión máxima de 500 [psi] (Aalborg, 2018).



Figura 2. 6. Flujómetro másico utilizado (Aalborg, 2018).

## 2.3. Condiciones de operación de la celda bidimensional

Para cada experimento, el ángulo *frothcrowder* fue ajustado a 45° y se añadió una concentración inicial de 15 ppm de espumante Aerofroth® 65 Frother (Cytex Chile). Estas condiciones experimentales fueron escogidas de manera que se lograra un adecuado volumen de espuma (relativo a las dimensiones estructurales).

El agua disponible en el estanque de recirculación fue ambientada con 15 [ppm] de espumante, para que el agua que ingresa a la celda no cambie las condiciones de operación.

Al finalizar cada experimento, tanto la celda como el estanque de recirculación se vacían. Al iniciar una nueva operación, ambos se llenan de agua fresca (conservando el mismo volumen de líquido) y espumante (en la misma concentración).

Previo a cada medición, se estabiliza la celda durante 20 minutos para asegurar que la condición de estado estacionario se mantenga durante el tiempo de operación del equipo.

Finalmente, se registra la concentración de gas cada 15 minutos para asegurar la estabilidad durante las mediciones.

## 2.4. Metodología de medición

Se realizaron pruebas de aforo másico del flujo de descarga para asegurar el estado estacionario dentro de la celda de flotación. Inmediatamente después, se inicia el procedimiento de medición de aforo másico para obtener el flujo de agua recuperada en el concentrado. Se realizaron diez mediciones durante un lapso de tiempo medido a través de un cronómetro digital. La finalidad de las repeticiones fue comprobar que la medición de flujo se mantuviera estable durante todo el experimento. Cada prueba tuvo una duración total de una hora y media.

En cada experimento, la cámara *Visiofroth* registró la tasa de colapso, la velocidad de espuma y la distribución del tamaño de burbuja (D80 y D50). El programa realiza este registro cada 15 segundos durante la duración completa de cada prueba.

Adicionalmente, se registró la concentración de gas para asegurar la estabilidad de cada medición. Un valor constante indica que la operación se realiza en estado estacionario respecto a la concentración de espumante.

Todos los experimentos fueron realizados en duplicado para asegurar la validez de los resultados obtenidos.

## CAPITULO 3: Diseño experimental

### 3.1. Diseño experimental

La finalidad del diseño experimental fue estudiar y evaluar el efecto de tres variables operacionales en la recuperación de agua, junto con los efectos combinados entre ellas.

Este diseño permite generar un modelo empírico para predecir el comportamiento de la recuperación de agua, la cual fue medida y registrada como el flujo volumétrico [l/min] de agua recuperada en la corriente de concentrado.

Los experimentos fueron realizados utilizando un diseño factorial  $3^3$ , lo cual considera la evaluación de las siguientes tres variables:

- Velocidad superficial de aire ( $J_g$ )
- Profundidad de espuma ( $H_f$ )
- Porcentaje de área transversal efectiva de la celda ( $A_{eff}$ ),

Estas variables fueron estudiadas en tres niveles (alto, medio y bajo), Tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Niveles de diseño experimental.

<b>Condición</b>	<b><math>J_g</math> [cm/s]</b>	<b><math>H_f</math> [cm]</b>	<b><math>A_{eff}</math> [%]</b>
<b>Alta</b>	1,8	6	75
<b>Media</b>	1,5	4	70
<b>Baja</b>	1,2	2	65

Se determinaron los niveles de las variables que se muestran en la Tabla 3.1. utilizando pruebas exploratorias de laboratorio en la celda de flotación. De esta forma se determinó el rango de altura de espuma, área efectiva a utilizar y velocidad superficial de aire.

El área transversal efectiva de la celda depende directamente de la distancia horizontal al rebalse y del ángulo *frothcrowder*. Al instalar el *frothcrowder*, se disminuye la distancia de transporte al rebalse. Esto entrega un área de espuma, que es menor al área total de la celda, y se denomina “ $A^*$ ”, como se aprecia en la Figura 3.1. Por lo tanto se define el área efectiva como:

$$A_{eff} = \frac{A^*}{A_{total}} \quad (12)$$

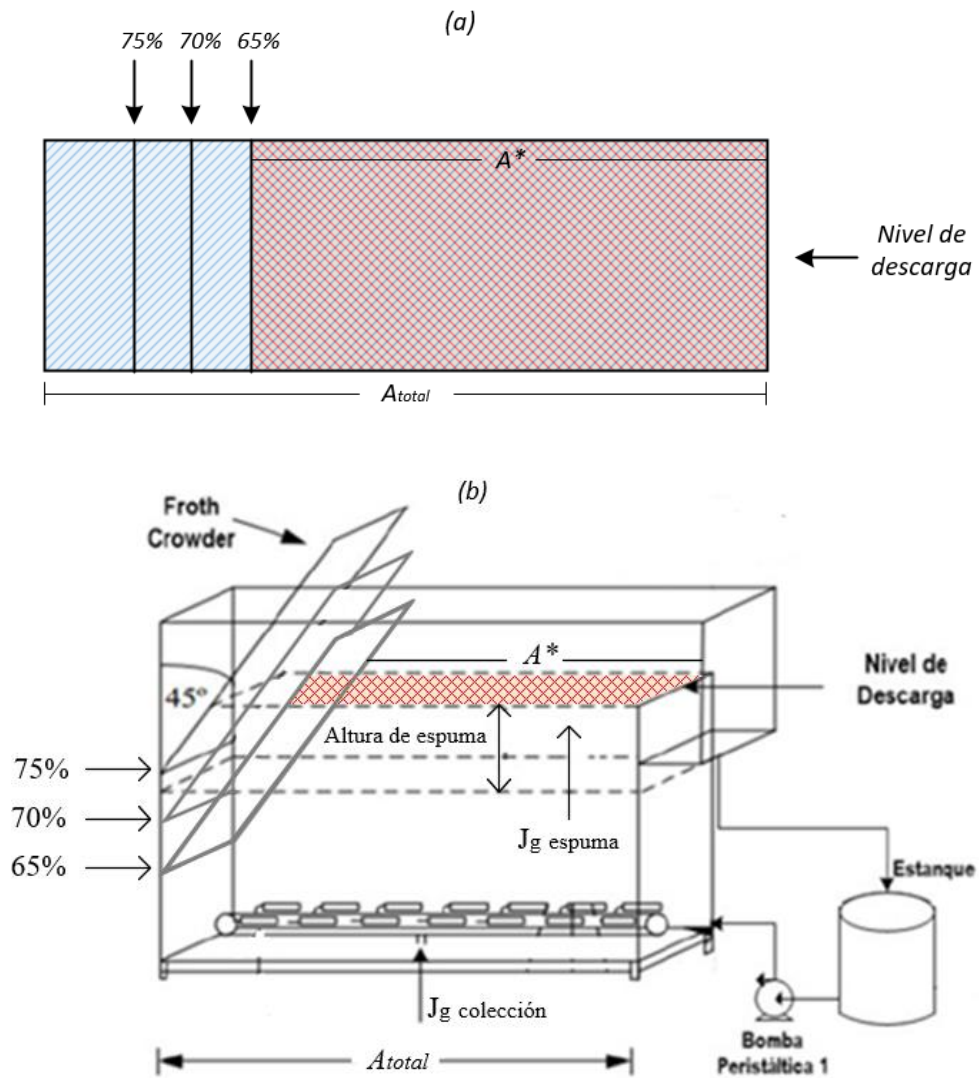


Figura 3. 1. (a) Esquema en vista superior de celda de flotación (b) Esquema en vista lateral de celda de flotación.

Con la finalidad de evaluar el efecto del cambio de área efectiva en la recuperación de agua, se evaluaron tres posiciones distintas del *frothcrowder*, las cuales proporcionaron tres áreas efectivas de espuma distintas (nivel alto, medio y bajo).

Los valores de área efectiva de espuma seleccionados fueron tomados como referencia a partir de una celda real, marca Wemco de 130 [m<sup>3</sup>], donde su área efectiva de espuma corresponde al 70% del área total. Valor que fue tomado de referencia como nivel intermedio de diseño experimental, para luego evaluar el efecto de aumentar en un 5% su área (nivel alto) y el efecto de disminuir en un 5% su área (nivel bajo).

La Figura 3.1. (a) y 3.1. (b) muestran esquemáticamente las vistas superior y lateral (respectivamente) de la celda de flotación bidimensional junto con los tres niveles de área efectiva seleccionados para el presente trabajo, y cómo calcular el área efectiva en ella. Se muestra a modo de ejemplo el caso de 65% de área efectiva.

La velocidad superficial de aire ( $J_g$ ) para el modelo de diseño factorial, se calculó en base al área total de la celda (zona de colección). El valor del  $J_g$  será distinto en la zona de espuma para cada porcentaje de área efectiva evaluado, Figura 3.1. (b).

La velocidad superficial de aire en la zona de espuma se obtiene según la Ec. 13. y en la Tabla 3.2 se muestran los resultados.

$$Jg \text{ zona espuma} = \frac{Jg \text{ zona colección}}{A_{eff}} \quad (13)$$

Tabla 3. 2. Valores de  $J_g$  en zona de espuma de acuerdo a su área efectiva.

<i><math>Jg</math> zona colección [cm/s]</i>	<i>Área efectiva de espuma [%]</i>	<i><math>Jg</math> zona espuma [cm/s]</i>
1,2	65	1,9
1,2	70	1,7
1,2	75	1,6
1,5	65	2,3
1,5	70	2,1
1,5	75	2,0
1,8	65	2,8
1,8	70	2,6
1,8	75	2,4

Con respecto a la altura de espuma, se consideró los centímetros de altura entre la interfase agua – espuma y el nivel de descarga, como se aprecia en la Figura 3.1. (b). La condición

baja de altura de espuma fue determinado como la mínima altura de espuma capaz de generar un flujo de descarga para cada una de velocidades superficiales de aire seleccionadas en el presente diseño experimental, mientras que la condición alta fue determinada como la máxima altura de espuma capaz de generar rebalse al operar la celda de flotación a condición baja de  $J_g$  en la zona de colección.

El diseño factorial se compone de un total de 27 experimentos, evaluando todas las combinaciones entre variables, los cuales se detallan a continuación:

*Tabla 3. 3. Condiciones del diseño experimental.*

<b><i>Experimento</i></b>	<b><i><math>J_g</math> [cm/s]</i></b>	<b><i><math>H_f</math> [cm]</i></b>	<b><i><math>A_{eff}</math> [%]</i></b>
<b><i>1</i></b>	1,2	2	65
<b><i>2</i></b>	1,2	2	70
<b><i>3</i></b>	1,2	2	75
<b><i>4</i></b>	1,5	2	65
<b><i>5</i></b>	1,5	2	70
<b><i>6</i></b>	1,5	2	75
<b><i>7</i></b>	1,8	2	65
<b><i>8</i></b>	1,8	2	70
<b><i>9</i></b>	1,8	2	75
<b><i>10</i></b>	1,2	4	65
<b><i>11</i></b>	1,2	4	70
<b><i>12</i></b>	1,2	4	75
<b><i>13</i></b>	1,5	4	65
<b><i>14</i></b>	1,5	4	70
<b><i>15</i></b>	1,5	4	75
<b><i>16</i></b>	1,8	4	65
<b><i>17</i></b>	1,8	4	70
<b><i>18</i></b>	1,8	4	75
<b><i>19</i></b>	1,2	6	65
<b><i>20</i></b>	1,2	6	70
<b><i>21</i></b>	1,2	6	75
<b><i>22</i></b>	1,5	6	65
<b><i>23</i></b>	1,5	6	70
<b><i>24</i></b>	1,5	6	75
<b><i>25</i></b>	1,8	6	65
<b><i>26</i></b>	1,8	6	70
<b><i>27</i></b>	1,8	6	75

La modificación de las variables de operación afecta la respuesta de la recuperación de agua (objetivo principal del trabajo), pero también de otras variables, como la velocidad de transporte de espuma, la distribución de tamaño de burbuja y la tasa de colapso de las burbujas, mediante una cámara *Visiofroth* estas variables fueron registradas (MetssoMinerals, 2006).

## CAPITULO 4: Resultados

### 4.1. Resultados experimentales

Las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 presentan los resultados del flujo de agua recuperada en el concentrado de los 27 experimentos, ordenados por área efectiva (65, 70 y 75%, respectivamente). La Tabla C.1, C.2 y C.3 del Anexo C muestran los datos experimentales de cada experiencia.

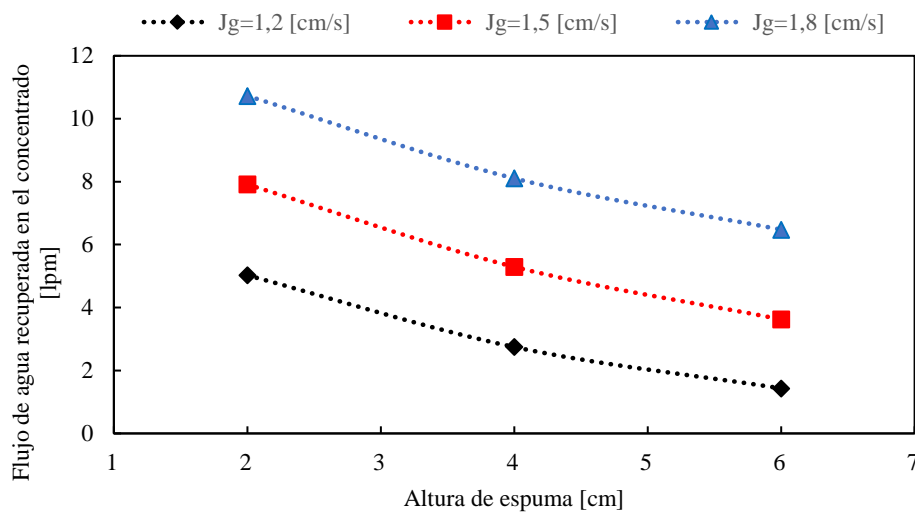


Figura 4. 1. Flujo de agua recuperada, área efectiva de 65 %.

Para los experimentos realizados a un área efectiva de espuma de 65% (Figura 4.1), se genera un aumento gradual en el flujo de agua recuperada con el aumento de la velocidad superficial de gas, el cual fue aproximadamente de 3 [lpm] para cada condición de altura de espuma, como se puede apreciar en la Figura 4.1. Para ejemplificar lo anterior, al observar las mediciones realizadas a altura de espuma de 4 [cm] se aprecia que a la condiciones baja, intermedia y alta de  $J_g$  se tiene un flujo de agua recuperada de aproximadamente 3 [lpm], 6 [lpm] y 9 [lpm] respectivamente.

Además, se observa que a mayor altura de espuma, para una misma condición de  $J_g$  y área efectiva, el flujo de agua recuperada disminuye.

El menor flujo de agua recuperada registrado fue de 1,43 [lpm] para la condición de 6 [cm] de altura de espuma y 1,2 [cm/s] de velocidad superficial de gas. Mientras que el mayor flujo de agua recuperada fue de 10,73 [lpm] para la condición de 2 [cm] de altura de espuma y 1,8 [cm/s] de velocidad superficial de gas.

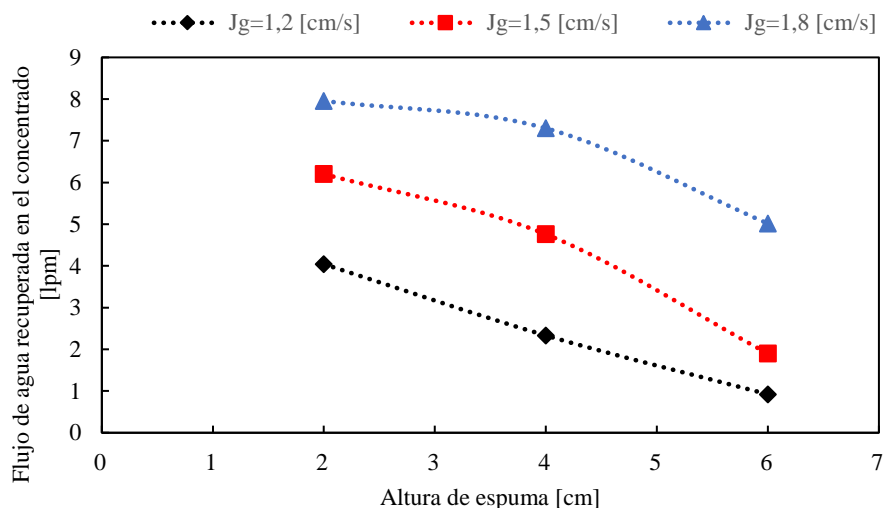


Figura 4. 2. Flujo de agua recuperada, área efectiva de 70 %.

Para los experimentos realizados a un área efectiva de espuma de 70% (Figura 4.2), el aumento en el flujo de agua recuperada no es uniforme como en el caso anterior, pero aún así se aprecia un aumento en el flujo de agua recuperada con el aumento de la velocidad superficial de gas.

Nuevamente se observa que a mayor altura de espuma, para una misma condición de  $J_g$  y área efectiva, el flujo de agua recuperada disminuye. Sin embargo, para los experimentos realizados a velocidad superficial de aire de 1,8 [cm/s] esta disminución es menos pronunciada que para las condiciones de 1,5 y 1,2 [cm/s].

El menor flujo de agua recuperada registrado fue de 0,92 [lpm] para la condición de 6 [cm] de altura de espuma y 1,2 [cm/s] de velocidad superficial de gas. Mientras que el mayor flujo de agua recuperada fue de 7,96 [lpm] para la condición de 2 [cm] de altura de espuma y 1,8 [cm/s] de velocidad superficial de gas.

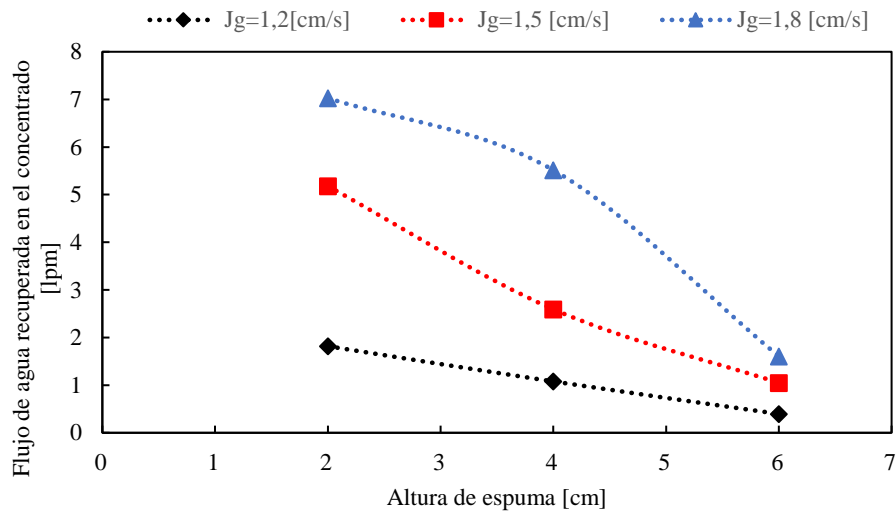


Figura 4. 3. Flujo de agua recuperada, área efectiva de 75 %.

Para los experimentos realizados a un área efectiva de espuma de 75% (Figura 4.3), el aumento en el flujo de agua recuperada nuevamente no es uniforme, pero aun así se aprecia un aumento en el flujo de agua recuperada con el aumento de la velocidad superficial de gas.

Existe una gran diferencia en el flujo de agua recuperada para la condición baja de altura de espuma, mientras que para la condición alta de altura de espuma, se presenta un bajo aumento en el flujo de agua recuperada, presentándose una diferencia de 0,6 [lpm] entre cada de las mediciones realizadas a 6 [cm] de altura de espuma.

El menor flujo de agua recuperada registrado fue de 0,40 [lpm] para la condición de 6 [cm] de altura de espuma y 1,2 [cm/s] de velocidad superficial de gas. Mientras que el mayor flujo de agua recuperada fue de 7,03 [lpm] para la condición de 2 [cm] de altura de espuma y 1,8 [cm/s] de velocidad superficial de gas.

Se observa que el menor flujo de agua recuperada en todos los experimentos realizados, se registró al operar a 6 [cm] de altura de espuma, 1,2 [cm/s] de velocidad superficial de gas y 75% de área efectiva de espuma. Mientras que el mayor flujo de agua recuperada se registró al operar a 2 [cm] de altura de espuma, 1,8 [cm/s] de velocidad superficial de gas y 65% de área efectiva de espuma.

En las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 con el aumento de la altura de espuma se puede observar que el flujo de agua recuperada sigue un comportamiento decreciente en la celda de flotación. Esto se explica debido a que una mayor altura de espuma aumenta el tiempo de residencia del líquido, lo cual permite un mayor drenaje de líquido hacia la zona de colección.

También se puede apreciar que a medida que aumenta la velocidad superficial de gas, aumenta el flujo de agua recuperada en el concentrado, para todos los valores de  $H_f$ . Esto ocurre debido a que un mayor  $J_g$ , aumenta el enjambre de burbujas en la zona de colección, generando un mayor arrastre de líquido hacia la zona de espuma y disminuye el tiempo de residencia en la espuma. Además, el aumento de  $J_g$  genera un aumento en el flujo de líquido que ingresa a la espuma arrastrada por las burbujas.

Finalmente, se observa que a medida que disminuye el área efectiva, se produce un aumento gradual en el flujo de agua recuperada, debido a que una menor área efectiva implica una menor distancia al rebalse de la espuma. En la Figura 4.4 se aprecia como la disminución en el área efectiva de la celda de flotación, genera un aumento en el flujo de agua recuperado en el concentrado. Se tomó a modo de ejemplo los nueve experimentos realizados a altura de espuma fija en 4 [cm], al variar la velocidad superficial de aire y el área efectiva. La tendencia se mantiene para el resto de los experimentos realizados a alturas de espuma de 2 y 6 [cm].

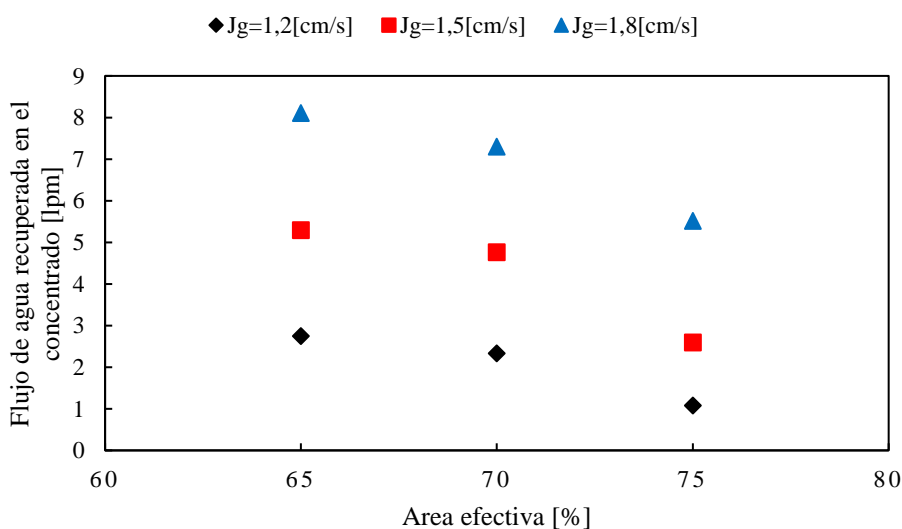


Figura 4. 4. Flujo de agua recuperada, altura de espuma 4 [cm].

Se analizó el comportamiento de la velocidad de transporte horizontal de espuma utilizando el sistema *Visiofroth*. En la Figura 4.5 se muestra una relación entre el flujo de agua recuperada en el concentrado y la velocidad de transporte de espuma en base a las mediciones *Visiofroth*.

El flujo de agua recuperada en el concentrado y la velocidad de transporte de espuma son consecuencias de las variables de operación controladas. La correlación presentada indica que, por ejemplo, al disminuir el área efectiva de la celda, el flujo de agua recuperada y la velocidad de transporte de espuma aumentan, y lo harán en una relación de tipo potencial, como se aprecia en la Figura 4.5, donde la correlación obtenida fue la siguiente, Ec (14).

$$F_{AR} = 0,59 \cdot v^{1,31} \quad (14)$$

Donde  $F_{AR}$  corresponde al flujo de agua recuperada en el concentrado y  $v$  a la velocidad de transporte de espuma. La correlación obtenida presentó un coeficiente de determinación de 0,989.

La correlación obtenida resulta de utilidad para obtener una estimación del flujo de agua recuperada en el concentrado a partir de una medición sencilla, como lo es la velocidad de transporte de espuma. En este caso, por ejemplo, al adquirir los valores de velocidad de transporte de espuma registrado por la cámara *Visiofroth*, es posible estimar el flujo de agua recuperada sin necesidad de realizar mediciones de esta variable.

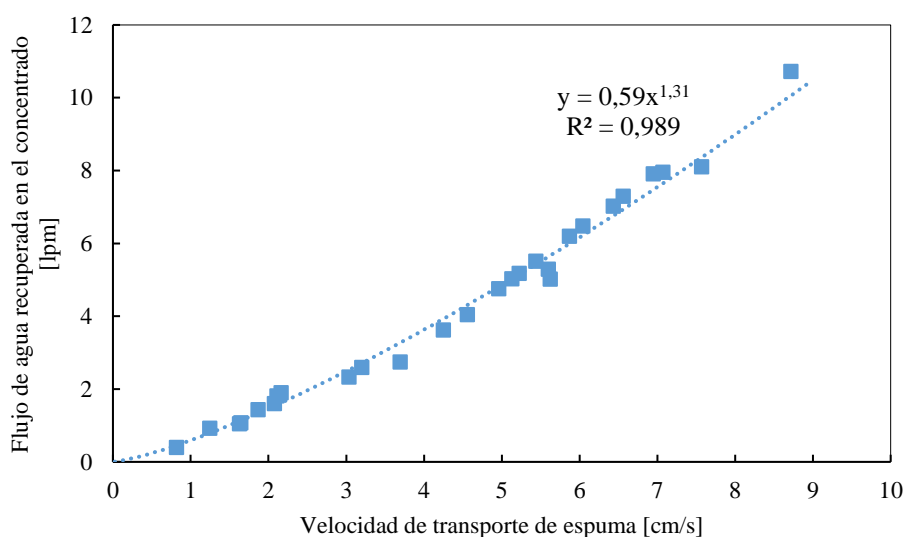


Figura 4. 5. Recuperación de agua vs velocidad de transporte de espuma (*Visiofroth*).

La Figura 4.6, muestra la relación observada entre la tasa de colapso y la altura de espuma para un conjunto de 9 experimentos, del total realizados. Cada conjunto de 3 experimentos fue realizado utilizando valores de  $J_g$  de 1,2, 1,5 y 1,8 [cm/s] y área efectiva ( $A_{eff}$ ) de 75, 70 y 65 [%] respectivamente. La tendencia se mantiene para los experimentos realizados a las otras de las combinaciones de  $J_g$  y área efectiva analizadas en el presente trabajo de memoria.

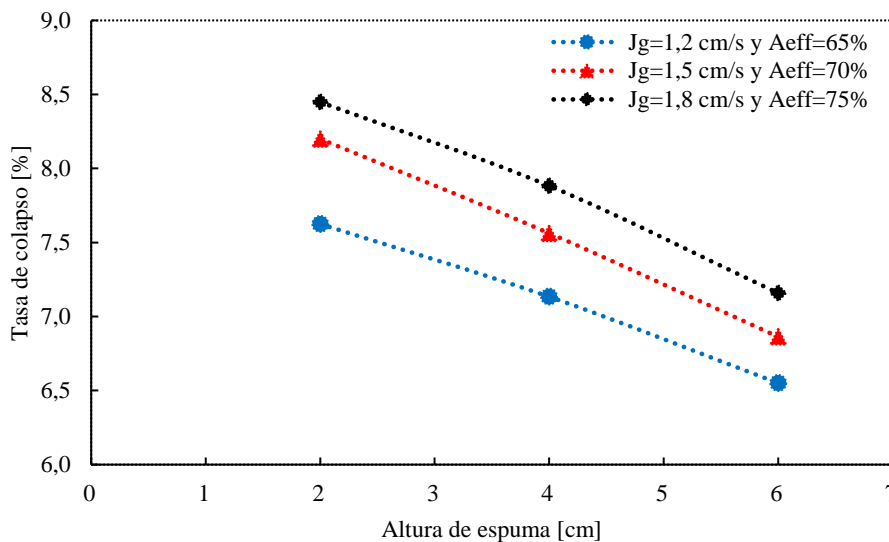


Figura 4. 6. Análisis de tasa de colapso para los experimentos realizados.

Se observa que una disminución en la velocidad superficial de gas y en el área efectiva de la zona de espuma, aumenta la tasa de colapso de las burbujas. Esto se debe a que una mayor velocidad superficial de gas genera un mayor arrastre de líquido hacia la zona de espuma, lo cual aumenta la estabilidad del colchón de espuma. Por su parte, una disminución en el área efectiva de la celda de flotación, produce un aumento gradual en el flujo de agua recuperada y la velocidad de transporte de espuma (como se observó en la Figura 4.5), lo cual produce un aumento en la tasa de colapso de las burbujas.

Por otro lado, se aprecia que al aumentar la altura de espuma en una celda de flotación, disminuye la tasa de colapso de las burbujas. Esto se aleja del comportamiento esperado, dado que una mayor altura de espuma genera como consecuencia un mayor drenaje de líquido

a la zona de colección, generando una espuma más seca, por ende aumentado la inestabilidad y la tasa de colapso de ésta.

El comportamiento observado de la tasa de colapso versus el aumento de la altura de espuma, se explica en base a dos motivos principales. En primer lugar, la cámara *Visiofroth* se encuentra ubicada a 10 [cm] del labio de descarga, por lo cual solo se analiza el comportamiento de la espuma en ese punto. En base a ello, no es posible conocer o analizar el comportamiento representativo de toda la zona de espuma. Además, el comportamiento de las burbujas en la zona de espuma cerca del rebalse es distinto a su comportamiento en el resto del trayecto. En segundo lugar, dado el espacio delimitado que logra enfocar la cámara *Visiofroth*, es posible que la tasa de colapso registrada se vea sesgada por el tamaño de las burbujas que se capturan. Cuando la altura de espuma es menor, se generan burbujas de menor tamaño.

Dado que la cámara *Visiofroth* analiza la tasa de colapso en base al tamaño de burbuja observado en dos imágenes consecutivas, al contar con pocas burbujas pero de gran tamaño, se genera un sesgo, interpretando que la tasa de colapso es baja.

Finalmente, se analizaron los valores utilizados de velocidad superficial de gas ( $J_g$ ) en los experimentos para estimar el diámetro de burbuja en la zona de colección. Se realizaron 9 experimentos para cada una de las tres condiciones de “ $J_g$ ” analizadas. Para esto, se utilizó la correlación planteada por Vinnett et al. (2014), Ec. (15), la cual estima el diámetro medio sauter ( $D_{32}$ ) de las burbujas en función de la velocidad superficial de gas ( $J_g$ ). Esta correlación fue obtenida considerando datos industriales medidos en distintas celdas de flotación, con distintos tamaños y condiciones de operación, como se presenta en la Figura 4.7.

$$D_{32} = 0,77 \cdot e^{0,77 \cdot J_g} \quad (15)$$

$D_{32}$  corresponde al diámetro medio Sauter de burbuja en la zona de colección en [cm] y  $J_g$  a la velocidad superficial de gas en [cm/s].

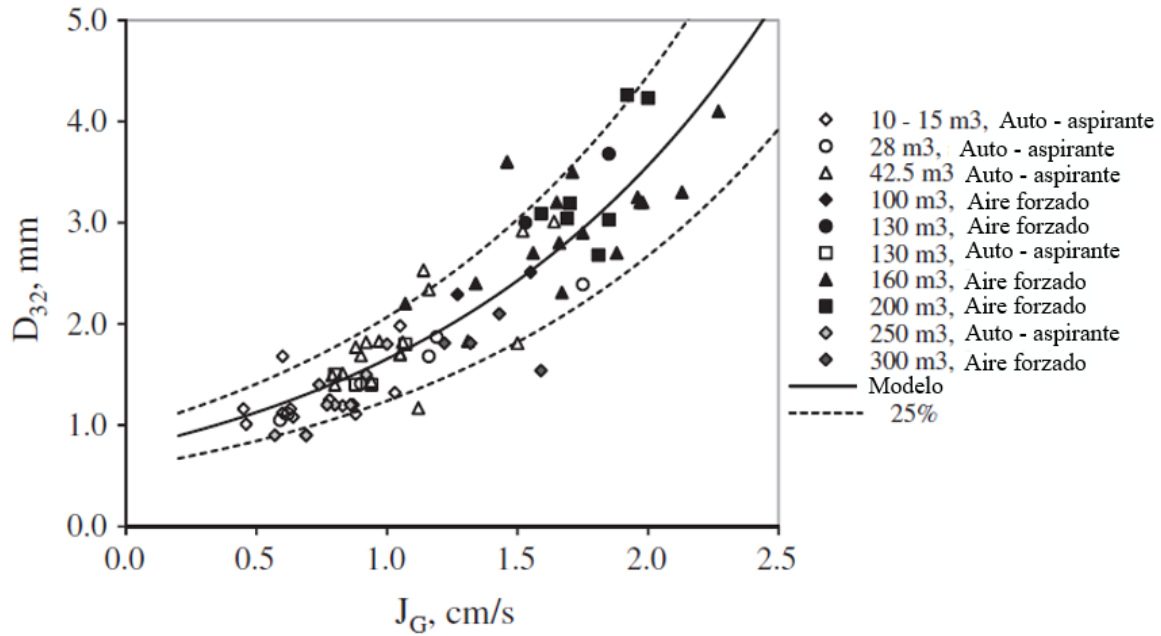


Figura 4. 7. Diámetro medio Sauter, como función de la velocidad superficial de gas (Vinnett et al., 2014).

Los diámetros de burbuja estimados para los  $J_G$  analizados en las pruebas experimentales se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4. 1. Diámetro de burbuja para los valores de " $J_G$ " analizados.

<i>Velocidad superficial de gas [cm/s]</i>	<i><math>D_{32}</math> [mm]</i>
1,2	$1,94 \pm 0,53$
1,5	$2,44 \pm 0,76$
1,8	$3,08 \pm 1,06$

## 4.2. Modelo empírico de recuperación de agua

Los resultados del diseño factorial se presentan en el Anexo C, Tabla C.1, C.2 y C.3. Estos datos fueron utilizados para obtener el modelo empírico del flujo de agua recuperada en el concentrado.

Los efectos e interacciones de las tres variables sobre el flujo de agua recuperada se analizaron utilizando el software estadístico Minitab 18 (a un nivel de confianza del 95%). Se determinó un modelo de regresión lineal que se ajustó a los datos experimentales, incluyendo los efectos principales y las interacciones combinadas.

El efecto de una variable es estadísticamente significativo cuando el valor “*P*” del coeficiente, obtenido del análisis de varianza ANOVA, es menor que el nivel de significancia ( $\alpha$ ) seleccionado, el cual fue de 0.05.

$$\alpha = 1 - \text{nivel de confianza} \quad (16)$$

El valor *P* se define como la probabilidad de obtener un resultado igual o “mayor” de lo que realmente se ha observado, suponiendo que la hipótesis nula (es decir, la variable probada no es significativa en este estudio) es cierta. Los resultados del análisis de regresión se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4. 2. Resultados del análisis estadístico de las tres variables, juntos con sus interacciones, en la recuperación de agua.

<i>Término</i>	<i>Coficiente</i>	<i>Error coeficiente</i>	<i>P</i>
<i>Constante</i>	43,40	27,30	0,129
<i>Jg</i>	-8,700	18,00	0,633
<i>H Espuma</i>	-15,30	6,320	0,026
<i>Area Efectiva</i>	-0,716	0,390	0,082
<i>Jg * H Espuma</i>	9,130	4,160	0,041
<i>Jg * Area Efectiva</i>	0,266	0,256	0,313
<i>H Espuma * Area Efectiva</i>	0,219	0,090	0,025
<i>Jg * H Espuma * Area Efectiva</i>	-0,139	0,059	0,030

El valor  $P$  relacionado con la velocidad superficial de gas ( $J_g$ ) fue de 0,663, lo cual es relativamente alto, indicando estadísticamente que esta variable, en el rango estudiado, no tiene significancia en el modelo de flujo de agua recuperada en el concentrado.

El  $R^2$  ajustado tiene un valor de 96,64%.

Adicionalmente, en la Tabla 4.2, el signo del coeficiente que contiene a  $J_g$  carece de sentido físico, dado que éste indica que el flujo de agua recuperada en el concentrado aumenta a media que disminuye la velocidad superficial de aire.

El error del coeficiente del término  $J_g$  es más grande que el valor del coeficiente, eso quiere decir, que con los datos que se tienen no se puede distinguir si este valor es estadísticamente significativo, o si es distinto de cero.

La razón por la cual la variable  $J_g$  no es estadísticamente significativa es que la medición de esta variable fue realizada como  $J_g$  en zona de colección en lugar de la variable  $J_g$  en zona de espuma, en el modelo factorial.

Cabe destacar que el efecto de la variable “ $J_g$ ” es importante para el desarrollo del modelo, como quedó en evidencia en el análisis realizado de las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3, pero su mayor relevancia se observa al combinar su efecto con el área efectiva de la celda. Como se mencionó en la sección 3.1, la velocidad superficial de aire es mayor en la zona de espuma dada la disminución de área generada por la posición del ángulo *frothcrowder* (ver Tabla 3.2).

Dado que no hay evidencia estadística para validar el coeficiente del término  $J_g$  en zona de colección, se desarrolla un modelo descartando el efecto de la velocidad superficial de gas.

Junto con lo anterior, se analizaron nuevamente los coeficientes junto con sus respectivos errores, y los valores  $P$  del modelo generado, donde se obtuvo, Tabla 4.3.

Tabla 4. 3. Resultados del análisis estadístico, del efecto de las variables en la recuperación de agua.

<i>Término</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Error coeficiente</i>	<i>P</i>
<i>Constante</i>	30,31	4,320	$0,822 \cdot 10^{-8}$
<i>H Espuma</i>	-12,50	2,520	$0,750 \cdot 10^{-6}$
<i>Area Efectiva</i>	-0,529	0,065	$0,950 \cdot 10^{-9}$
<i>Jg * H Espuma</i>	7,260	1,540	$0,134 \cdot 10^{-5}$
<i>Jg * Area Efectiva</i>	0,142	0,015	$0,550 \cdot 10^{-10}$
<i>H Espuma * Area Efectiva</i>	0,179	0,036	$0,802 \cdot 10^{-6}$
<i>Jg * H Espuma * Area Efectiva</i>	-0,113	0,022	$0,579 \cdot 10^{-6}$

En la Tabla 4.3 se observa que luego de eliminar la variable “J<sub>g</sub>” del modelo empírico, los valores *P* del resto disminuyeron considerablemente, logrando que todos se encuentren bajo el valor de significancia deseado (0,05), por lo cual estos coeficientes son estadísticamente más significativos que los anteriores, y explican mejor la variable dependiente que es el flujo de agua recuperada en el concentrado.

En cuanto al R<sup>2</sup> ajustado, en esta ocasión tomó un valor de 96,77%. Se analiza el R<sup>2</sup> ajustado porque este penaliza por las variables que no son significativas en el modelo. En base a ello, en este caso el R<sup>2</sup> ajustado aumentó levemente y con menos variables el ajuste del modelo mejoró.

Se obtuvo el siguiente modelo lineal a partir del experimento factorial Ec (17).

$$F_{AR} = 30,31 - 12,50H - 0,5299A + 7,26(Jg \cdot H) + 0,1416(Jg \cdot A) + 0,1787(H \cdot A) - 0,1127(Jg \cdot H \cdot A) \quad (17)$$

Donde el flujo de agua recuperada en el concentrado se mide en litros por minuto, la altura de espuma en centímetros, la velocidad superficial de gas en centímetros por segundo y el área efectiva en porcentaje. La Tabla 4.4 presenta el rango de validez del modelo generado.

Tabla 4. 4. Rango de validez del modelo.

<i>Jg [cm/s]</i>	1,2 – 1,8
<i>Altura de espuma [cm]</i>	2 – 6
<i>Área efectiva [%]</i>	65 – 75

Adicionalmente, el modelo desarrollado presentó un coeficiente de determinación de 0,975, como se aprecia en la Figura 4.8.

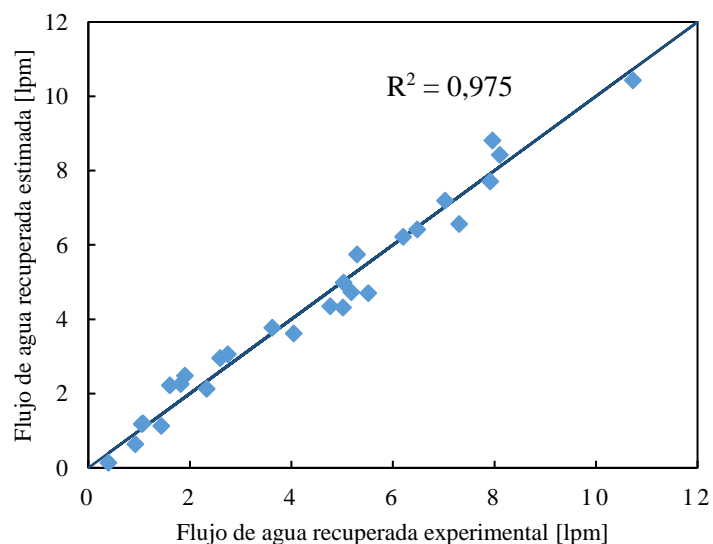


Figura 4. 8. Flujo de agua recuperada estimada del modelo versus la registrada experimentalmente.

En las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se compararon los resultados experimentales con las predicciones del modelo.

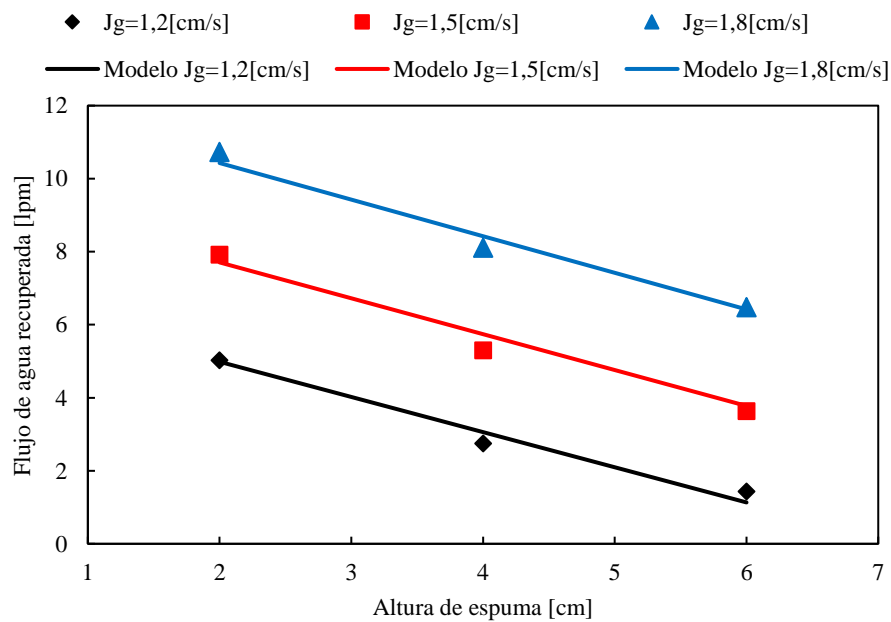


Figura 4. 9. Resultado experimental, área efectiva del 65%.

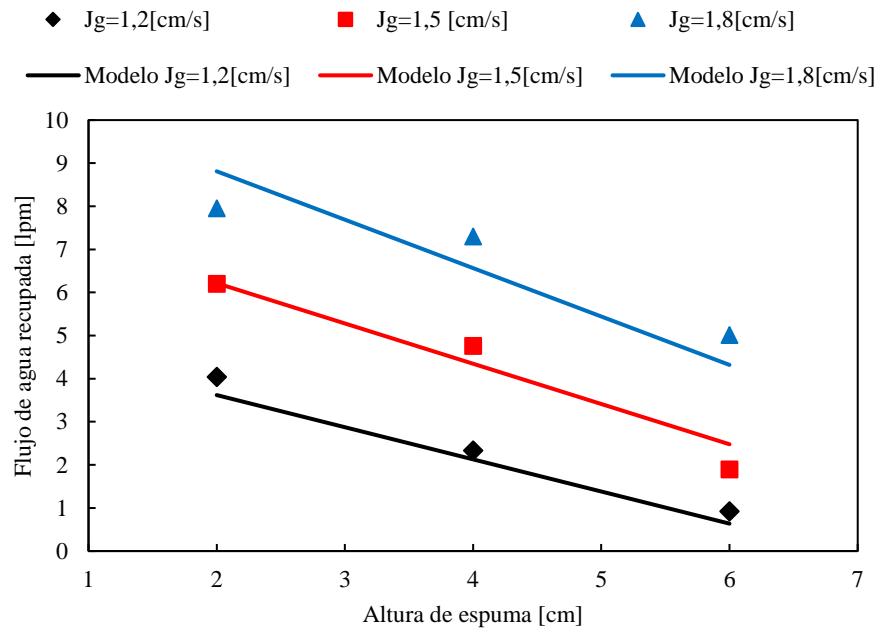


Figura 4. 10. Resultado experimental, área efectiva del 70%.

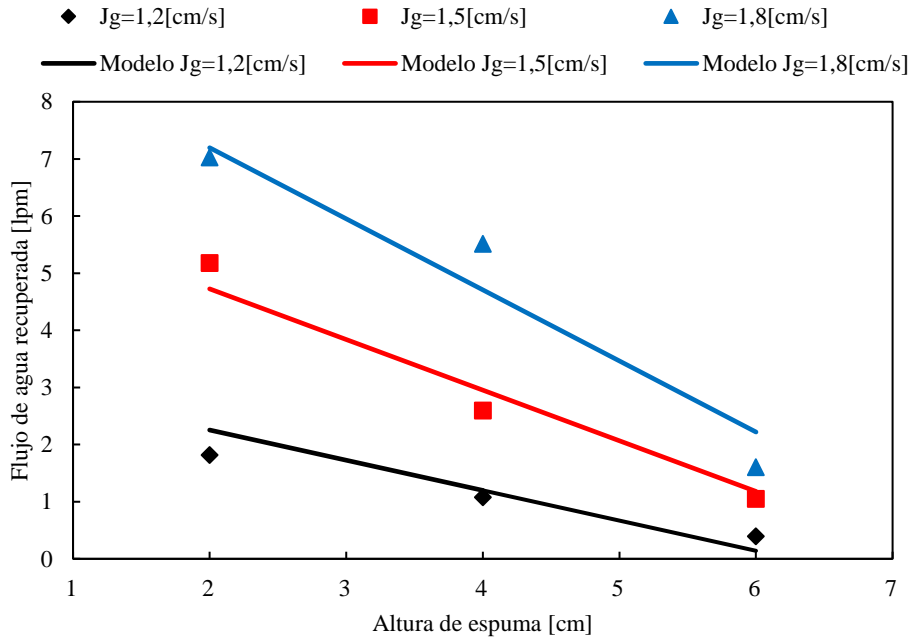


Figura 4. 11. Resultado experimental, área efectiva del 75%.

Adicionalmente, en la sección de Anexos (Anexo D) se presentan los datos experimentales junto con las predicciones del modelo.

En las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se observa que el modelo generado se ajusta razonablemente a los resultados experimentales. Además, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,975. Al comparar este valor, con el obtenido por Wang et al. (2016) en su trabajo, se aprecia que los valores son similares, con un coeficiente de determinación de 0,973. En consecuencia, se concluye que el modelo generado es representativo de los datos experimentales, con un ajuste confiable.

En las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 se presenta un análisis de contorno para cada condición de área efectiva (65, 70 y 75 [%], respectivamente). Se observan los resultados de flujo de agua recuperada estimados por el modelo generado, en el rango estudiado, el cual fue de 2 a 6 [cm] para la altura de espuma, y de 1,2 a 1,8 [cm/s] para la velocidad superficial de gas.

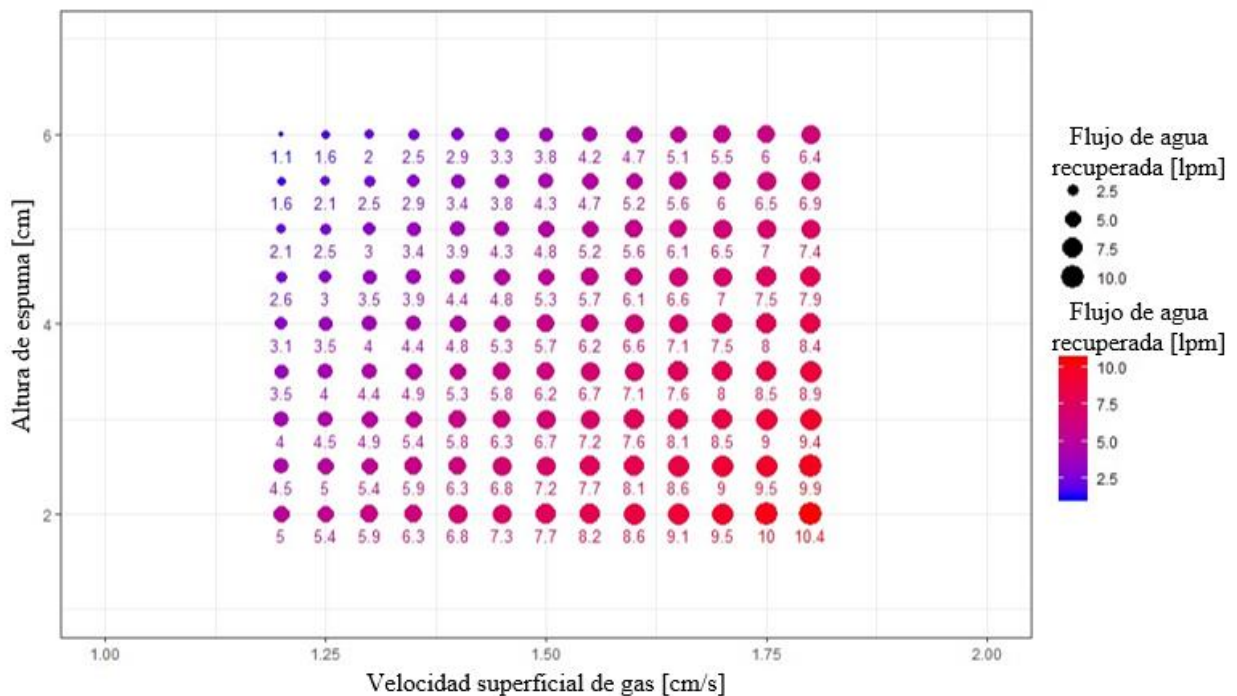


Figura 4. 12. Modelo de flujo de agua recuperada, área efectiva de 65 %.

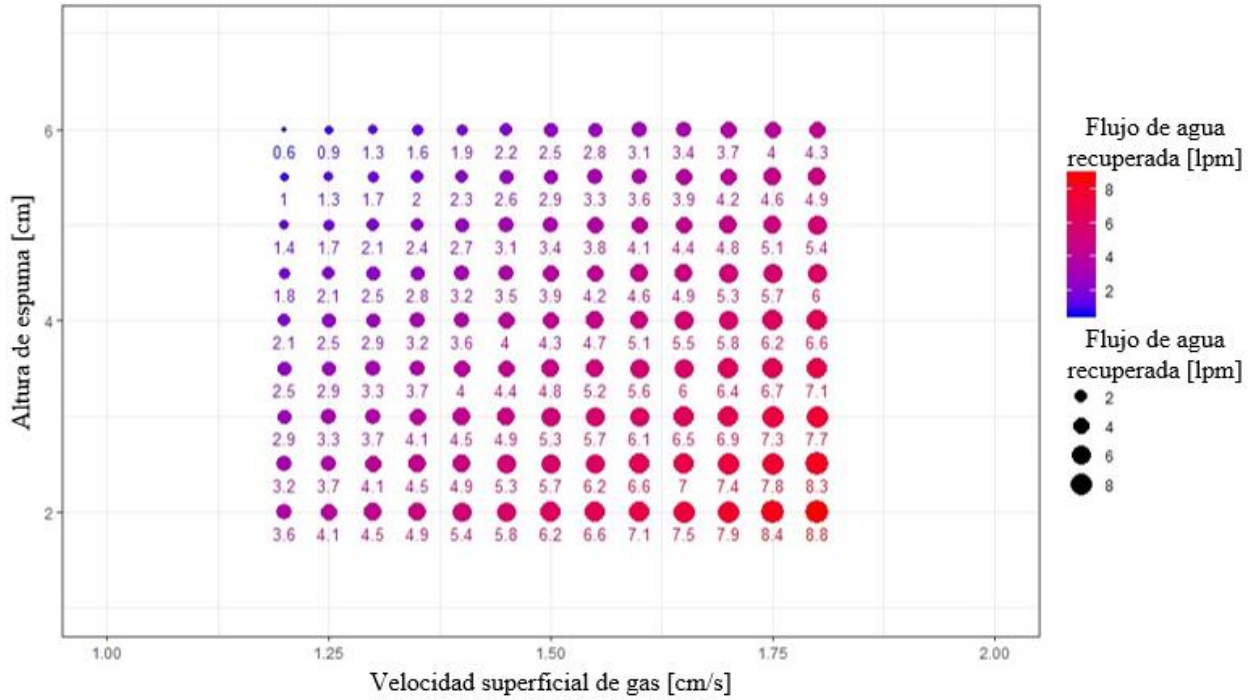


Figura 4. 13. Modelo de flujo de agua recuperada, área efectiva de 70 %.

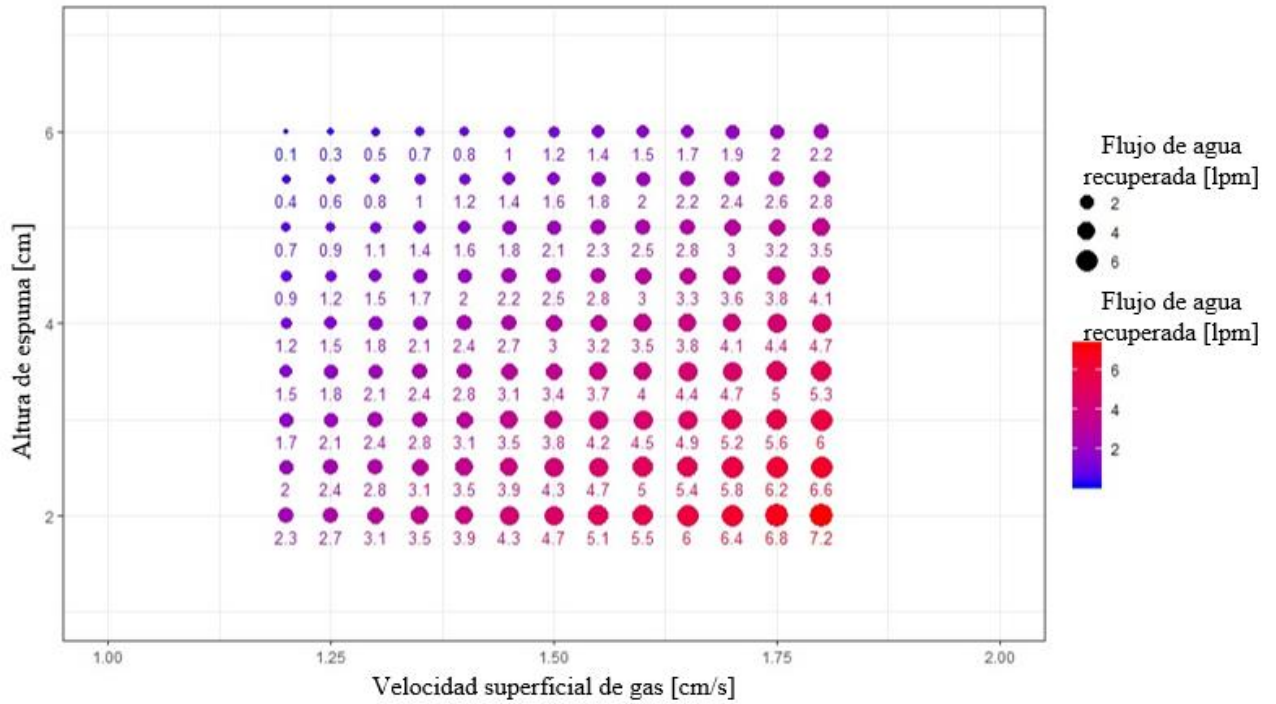


Figura 4. 14. Modelo de flujo de agua recuperada, área efectiva de 75%.

En cada una de las condiciones de área efectiva, se observa que el flujo de agua recuperada aumenta a medida que disminuye la altura de espuma y aumenta la velocidad superficial de gas. La combinación de una baja altura de espuma con un alto valor de “Jg” produce un aumento en el flujo de agua recuperada debido al arrastre de líquido y a un bajo tiempo de residencia de éste en la espuma, lo cual disminuye el drenaje a la zona de colección.

Por otro lado, se aprecia que a medida que disminuye el área efectiva de la celda, aumenta el flujo de agua recuperada. Al disminuir el área efectiva de la celda de flotación, aumenta el “Jg efectivo” en la zona de espuma, lo cual también genera un mayor arrastre de líquido a la zona de espuma, aumentando el flujo de agua. Adicionalmente, la disminución del área efectiva genera un aumento en la velocidad de transporte de espuma, lo cual igualmente repercute en un aumento del flujo de agua recuperada.

### 4.3. Análisis de altura de espuma v/s tasa de colapso

Se evaluó el efecto de la altura de espuma en la tasa de colapso, para las siguientes condiciones de operación.

Tabla 4. 5. Condiciones de operación para análisis de tasa de colapso.

<b>Jg en zona colección</b> [cm/s]	<b>Jg efectivo en zona espuma</b> [cm/s]	<b>Altura Espuma</b> [cm]	<b>Área efectiva</b> [%]	<b>Ángulo Frothcrowder</b> [°]	<b>Tiempo de residencia en la espuma</b> $\tau$ [s]
1,8	2,6	2	70	45	0,77
1,8	2,6	4	70	45	1,54
1,8	2,6	6	70	45	2,31
1,8	2,6	8	70	45	3,08
1,8	2,6	10	70	45	3,85

Las condiciones de velocidad superficial de aire, área efectiva y ángulo *frothcrowder* se mantuvieron constantes, para evaluar el efecto del cambio de altura de espuma en la tasa de colapso. Se utilizó el valor de área efectiva intermedio del diseño factorial realizado, junto con el valor alto de  $J_g$  utilizado. Este último debido a que ésta fue la única condición de velocidad superficial de gas que permitió valores altos de altura de espuma (8 y 10 [cm]).

Se utilizó el sistema *Visiofroth* para medir la tasa de colapso para las distintas condiciones de operación. La Figura 4.15 indica la posición de la cámara para las mediciones realizadas.

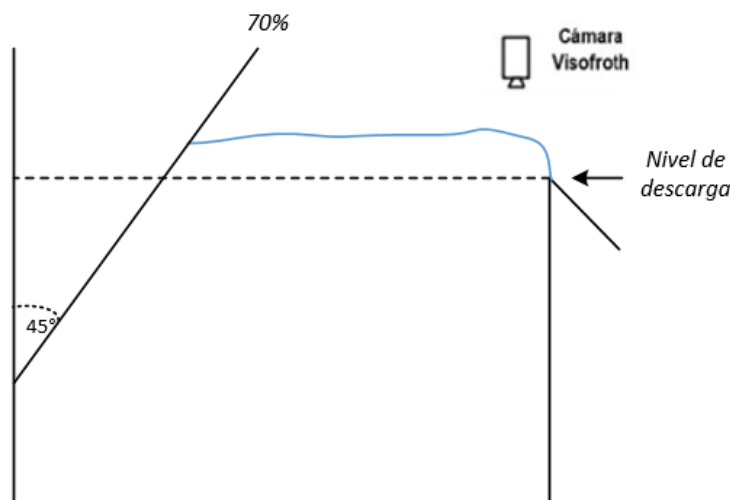


Figura 4. 15. Posición de cámara Visiofroth para las mediciones realizadas.

En la Figura 4.16 se observa que la tasa de colapso media disminuye a medida que aumenta la altura de espuma en la celda de flotación. Sin embargo, al observar con detalle el gráfico, es posible notar que en general no hay diferencias significativas entre los últimos puntos. Este comportamiento de la tasa de colapso difiere del esperado según la teoría, dado que, una mayor altura de espuma genera un mayor drenaje de líquido a la zona de colección, resultando una espuma más seca y por ende aumentado la inestabilidad de ésta.

Los resultados obtenidos se ven afectados por la posición de la cámara *Visiofroth*, dado que, como se mostró en la Figura 4.15, ésta realiza la captura de imágenes en un punto en el cual las burbujas se dirigen aceleradas hacia la descarga, dado que el rebalse es el punto de máxima aceleración.

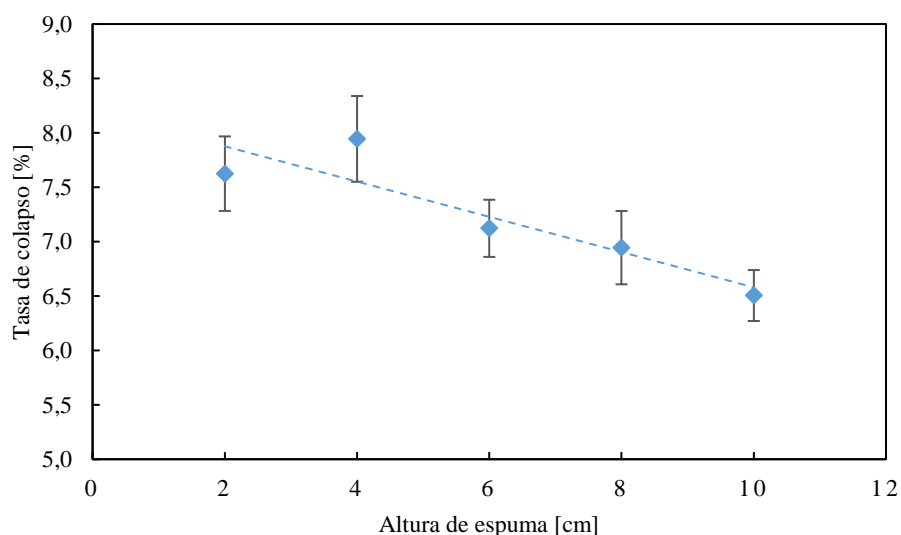


Figura 4. 16. Tasa de colapso vs altura de espuma en la zona de descarga.

Adicionalmente, en la Figura 4.17 se presentan los resultados obtenidos del tamaño de burbuja en el tope de espuma. Todos los experimentos fueron realizados en duplicado. Las barras de error representan la desviación estándar de las mediciones realizadas.

Se observa que el tamaño de burbuja no varía considerablemente a medida que aumenta la altura de espuma, lo cual no concuerda con el comportamiento esperado, ya que a mayor altura de espuma debiese observarse un aumento gradual en el tamaño de burbuja. Pero las burbujas de mayor tamaño no consiguen llegar al rebalse de la celda de flotación debido a

que colapsan antes, por lo cual no logran ser captadas por la cámara *Visiofroth*, dada su ubicación, como se observa la Figura 4.15.

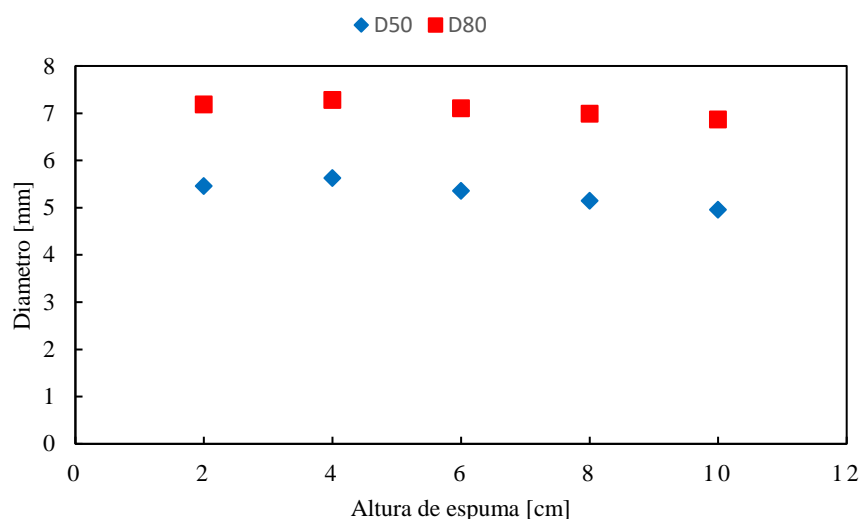


Figura 4. 17. Diámetro de burbuja vs altura de espuma en la zona de descarga.

Adicionalmente, en la Tabla 4.6 se muestran los promedios y las desviaciones de los resultados mostrados en la Figura 4.17.

Tabla 4. 6. Distribución de tamaño de burbuja para los experimentos realizados.

<i>Jg</i> [cm/s]	<i>H espuma</i> [cm]	<i>Area Eff</i> [%]	<i>D50 [mm]</i>		<i>D80 [mm]</i>	
			<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>
1,8	2	70	5,46	0,091	7,19	0,067
1,8	4	70	5,63	0,066	7,28	0,054
1,8	6	70	5,36	0,032	7,10	0,023
1,8	8	70	5,14	0,041	6,99	0,031
1,8	10	70	4,96	0,021	6,87	0,016

En base a lo anterior, se concluye que los resultados obtenidos se ven afectados por la posición de la cámara *Visiofroth*, ya que dada su posición (ver Figura 4.15), realiza la captura de imágenes en un punto en el cual las burbujas se dirigen aceleradas hacia la descarga, lo cual genera que las burbujas posean un tamaño relativamente similar cuando se encuentran cercanas a la descarga.

#### 4.4. Análisis de distancia al rebalse

Se estudió el efecto que tiene la disminución de la distancia máxima de transporte de espuma al rebalse de la celda de flotación en la recuperación de agua. Para ello, se diseñó un prototipo adaptable construido de acrílico, con el cual se disminuye gradualmente la distancia al rebalse. Éste consideró un ángulo *frothcrowder* fijo de 45°, como se muestra en la Figura 4.18. En la Tabla 4.7 se presentan las distancias al rebalse analizadas.

Tabla 4. 7. Distancia al rebalse.

Experimento	Distancia al rebalse [cm]	$\tau$ [s]
<b>A</b>	100	1,90
<b>B</b>	80	1,52
<b>C</b>	60	1,14
<b>D</b>	40	0,76
<b>E(*)</b>	20	-

\* Experimento E no logró ser llevado a cabo bajo las mismas condiciones de operación que los anteriores.

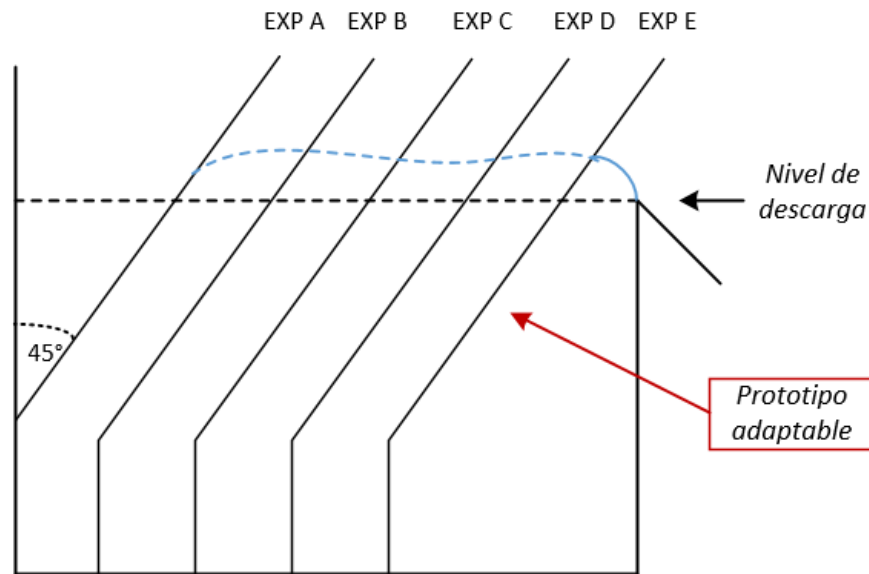


Figura 4. 18. Experimentos para análisis de distancia al rebalse.

Las experiencias se realizaron a velocidad superficial de aire y altura de espuma de 1,5 [cm/s] y 4 [cm], respectivamente. Ambas condiciones de operación fueron seleccionadas debido a

que al realizar un conjunto de pruebas preliminares modificando ambas variables, se observó que esta condición fue la que presentó una mayor estabilidad operacional.

Al realizar el experimento E, no fue posible alcanzar la condición de altura de espuma de 4 [cm], debido a que su corta distancia al rebalse junto con la velocidad superficial de aire seleccionada, generaron una espuma de 10 [cm], además de presentar excesivas turbulencias, impidiendo una clara distinción de la interfase entre la zona de espuma y la zona de colección. Por lo tanto, este experimento no es comparable con los anteriores.

La Figura 4.19 muestra un claro aumento del flujo de agua recuperada al disminuir la distancia al rebalse. A menor distancia al labio de rebalse se genera un mayor efecto de empuje del fluido hacia la descarga, aumentando la velocidad de éste, lo cual genera un aumento en el flujo de agua recuperada. De igual manera, una menor distancia al rebalse disminuye el tiempo medio de residencia del líquido en la zona de espuma, lo cual disminuye el drenaje de ésta hacia la zona de colección, provocando que una mayor cantidad de agua (que ingresa a la espuma) sea recuperada en el concentrado.

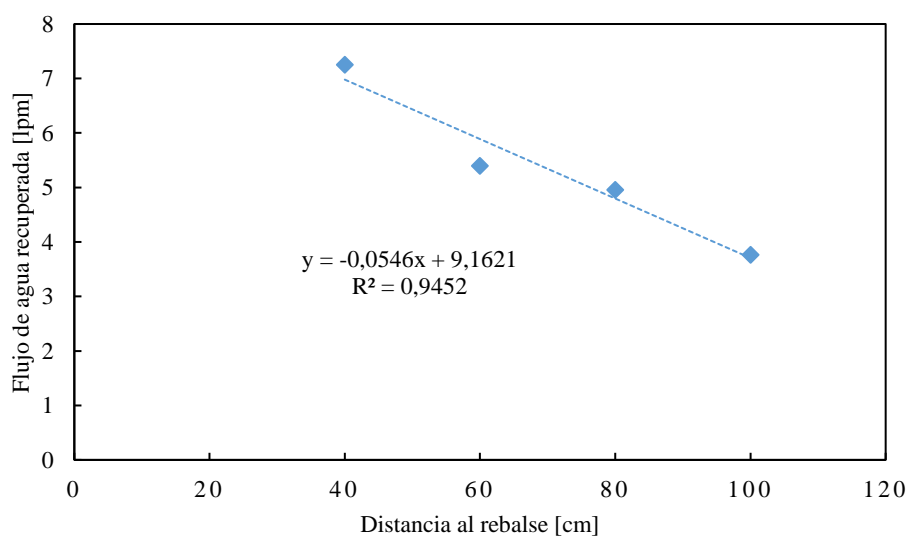


Figura 4. 19. Recuperación de agua vs distancia al rebalse.

Adicionalmente, se observó el comportamiento hidrodinámico en cada experimento, como se detalla a continuación.

### Experimento A (100 [cm])

En los primeros 20 [cm] (desde el fondo hacia el labio de descarga), se apreció una pequeña turbulencia en forma de ola, como se observa en la Figura 4.21, la cual genera una inestabilidad en la zona de espuma. Además, se genera un colapso inmediato de las burbujas existentes en ese sector.

La Figura 4.20 esquematiza el efecto que genera la presencia del ángulo *frothcrowder* en la zona de espuma. Las burbujas que se encuentran presente en la zona delimitada de color naranja, al ascender, se encuentran con el *frothcrowder*, luego de lo cual ascienden de forma diagonal hasta llegar a la superficie de la espuma. Esto genera la turbulencia en forma de ola mencionada anteriormente, como se observa en la Figura 4.21.

Desde los primeros 20 [cm] en adelante (desde el fondo de la celda de flotación), la espuma tiende a estabilizarse. Entre los 20 y los 40 [cm] se pudo observar un estancamiento en la velocidad de transporte de espuma, es decir, las burbujas no mostraron tendencia a desplazarse, solo colapsaban en la superficie. Finalmente, desde los 40 [cm] hasta el labio de rebalse, la altura de espuma es bastante estable, y se apreció un avance hacia la descarga.

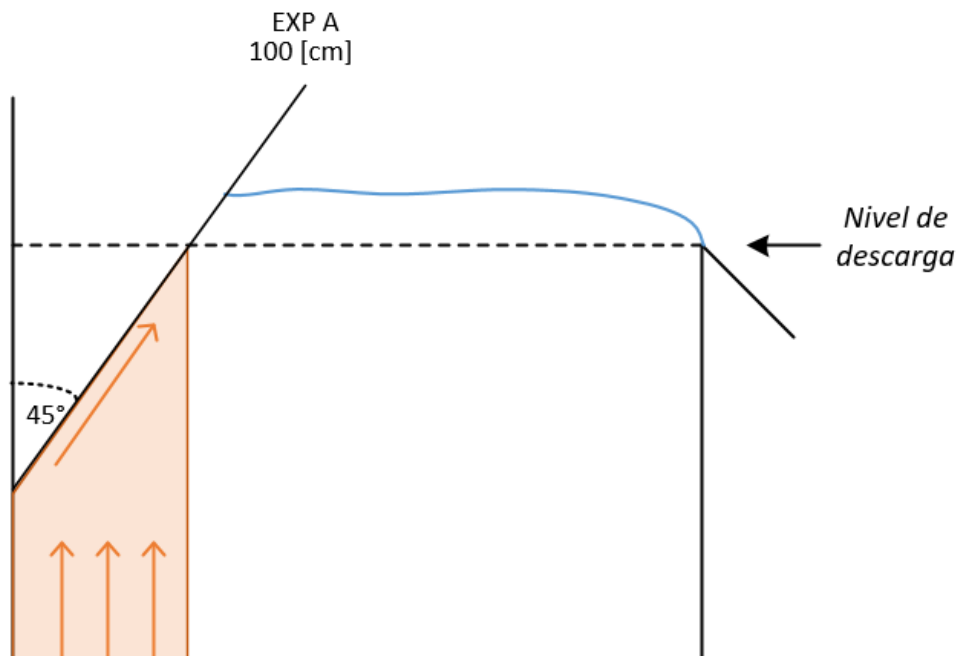


Figura 4. 20. Efecto del ángulo *frothcrowder*.

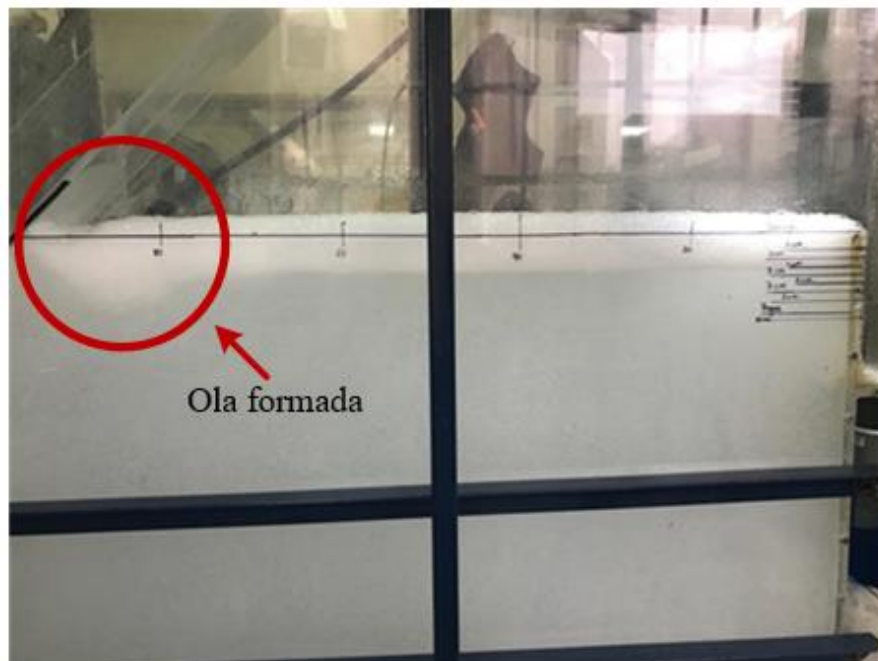


Figura 4. 21. Experimento A (100 [cm]).

### Experimento B (80 [cm])

En los primeros 20 [cm] (desde el fondo hacia el labio de descarga) se apreció una turbulencia en forma de ola (levemente más pronunciada que en el caso anterior), la cual genera una inestabilidad en la zona de espuma, además de generar colapso de burbujas (Figura 4.22). Adicionalmente, se observó una tendencia en las burbujas a retroceder hacia el fondo de la celda, lo cual implica que esta sección de la espuma no aporta en la recuperación.

Desde los 20 a los 40 [cm] se observó un estancamiento en la zona de espuma, y una leve tendencia de retroceso.

Finalmente, desde los 40 [cm] hasta el labio de rebalse, la espuma se estabiliza, y se aprecia una tendencia de avance hacia la descarga.

Además, se apreció una tendencia de recirculación de las burbujas, en la zona de colección, como se esquematiza en la Figura 4.23, lo cual es perjudicial ya que esto implica que una porción de este fluido no va a ser capaz de llegar a la zona de espuma, afectando el proceso de flotación.



Figura 4. 22. Experimento B (80 [cm])

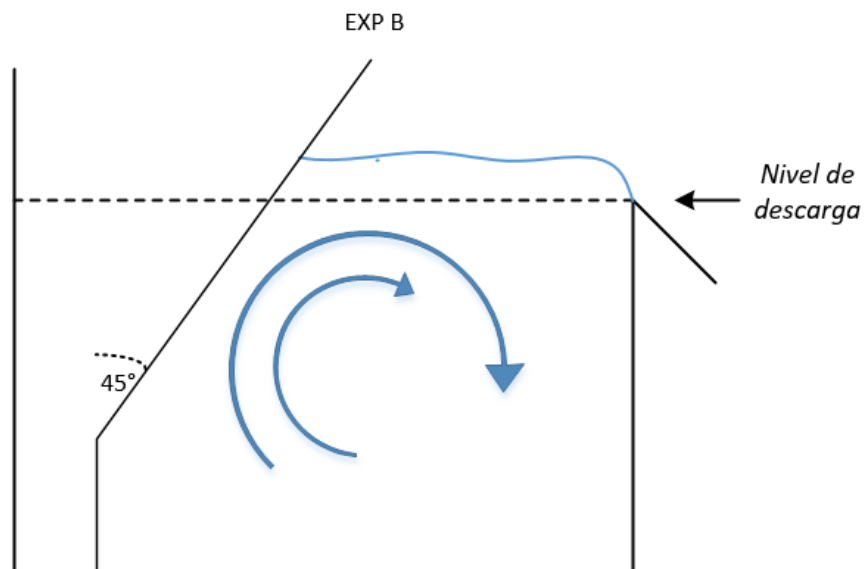


Figura 4. 23. Recirculación de burbujas en zona de colección, experimento B (80 [cm]).

### Experimento C (60 [cm])

En este experimento, la altura de espuma se mantuvo inestable en todo el trayecto. En los primeros 10 [cm] (desde el fondo hacia el labio de descarga) se apreció una turbulencia en forma de ola (muy pronunciada), la cual generó una inestabilidad en la zona de espuma, con ruptura de burbujas, provocando un retorno de líquido hacia la zona de colección (Figura 4.24). Se observó una fuerte tendencia de las burbujas a recircular hacia la parte posterior de la celda (en dirección horizontal).

En los siguientes 10 [cm] se pudo observar un estancamiento en la espuma, y una leve tendencia de retroceso.

Finalmente, desde los 20 [cm] (desde el fondo hasta el labio de rebalse) en adelante, se apreció una tendencia de avance hacia la descarga. Cabe destacar que aún en este trayecto, no se logró estabilizar el colchón de espuma.

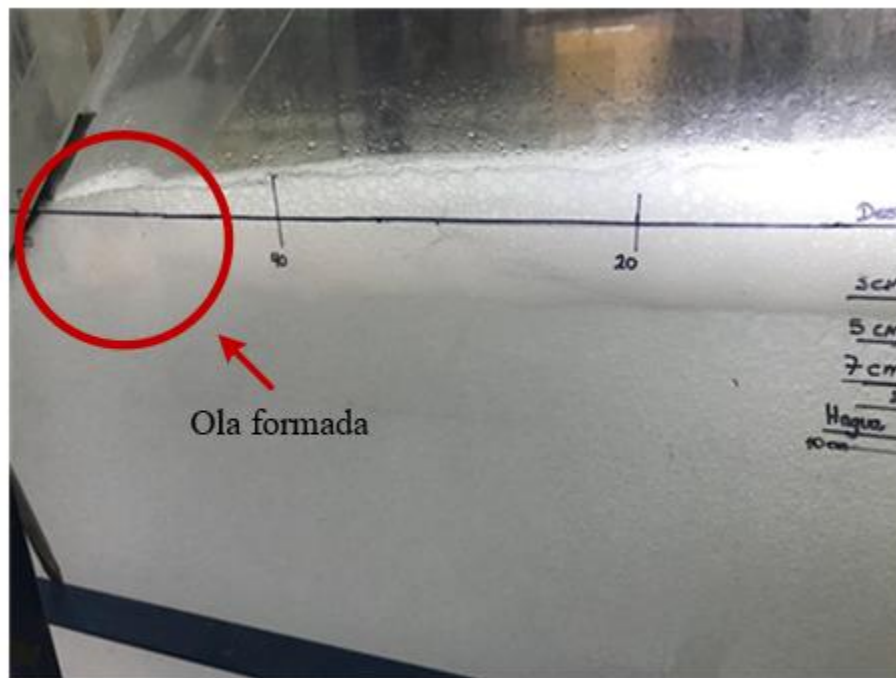


Figura 4. 24. Experimento C (60 [cm]).

Experimento D (40 [cm])

La altura de espuma se mantuvo inestable en todo su trayecto, como se aprecia en la Figura 4.25. En los primeros 20 [cm] (desde el fondo hacia el labio de descarga), se observó una gran turbulencia en forma de ola, la cual generó inestabilidad en la zona de espuma, con ruptura de burbujas, provocando un reciclo de burbujas hacia la zona de colección. Se observó una tendencia en las burbujas a retroceder hacia la parte posterior de la celda (en dirección horizontal).

Desde los 20 [cm] y hasta el labio de rebalse, se apreció una tendencia de avance hacia la descarga.

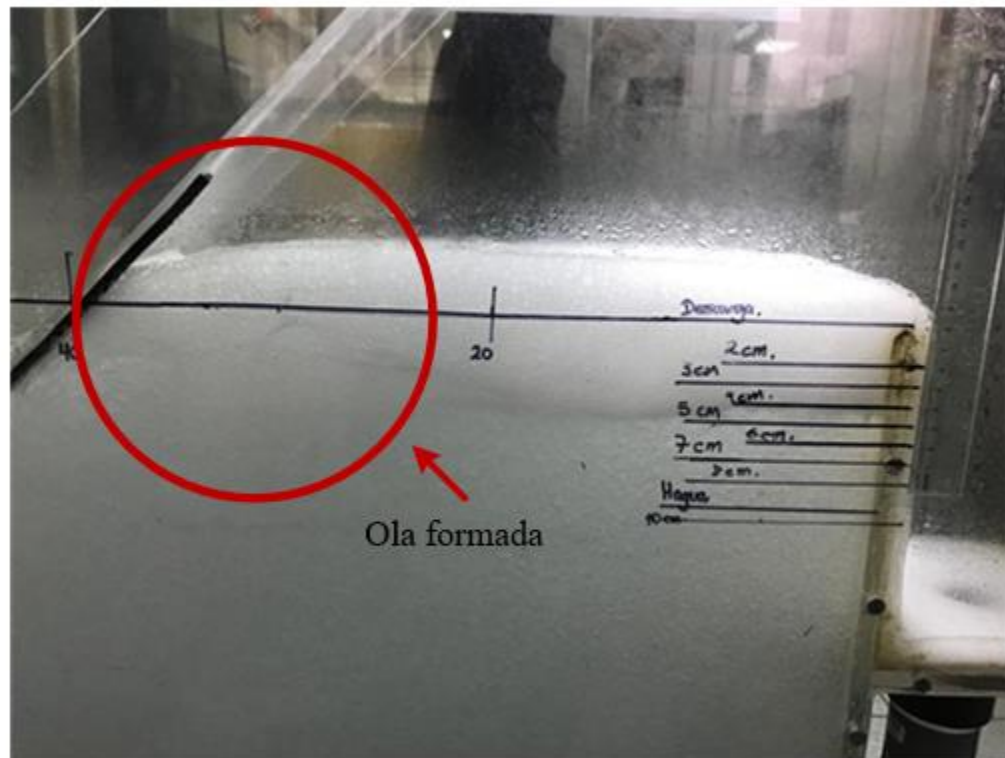


Figura 4. 25. Experimento D (40 [cm]).

### Experimento E (20 [cm])

En este experimento no se logró alcanzar la condición de 4 [cm] de altura de espuma (hasta el rebalse). Dado que la distancia hasta el rebalse era de 20 [cm], no se obtuvo una formación estable de espuma en todo su trayecto. Incluso en algunas partes fue imposible distinguir la interfase entre la zona de espuma y la zona de colección. Se generó una gran turbulencia en forma de ola, la cual generó inestabilidad en la zona de espuma, con alto colapso de burbujas, provocando un retorno hacia la zona de colección. Se apreció una excesiva recirculación de burbujas y turbulencia en la zona de colección.

En esta condición se obtuvo una altura de espuma de 10 [cm] (hasta el rebalse), por lo cual este experimento no es comparable con los anteriores.

Adicionalmente, se observó que al disminuir la distancia al rebalse, para una misma condición de velocidad de aire “ $J_g$ ”, se observó un punto de altura máxima de espuma para cada experimento realizado. En la Figura 4.26, la sección de color azul corresponde a la altura de espuma registrada en cada experimento, la cual se mantuvo constante en 4 [cm]. El punto de altura máxima se generó por sobre la altura controlada en cada experimento (que corresponde a la altura de espuma que existe hasta el labio de descarga), como se aprecia en la Figura 4.26.

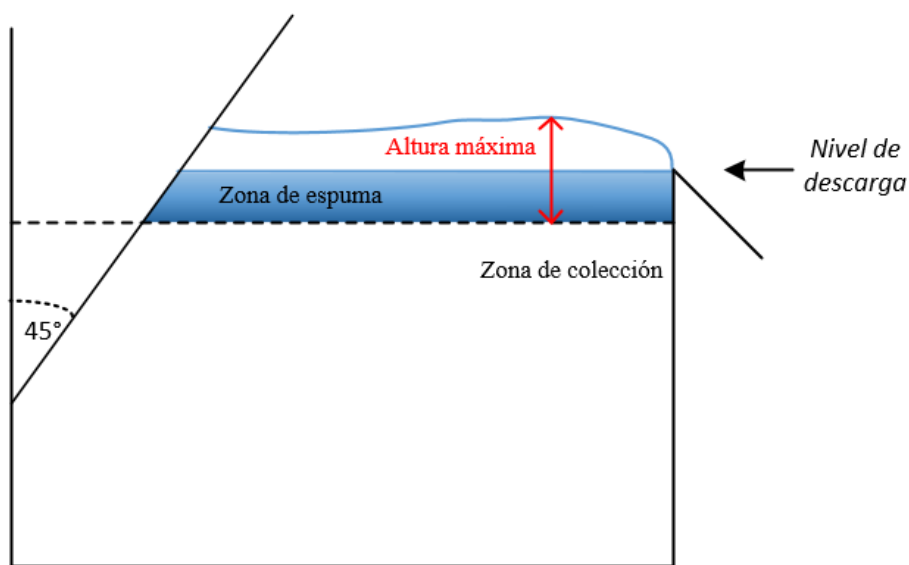


Figura 4. 26. Altura máxima de espuma.

En la Tabla 4.8 se presentan las alturas máximas de espuma para cada experimento realizado.

*Tabla 4. 8. Altura máxima de espuma para cada experimento.*

<b>Experimento</b>	<b>Altura Máxima</b>
<b>A</b>	6,5 [cm]
<b>B</b>	7,0 [cm]
<b>C</b>	7,5 [cm]
<b>D</b>	7,5 [cm]
<b>E</b>	14,5 [cm]

Se observa que el efecto de la distancia al rebalse genera un aumento de la altura máxima de espuma, siendo el experimento “E” (20 [cm]) el cual presentó un mayor impacto en la altura máxima de espuma.

## CAPITULO 5: Conclusiones y recomendaciones

Se desarrolló un modelo empírico para predecir la recuperación de agua en un sistema bifásico (espuma – agua). Los resultados obtenidos mostraron que el flujo de agua recuperada disminuye al aumentar la altura de espuma en una celda de flotación, y aumenta a medida que la velocidad superficial de gas es mayor en una celda de flotación. Además, al disminuir el área efectiva de espuma, aumenta gradualmente la recuperación de agua. En resumen, a mayor velocidad superficial de gas, menor área de transporte de espuma y menor altura de espuma, el flujo de agua recuperada aumenta.

El modelo se generó con el software estadístico Minitab 18 y mostró un buen ajuste a los datos experimentales, con un coeficiente de determinación de 0,975. Sin embargo, es importante destacar que el modelo empírico es válido solo en el rango de mediciones del conjunto de datos realizado.

Se observó que existe una relación entre el flujo de agua recuperada y la velocidad de transporte de espuma. La correlación obtenida fue de tipo potencial, la cual indica que ambas variables aumentarán o disminuirán al modificar alguna de las variables de operación controladas ( $J_g$ ,  $H_f$  y  $A_{eff}$ ), y lo harán en una relación de tipo potencial. Esta correlación presentó un coeficiente de determinación de 0,989.

Adicionalmente, se observó que a medida que aumenta la altura de espuma en una celda de flotación, disminuye la tasa de colapso de las burbujas. Esto no sigue la tendencia esperada teóricamente, ya que una mayor altura de espuma genera un mayor drenaje de líquido a la zona de colección, obteniéndose una espuma más seca, y por ende, aumentado la inestabilidad de ésta. Además, se apreció que el tamaño de burbuja no varía considerablemente a medida que aumenta la altura de espuma, lo cual tampoco concuerda con el comportamiento esperado. Estos resultados se ven afectados por la posición de la cámara *Visiofroth*, dado que ésta realiza la captura de imágenes en un punto en el cual las burbujas se dirigen aceleradas hacia la descarga. Esto genera burbujas de tamaño relativamente similar cuando se encuentran cercanas a la descarga.

Finalmente, al analizar los resultados del efecto que tiene la distancia máxima al rebalse de la celda de flotación en la recuperación de agua, se observó que el flujo de agua recuperada aumenta a medida que disminuye la distancia máxima al rebalse.

Para trabajos futuros, se sugiere realizar experimentos en la celda de flotación bidimensional utilizando valores de velocidad superficial de aire ( $J_g$ ), profundidad de espuma ( $H_f$ ) y porcentaje de área efectiva de la celda ( $A_{eff}$ ) intermedios a los empleados en el presente estudio, para poder evaluar y comprobar el nivel de predicción que posee el modelo desarrollado. Adicionalmente, se recomienda realizar experimentos para estudiar con mayor profundidad el efecto de la distancia máxima al rebalse en la recuperación de agua, probando nuevas configuraciones de las variables de operación. Por ejemplo, se sugiere probar otros valores de  $J_g$ , altura de espuma y área efectiva de transporte de espuma, para realizar las pruebas de distancia máxima al rebalse. Además, se propone probar otras configuraciones de ángulo *frothcrowder*.

Se propone estudiar el efecto de la posición de la cámara *Visiofroth* en los resultados de tasa de colapso, velocidad de transporte de espuma y distribución de tamaño de burbuja.

Finalmente se sugiere modelar el flujo de agua recuperada en el concentrado considerando la velocidad superficial de aire en la zona de espuma como una de las variables operacionales de estudio, dada su relevancia observa en el presente trabajo de memoria.

## Referencias

- Aalborg. (2018). *Operating manual gmf mass flow meter*.
- Alford, R. (1990). An improved model for design of industrial column flotation circuits in sulphide applications. *In Sulphide Deposits-Their Origin and Processing*.
- APRIM. (2019). FLSmidth – Celda de Flotación de 660 m<sup>3</sup> ofrece a la Industria ventajas económicas. Retrieved September 1, 2019, from <http://aprimin.cl/site/asociados/flsmidth-celda-de-flotacion-de-660-metros-cubicos-ofrece-a-la-industria-ventajas-economicas/>
- Finch, J. ., Yianatos, J. ., & Dobby, G. . (1989). Column froths. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 281–305.
- Glencore Company. (2019). Jameson Cell. Retrieved from [https://www.jamesoncell.com/en/downloads/Brochures/brochure\\_es.pdf](https://www.jamesoncell.com/en/downloads/Brochures/brochure_es.pdf)
- Leiva, J. (2011). *Caracterización de la superficie de espumas de flotación industrial*, Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Química. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Valparaíso.
- Mesa, D., & Brito-Parada, P. R. (2019). Scale-up in froth flotation: A state-of-the-art review. *Separation and Purification Technology*, 210(April 2018), 950–962.
- MetsoMinerals. (2006). *Guía de Instalación y del Usuario de OCS VisioFroth*.
- Moys, M. . (1978). A study of a plug flow model for flotation froth behaviour. *International Journal of Mineral Processing*, 21–38.
- Neethling, S. J., Lee, H. T., & Cilliers, J. J. (2003). Simple relationships for predicting the recovery of liquid from flowing foams and froths. *Minerals Engineering*, 16(11), 1123–1130.
- Outotec. (2019). Outotec Tankcell Flotation. Retrieved from <https://www.outotec.com/products/flotation/tankcell/>
- Runge, K., McMaster, J., Wortley, M., La Rosa, D., & Guyot, O. (2007). A correlation

- between Visiofroth measurements and the performance of a flotation cell. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series*, 79–86.
- Savassi, O. N., Alexander, D. J., Franzidis, J. P., & Manlapig, E. V. (1998). An empirical model for entrainment in industrial flotation plants. *Minerals Engineering*, 11(3), 243–256.
- Siemens. (2019). Retrieved from <https://w3.siemens.com/mcms/sensor-systems/es/instrumentacion-de-procesos/medicion-de-presion/sitrans-p-ds-iii/pages/sitrans-p-ds-iii.aspx>
- Uribe, A., Vazquez, D., Perez, R., & Nava, F. (1999). A statistical model for the concentrate water in flotation columns. *Minerals Engineering*, 12(8), 937–948.
- Vinnett, L., Yianatos, J., & Alvarez, M. (2014). Gas dispersion measurements in mechanical flotation cells: Industrial experience in Chilean concentrators. *Minerals Engineering*, 57, 12–15.
- Wang, L., Runge, K., & Peng, Y. (2016). The observed effect of flotation operating conditions and particle properties on water recovery at laboratory scale. *Minerals Engineering*, 94, 83–93.
- Wills, B. (2006). *Mineral Processing Technology* (7a ed.). The University of Queensland.
- Wonderware. (2019). HMI InTouch. Retrieved December 19, 2019, from <https://www.wonderware.es/hmi-scada/intouch/>
- Yianatos, J. Contreras, F. (2010). On the carrying capacity limitation in large flotation cells. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 345–352.
- Yianatos, J.B. Finch, J.A. Laplante, A. (1988). Selectivity in column flotation froths. *International Journal of Mineral Processing*, 23, 279–292.
- Yianatos, J. ., & Vinnett, L. (2015). *Flotación de Minerales: Fundamentos, Tecnología y Aplicación*. Valparaiso: Universidad Tecnica Federico Santa María
- Zheng, X., Franzidis, J. P., & Johnson, N. W. (2006). An evaluation of different models of water recovery in flotation. *Minerals Engineering*, 19(9), 871–882.

## Anexos

### Anexo A: Especificaciones técnicas de medidor de flujo másico Aalborg

- **MEDIDOR DE FLUJO:** Tenga en cuenta que los medidores de flujo másico GFM17 / 37/47/57/67/77 están diseñados para trabajar solo con gases limpios. Nunca intente medir o controlar los caudales de líquidos con ningún GFM.
- **CALIBRACIONES:** Realizado en condiciones estándar [14.7 [psia] (1.01 [bar]) y 70 F (21.1 °C)] a menos que se solicite o se indique lo contrario.
- **MEDIO AMBIENTE (según IEC 664):** Nivel de instalación II; Grado de contaminación II.
- **PRECISIÓN:**
  - GFM 17, 37, 47 ± 1.0 [%] F.S.
  - GFM 57, 67, 77 ± 1.5 [%] F.S.
- **REPETIBILIDAD:** ± 0.25% de la escala completa.
- **COEFICIENTE DE TEMPERATURA:** 0.15% de escala completa / °C.
- **COEFICIENTE DE PRESIÓN:** 0.01% de la escala completa/psi (0.07 bar).
- **TIEMPO DE RESPUESTA:** Constante de tiempo de 800 [ms]; aproximadamente 2 segundos dentro de ± 2 [%] del conjunto caudal del 25 [%] al 100 [%] del caudal a escala completa.
- **PRESIÓN DE GAS:** 1000 psig (69 [bar]) GFM 17, 37 y 47; 500 [psig] (34.5 [bar]) GFM 57, 67 y 77. La presión óptima es de 20 [psig] (1,4 [bar]).
- **GAS Y TEMPERATURA AMBIENTE:**
  - 32 F a 122 F (0 °C a 50 °C).
  - 14 F a 122 F (-10 °C a 50 °C) - Gases secos
- **HUMEDAD RELATIVA DEL GAS:** hasta 70[%].
- **INTEGRIDAD DE FUGAS:** 1 x 10<sup>-9</sup> scs He max. al ambiente exterior.
- **SENSIBILIDAD DE LA ACTITUD:** Desviación incremental de hasta 1[%] de la escala completa de la precisión establecida, después de volver a cero.

- **SEÑALES DE SALIDA:** Lineal 0-5 VDC (impedancia de carga mínima de 1000  $\Omega$ ) y 4-20 [mA] tipo de fuente autoalimentado, no aislado (resistencia de 0-500 bucle  $\Omega$ ).

Póngase en contacto con su distribuidor o con Aalborg® para obtener interfaces RS232 o RS-485 opcionales.

- **POTENCIA DE ENTRADA DEL TRANSDUCTOR:**
  - Modelos GFM con entrada de alimentación de 12 VDC (números de serie inferiores a 340621-1): 12 VDC, 200 [mA] máximo;
  - Modelos GFM con entrada de alimentación de 24 VDC (números de serie inferiores a 340621-1): +24 VDC, 200 [mA] máximo;
  - Modelos GFM con entrada de alimentación universal (números de serie superiores a 340621-1): Cualquier voltaje entre +12 y +26 VDC, 200 [mA] máximo;

## Anexo B: Curva de calibración de bombas peristálticas

Las curvas de calibración de ambas bombas peristálticas Masterflex, modelo B-0105, fueron determinadas por la medición del flujo de agua impulsado por cada una de ellas, con la técnica de aforo volumétrico. Se midió el volumen descargado a una probeta de 2 [L] durante un lapso de tiempo medido a través de un cronómetro digital.

La contrastación de cada bomba se realizó en duplicado.

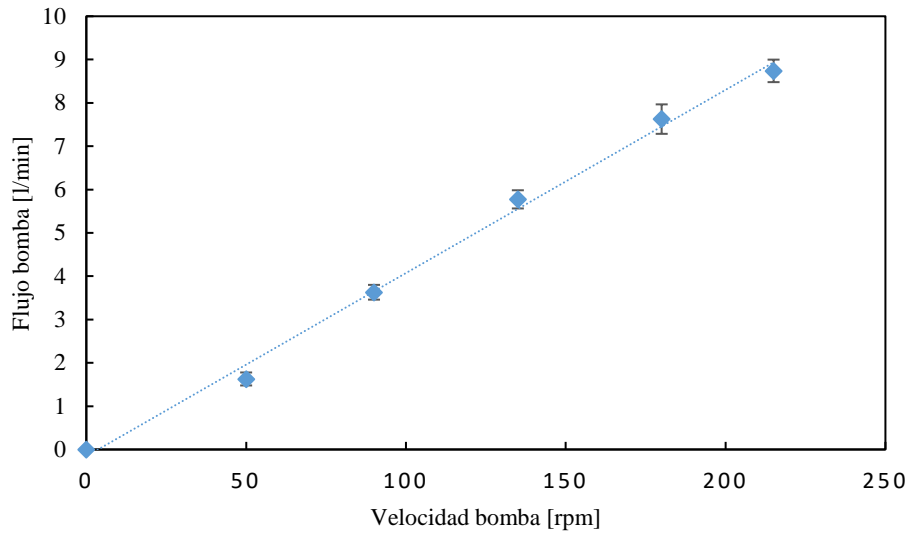


Figura B. 1. Contrastación bomba peristáltica 1.

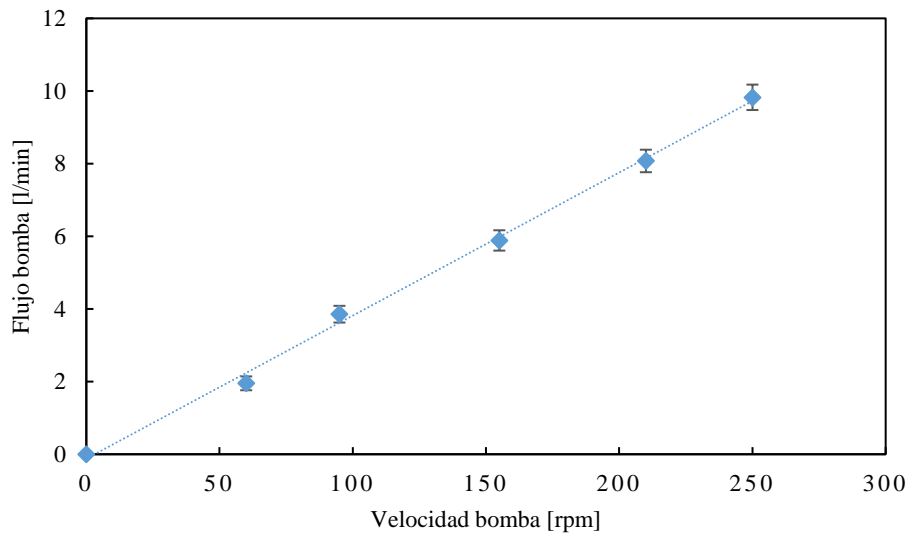


Figura B. 2. Contrastación bomba peristáltica 2.

## Anexo C: Resultados Experimentales

Se presentan las Tablas C.1, C.2 y C.3, en las cuales se entregan todos los datos obtenidos en los experimentos realizados en este trabajo.

La recuperación de agua fue registrada en forma manual, mediante la técnica de aforo másico, realizando un total de 10 mediciones por cada experimento.

La concentración de gas se registró con un sensor de diferencia de presión (Siemens, 2019), en donde se realizaron 10 registros para cada experimento.

La velocidad de transporte de espuma, tasa de colapso, D50 y D80 se registró utilizando la cámara *Visiofroth*, la cual realiza el registro de resultados cada 15 [seg] durante el tiempo de medición de cada experimento. La información registrada por el sistema *Visiofroth* corresponde al comportamiento de las burbujas en el tope de espuma.

Cada experimento fue realizado en duplicado.

Tabla C. 1. Resultados experimentales de flujo de agua recuperada y concentración de gas.

<i>Exp</i>	<i>Jg</i> [cm/s]	<i>H</i> <i>espuma</i> [cm]	<i>Area</i> <i>Eff</i> [%]	<i>Rec Agua [LPM]</i>		<i>Concentración de gas [%]</i>	
				<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>
1	1,2	2	65	5,03	0,041	10,38	0,074
2	1,2	2	70	4,04	0,012	10,38	0,078
3	1,2	2	75	1,82	0,065	10,38	0,092
4	1,5	2	65	7,91	0,038	11,56	0,088
5	1,5	2	70	6,20	0,041	11,64	0,090
6	1,5	2	75	5,18	0,026	11,57	0,075
7	1,8	2	65	10,73	0,043	12,77	0,086
8	1,8	2	70	7,96	0,072	12,76	0,080
9	1,8	2	75	7,03	0,033	12,43	0,083
10	1,2	4	65	2,75	0,057	10,31	0,075
11	1,2	4	70	2,33	0,039	10,30	0,066
12	1,2	4	75	1,08	0,022	10,46	0,046
13	1,5	4	65	5,29	0,045	11,54	0,087
14	1,5	4	70	4,76	0,022	11,54	0,075
15	1,5	4	75	2,59	0,032	11,58	0,075
16	1,8	4	65	8,11	0,033	12,71	0,077
17	1,8	4	70	7,30	0,040	12,72	0,080
18	1,8	4	75	5,51	0,041	12,85	0,073
19	1,2	6	65	1,43	0,011	10,35	0,091
20	1,2	6	70	0,92	0,026	10,33	0,068
21	1,2	6	75	0,40	0,015	10,69	0,059
22	1,5	6	65	3,62	0,031	11,58	0,072
23	1,5	6	70	1,90	0,017	11,54	0,078
24	1,5	6	75	1,05	0,0064	11,77	0,091
25	1,8	6	65	6,48	0,034	12,83	0,069
26	1,8	6	70	5,02	0,030	12,84	0,090
27	1,8	6	75	1,61	0,023	12,75	0,082

Tabla C. 2. Resultados experimentales de velocidad de transporte de espuma y D50.

<i>Exp</i>	<i>Jg</i> [cm/s]	<i>H</i> <i>espuma</i> [cm]	<i>Area</i> <i>Eff</i> [%]	<i>Veloc transporte</i> <i>espuma</i> [cm/s]		<i>D50</i> [mm]	
				<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>
1	1,2	2	65	5,13	0,29	5,70	0,083
2	1,2	2	70	4,56	0,37	5,63	0,079
3	1,2	2	75	2,11	0,17	5,28	0,079
4	1,5	2	65	6,95	0,24	5,63	0,083
5	1,5	2	70	5,87	0,41	5,52	0,034
6	1,5	2	75	5,22	0,41	5,36	0,099
7	1,8	2	65	8,72	0,29	5,33	0,045
8	1,8	2	70	7,07	0,42	5,46	0,091
9	1,8	2	75	6,43	0,48	5,67	0,153
10	1,2	4	65	3,70	0,28	5,37	0,12
11	1,2	4	70	3,03	0,23	5,45	0,071
12	1,2	4	75	1,64	0,13	5,29	0,055
13	1,5	4	65	5,60	0,34	5,46	0,086
14	1,5	4	70	4,96	0,27	5,36	0,037
15	1,5	4	75	3,20	0,28	5,53	0,11
16	1,8	4	65	7,57	0,33	5,57	0,087
17	1,8	4	70	6,56	0,35	5,63	0,066
18	1,8	4	75	5,44	0,32	5,34	0,028
19	1,2	6	65	1,87	0,12	5,25	0,079
20	1,2	6	70	1,25	0,096	5,24	0,032
21	1,2	6	75	0,82	0,075	5,34	0,069
22	1,5	6	65	4,25	0,36	5,27	0,068
23	1,5	6	70	2,16	0,18	5,22	0,023
24	1,5	6	75	1,63	0,12	5,13	0,041
25	1,8	6	65	6,04	0,31	5,38	0,088
26	1,8	6	70	5,62	0,28	5,36	0,032
27	1,8	6	75	2,08	0,10	5,12	0,025

Tabla C. 3. Resultados experimentales de D80 y tasa de colapso.

<i>Exp</i>	<i>Jg</i> [cm/s]	<i>H</i> <i>espuma</i> [cm]	<i>Area</i> <i>Eff</i> [%]	<i>D80 [mm]</i>		<i>Tasa de colapso [%]</i>	
				<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>
1	1,2	2	65	7,37	0,088	8,45	0,53
2	1,2	2	70	7,33	0,10	8,24	0,42
3	1,2	2	75	7,23	0,065	7,83	0,30
4	1,5	2	65	7,32	0,074	8,20	0,40
5	1,5	2	70	7,22	0,029	7,70	0,29
6	1,5	2	75	7,11	0,072	7,15	0,33
7	1,8	2	65	7,08	0,035	7,14	0,31
8	1,8	2	70	7,19	0,067	7,62	0,34
9	1,8	2	75	7,35	0,111	7,20	0,22
10	1,2	4	65	7,12	0,090	7,56	0,55
11	1,2	4	70	7,19	0,056	7,20	0,35
12	1,2	4	75	7,17	0,036	7,20	0,28
13	1,5	4	65	7,18	0,068	7,47	0,45
14	1,5	4	70	7,11	0,032	7,13	0,32
15	1,5	4	75	7,25	0,093	7,88	0,35
16	1,8	4	65	7,24	0,076	7,77	0,15
17	1,8	4	70	7,28	0,054	6,86	0,39
18	1,8	4	75	7,08	0,021	7,75	0,26
19	1,2	6	65	7,05	0,056	6,86	0,31
20	1,2	6	70	7,03	0,021	6,81	0,25
21	1,2	6	75	7,10	0,049	7,16	0,37
22	1,5	6	65	7,04	0,050	6,81	0,32
23	1,5	6	70	7,01	0,016	6,68	0,25
24	1,5	6	75	6,97	0,040	6,55	0,29
25	1,8	6	65	7,11	0,069	7,08	0,44
26	1,8	6	70	7,10	0,023	7,12	0,26
27	1,8	6	75	6,96	0,023	6,49	0,27

## Anexo D: Comparación de Resultados Experimentales vs Predicción del Modelo

Tabla D. 1. Resultados experimentales y predicción de modelo.

<i>Exp</i>	<i>Jg</i> [cm/s]	<i>H espuma</i> [cm]	<i>Area</i> <i>Eff</i> [%]	<i>Rec Agua</i> <i>Exp</i> [lpm]	<i>Rec Agua Exp</i> <i>Desviación</i>	<i>Rec Agua</i> <i>Modelo</i> [lpm]
1	1,2	2	65	5,03	0,041	4,99
2	1,2	2	70	4,04	0,012	3,62
3	1,2	2	75	1,82	0,065	2,25
4	1,5	2	65	7,91	0,038	7,71
5	1,5	2	70	6,20	0,041	6,22
6	1,5	2	75	5,18	0,026	4,73
7	1,8	2	65	10,73	0,043	10,43
8	1,8	2	70	7,96	0,072	8,81
9	1,8	2	75	7,03	0,033	7,20
10	1,2	4	65	2,75	0,057	3,06
11	1,2	4	70	2,33	0,039	2,13
12	1,2	4	75	1,08	0,022	1,20
13	1,5	4	65	5,29	0,045	5,74
14	1,5	4	70	4,76	0,022	4,35
15	1,5	4	75	2,59	0,032	2,95
16	1,8	4	65	8,11	0,033	8,42
17	1,8	4	70	7,30	0,040	6,57
18	1,8	4	75	5,51	0,041	4,71
19	1,2	6	65	1,43	0,011	1,13
20	1,2	6	70	0,92	0,026	0,64
21	1,2	6	75	0,40	0,015	0,14
22	1,5	6	65	3,62	0,031	3,78
23	1,5	6	70	1,90	0,017	2,48
24	1,5	6	75	1,05	0,0064	1,18
25	1,8	6	65	6,48	0,034	6,42
26	1,8	6	70	5,02	0,030	4,32
27	1,8	6	75	1,61	0,023	2,22