



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

EVALUACIÓN E IMPACTO DE LA DISPERSIÓN DE GAS EN EL TRANSPORTE DE REACTIVO EN CONDICIONES CERCANAS A LAS DE UN PROCESO DE FLOTACIÓN COLUMNAR DE MINERALES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

ANDRÉS FELIPE VELASCO AGUIRRE

PROFESOR GUÍA

GONZALO MONTES ATENAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

ÁLVARO VIDELA LEIVA

ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Andrés Felipe Velasco Aguirre
FECHA: 18/10/2017
PROFESOR GUÍA: Gonzalo Montes Atenas

Evaluación e impacto de la dispersión de gas en el transporte de reactivo en condiciones cercanas a las de un proceso de flotación columnar de minerales

La flotación de minerales es un proceso industrial ampliamente utilizado en minería, para separar selectivamente material valioso desde una roca original, utilizando propiedades superficiales relacionadas con la hidrofobicidad/hidrofilicidad que todos los minerales poseen. El proceso utiliza burbujas de gas, que atraviesan una fase pulpa (agua y partículas suspendidas de la roca inicial), para colectar material previamente hidrofobizado. En términos netos, las burbujas, principalmente gobernadas por fuerzas de empuje, se mueven verticalmente hacia arriba mientras que el líquido (pulpa) se mueve verticalmente hacia abajo. Estudios indican que la distribución y el movimiento de las burbujas en columnas no es homogéneo. Consecuentemente, se puede hipotetizar que el movimiento de las burbujas en celdas de flotación de tipo columnar está asociado a patrones de flujo que impactan el transporte de líquido, y con esto, la transferencia de reactivos.

El objetivo de este trabajo es estudiar cómo dicho movimiento conjunto de líquido y gas afecta el transporte de reactivo superficialmente y no superficialmente activo a través de un flujo de burbujas. Simultáneamente se presentan variantes en la metodología de medición de la velocidad superficial de gas para obtener un parámetro de caracterización de gas en celdas de flotación columnar más robusto y de mayor significado físico.

La metodología experimental de trabajo involucra el estudio del transporte radial de reactivo en un sistema de laboratorio 2-D mientras que la dispersión de gas y el transporte axial de reactivo se evalúa en una columna piloto de flotación.

Estudios de laboratorio en el sistema 2-D indicaron que la resistividad aparente al transporte de los reactivos utilizados (Espumante Aerofroth 70 Plus y Sulfato pentahidratado de cobre) fue menor en el uso del reactivo no superficialmente activo (Sulfato de cobre) y que esta disminuyó en presencia de un flujo de burbujas.

Condición	Espumante			Sulfato		
	R_{ap} [$\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}$]	Error	R^2	R_{ap} [$\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}$]	Error	R^2
Sin aire ($Q_g = 0$)	15	± 4.7%	0.9	0.6	± 7.2%	0.9
Con aire ($J_g = 0.46 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$)	3.5	± 6.2%	0.6	0.3	± 7.5%	0.8

De lo anterior se concluye que la metodología y el punto de incorporación de reactivos son clave para el correcto funcionamiento de una operación de flotación. En el sistema 3-D se confirma que el diámetro del tubo muestreador es relevante para obtener resultados representativos de la velocidad superficial de gas en una celda columnar. Un modelo matemático del tipo exponencial para estimar este valor a partir de un tubo muestreador de diámetro arbitrario fue obtenido. Finalmente los resultados del transporte de reactivo axial indican que es posible dispersar un reactivo con una tendencia cercana a la homogeneización a lo largo de todo el eje axial, comportamiento que es esperable en una columna de flotación a escala industrial.

**SUMMARY OF THE THESIS TO OBTAIN THE
TITLE OF: Civil Mining Engineer
AUTHOR: Andrés Felipe Velasco Aguirre
DATE: 18/10/2017
MAIN ADVISOR: Gonzalo Montes Atenas**

Assessment and effect of gas dispersion on the mass transport of reagents in conditions similar to ore column flotation process

Mineral flotation is an industrial process widely used in mining to selectively separate valuable material from an original rock, using surface properties related to the hydrophobicity/hydrophilicity that all minerals exhibit. The process uses gas bubbles which pass through a pulp phase (water and particles suspended from the initial rock), to collect previously hydrophobized material. In net terms, the bubbles, mainly governed by buoyant forces, move vertically upwards while the liquid (pulp phase) moves vertically downwards. Studies indicate that the distribution and movement of gas bubbles in columns is not homogeneous. Consequently, it can be hypothesized that the movement of the bubbles in columnar-type flotation cells is associated with flow patterns impacting the liquid transport, and hence the transfer of reagents.

This work aims at studying how such joint movement of liquid and gas affects the transport of reagent superficially and not superficially active through a flow of bubbles. Simultaneously, variants are presented in the gas surface velocity measurement methodology to obtain a gas dispersion evaluation parameter in columnar flotation cells more robust with greater physical significance.

The experimental work methodology involves the study of the radial transport of reagent in a 2-D laboratory system while the gas dispersion and the axial transport of reagent is evaluated in a pilot flotation column.

Laboratory studies in the 2-D system indicated that the apparent resistivity to the transport of the reagents used (Aerofroth 70 Plus frother and copper sulphate pentahydrate) was lower in the use of the non-surface active reagent (copper sulphate) and that it decreased in the presence of a flow of bubbles.

Condition	Frother			Copper sulphate		
	R_{ap} [$\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}$]	Error	R^2	R_{ap} [$\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}$]	Error	R^2
No air ($Q_g = 0$)	15	\pm 4.7%	0.9	0.6	\pm 7.2%	0.9
With air ($J_g = 0.46 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$)	3.5	\pm 6.2%	0.6	0.3	\pm 7.5%	0.8

From the above it is concluded that the methodology and the point of incorporation of reagents are key for the correct operation of a flotation operation. In the 3-D system it is confirmed that the diameter of the sampling tube is relevant to obtain representative results of the gas surface velocity in a columnar cell. A mathematical model of the exponential type to estimate this value from a sampling tube of arbitrary diameter was obtained. Finally the results of the axial transport of reagent indicate that it is possible to disperse a reagent with a tendency towards homogenization along the entire axial axis, a behavior that is expected in an industrial scale flotation column.

Dedicatoria

A mis seres más queridos
Érika, Rodolfo y Carolina

Agradecimientos

Primero que todo quisiera agradecerles a,

Mis padres, Érika y Rodolfo,

Quienes han sido un apoyo incondicional en mi vida y me han enseñado que siempre se debe hacer frente a los desafíos que impone la vida por muy difíciles que sean. Estaré por siempre agradecido con ustedes por haberme dado la oportunidad de estudiar esta carrera universitaria y haberme apoyado hasta el final de esta gran etapa.

A mi hermana Carolina, por toda su preocupación dedicada durante estos años de estudio.

Quiero agradecerles a mis amigos y compañeros, Sergio Moraga G., Nicolás Salas V., Esteban Garrido A., Braulio Fernández C., Rodrigo Ladrón de Guevara M., Carlos González C., Anton Svensson G., Isaac Navia M., y Carlos Cárdenas B., quienes me ayudaron en momentos difíciles, ya sea durante mi paso por la carrera o en este proceso de titulación.

Quisiera agradecer a la sra. Emma Fonseca P., quien siempre estuvo dispuesta a ayudarme durante las actividades realizadas en el laboratorio. El trabajo se hizo mucho más ameno gracias a su ayuda.

Agradezco al profesor Gonzalo Montes por depositar su confianza en mí para el desarrollo de este trabajo así como a los profesores Álvaro Valencia y Álvaro Videla por ser parte de la comisión.

Finalmente quisiera agradecerles a mis dos grandes amigos,

Hernán Nilo Vásquez, por ser mi mejor amigo y compañero. Te agradezco mucho por todas esas tardes de estudio, las veces que compartimos y por sobre todo, las veces que me ayudaste cada vez que lo necesité. Todo lo que me has enseñado durante estos años son lecciones de vida que jamás voy a olvidar.

Sebastián Tello Crino, por ser un gran amigo y un apoyo fundamental. Siempre fuiste una persona honesta, humilde y por sobre todo un amigo leal, razón por la cual te doy las gracias.

Aquellas buenas experiencias y gratos momentos que compartimos juntos quedarán por siempre en mis recuerdos. ¡A ambos les deseo éxito y lo mejor!

¡Muchas gracias a todos!

Se despide atentamente,

Andrés Velasco Aguirre

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Alcances	2
2	Revisión bibliográfica	3
2.1	Flotación de minerales.....	3
2.2	Principios de flotación.....	3
2.3	Diseño de la celda columnar.....	5
2.4	Operación de una celda columnar.....	6
2.5	VARIABLES RELATIVAS A LA DISPERSIÓN DE GAS	7
2.5.1	Velocidad superficial de gas (J_g).....	7
2.5.2	Diámetro de Sauter de burbujas (d_{32}).....	8
2.5.3	Velocidad superficial de área de burbuja (S_b).....	11
2.6	Velocidad de las burbujas en un flujo de dos fases.....	12
2.7	Distribución de gas.....	14
2.7.1	Régimen de flujo en celdas columnares	14
2.7.2	Comparación de columnas 2-D y 3-D.....	17
2.8	Transferencia de masa.....	18
2.8.1	Difusión molecular: Ley de Fick	18
2.8.2	Medio semi infinito.....	22
2.9	Conclusiones de la revisión bibliográfica.....	23
3	Materiales y métodos	24
3.1	Estudio de resistencia a la transferencia de masa radial de un flujo de burbujas en celda cuasi 2-D.....	24
3.1.1	Setup celda cuasi 2-D.....	24
3.1.2	Experimento N°1: Caracterización de flujo de aire y movimiento de líquido descendente teórico vs. real.....	27
3.1.3	Experimento N°2: Estudio de resistividad al transporte de reactivo.....	28
3.2	Estudio de dispersión de gas y transporte axial reactivo en columna piloto 3-D.....	31
3.2.1	Setup columna piloto 3-D.....	31
3.2.2	Experimento N°1: Evaluación de mejoras en la medición de J_g local y efecto del diámetro del tubo muestreador	32
3.2.3	Experimento N°2: Dispersión axial de reactivo superficialmente activo	35
3.2.4	Experimento N°3: Evaluación detallada de la distribución de tamaños de burbuja.....	37
4	Resultados y Discusión	41
4.1	Celda cuasi 2-D.....	41
4.1.1	Experimento N°1: Caracterización de flujo de aire y movimiento de líquido descendente teórico vs. real.....	41
4.1.2	Experimento N°2: Estudio de resistividad al transporte de reactivo.....	45
4.2	Celda piloto 3-D.....	47
4.2.1	Experimento N°1: Evaluación de mejoras en la medición de J_g local y efecto del diámetro del tubo muestreador	47
4.2.2	Experimento N°2: Dispersión axial de reactivo superficialmente activo	52
4.2.3	Experimento N°3: Evaluación detallada de la distribución de tamaños de burbuja.....	54
4.3	Resultados adicionales	59
4.3.1	Modelo multivariable para tiempo de mezcla.....	59
4.3.2	Muestreo en Bubble Viewer®	60
4.3.3	Cálculo de S_b	61
4.4	Limitaciones, contribución y recomendaciones.....	63

4.4.1	Estudio de resistividad al transporte de reactivo	63
4.4.2	Evaluación de mejoras en la medición de J_g local y efecto del diámetro del tubo muestreador	63
4.4.3	Dispersión axial de reactivo superficialmente activo	64
5	Conclusiones	65
6	Anexos	66
6.1	Detalle setup Celda Cuasi 2-D	66
6.1.1	Inyección de gas	66
6.1.2	Método de probeta invertida	67
6.2	Detalle setup Columna Piloto 3-D	68
6.2.1	Dispersión de gas	68
6.2.2	Experimento N°1: Método de probeta invertida	71
6.2.3	Experimento N°3: Bubble Viewer®	73
6.3	Detalle resultados Columna Piloto 3-D	76
6.3.1	Experimento N°1: Análisis estadístico de datos en método de probeta invertida	76
6.3.2	Experimento N°2: Detalle de resultados	77
6.3.3	Experimento N°3: Corrección de tamaños de burbuja	80
6.4	Curvas de calibración de reactivos en agua potable	84
6.4.1	Sulfato pentahidratado de cobre	85
6.4.2	Espumante Aerofroth 70 Plus	85
6.5	Valores de absorbancia para sulfato pentahidratado de cobre	86
6.6	Valores de absorbancia para espumante Aerofroth 70 Plus	91
6.7	Ficha técnica: Espumante Aerofroth 70 Plus	99
7	Bibliografía	110

Índice de tablas

Tabla 1: Tamaños característicos de gotas, modificado de Sauter (1926).	9
Tabla 2: Medidas celda cuasi 2-D.....	25
Tabla 3: Dimensiones de columna 2-D en montaje experimental sin inyección de aire.	26
Tabla 4: Condiciones de trabajo para registro visual.	27
Tabla 5: Condiciones de trabajo para toma de muestras.	28
Tabla 6: Cálculo volumen de muestra para prueba experimental.	29
Tabla 7: Dosis de reactivo a utilizar en pruebas experimentales.	29
Tabla 8: Condiciones de trabajo a 0.4 [bar] para experimento N°1.	32
Tabla 9: Medidas de columna 3-D con método de probeta invertida (sin inyección de aire).	34
Tabla 10: Dosis de espumante a agregar en función de la concentración requerida del sistema.	34
Tabla 11: Número de mediciones y uso de espumante requerido a presión de trabajo 0.4 [bar].	35
Tabla 12: Condiciones de trabajo a 0.4 [bar] para experimento N°2.	36
Tabla 13: Medidas de columna 3-D durante toma de muestras (sin inyección de aire).	36
Tabla 14: Condiciones de trabajo a 0.4 bar para experimento N°3.	37
Tabla 15: Medidas de columna 3-D para uso de Bubble Viewer® (sin inyección de aire).	38
Tabla 16: Número de fotografías en el tiempo por condición de trabajo.	39
Tabla 17: Distribución de tiempos de cada actividad para uso de Bubble Viewer®.	40
Tabla 18: Variables de dispersión de gas de tren dominante.	41
Tabla 19: Cálculo de número teórico de burbujas de diámetro equivalente.	41
Tabla 20: Cálculo de área de gas y de líquido.	42
Tabla 21: Velocidad de líquido descendente y ascendente de burbuja de tren dominante.	44
Tabla 22: Resumen de ajuste modelo semi infinito para espumante y sulfato.	46
Tabla 23: Resumen análisis estadístico de tiempos de medición.	47
Tabla 24: Resumen Análisis estadístico de datos para $J_{g \text{ local}}$	48
Tabla 25: Resultados regresión y cálculo de $J_{g \text{ global}}$	50
Tabla 26: Resultados de ajuste para cálculo de parámetro k.	50
Tabla 27: Resultados en toma de muestras por condición de trabajo.	53
Tabla 28: Fineza y uniformidad para condiciones de trabajo.	58
Tabla 29: Parámetros de distribución Log-Normal para ajuste por EasyFit.	58
Tabla 30: Resultados de ajuste para modelo de tiempo de mezcla.	60
Tabla 31: Resultados para análisis de muestras de Bubble Viewer®.	60
Tabla 32: Cálculo de velocidad superficial de área de burbuja.	62
Tabla 33: Resumen de resistividades aparentes en celda cuasi 2-D.	65
Tabla 34: Datos de fabricación de compresor de aire.	68
Tabla 35: Análisis estadístico para tiempos de medición.	76
Tabla 36: Análisis estadístico para $J_{g \text{ local}}$	76
Tabla 37: Análisis estadístico para tiempos de espera de rebalse.	76
Tabla 38: Detalle de rebalse por condición de trabajo.	77
Tabla 39: Detalle de ajuste de modelo de tiempo de mezcla.	79
Tabla 40: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (primera medición).	86
Tabla 41: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (segunda medición).	87
Tabla 42: Valor promedio de absorbancia para concentraciones conocidas (ambas mediciones).	88
Tabla 43: Análisis estadístico de valores de absorbancia (ambas mediciones).	89
Tabla 44: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (primera medición).	91
Tabla 45: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (segunda medición).	92
Tabla 46: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (tercera medición).	93
Tabla 47: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (cuarta medición).	94
Tabla 48: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (quinta medición).	95
Tabla 49: Valor promedio de absorbancia para concentraciones conocidas (cinco mediciones).	96
Tabla 50: Análisis estadístico de valores de absorbancia (cinco mediciones).	97

Índice de Figuras

Figura 1: Circuito de concentración industrial clásico (Lynch et al., 2010).....	4
Figura 2: Esquema de una columna de flotación, modificado de Finch & Dobby (1990).	6
Figura 3: Relación general entre J_g local y diámetro del tubo muestreador. En principio la velocidad superficial de gas se estabiliza para valores de diámetro superiores a 4 pulgadas respectivamente (Gómez, 2011).	7
Figura 4: Distribución Log-normal para tamaños de burbuja.....	10
Figura 5: Efecto de la concentración de espumante (Frother 250C) en el tamaño de la burbuja para $J_g = 1.3$ cm/s, modificado de Flint et al. (1988).	10
Figura 6: Ejemplos de ascenso de grupos de burbujas, modificado de Nicklin (1962).	12
Figura 7: Regímenes de flujo en una columna de burbujas y un sistema de fluidización gas-líquido, modificado de Chen et al. (1994).	14
Figura 8: Campo de flujo de líquido en un sistema de columna de burbuja gas-líquido ($J_g = 1.0$ cm/s), Chen et al. (1994).	15
Figura 9: Regiones de flujo observadas en una columna de burbujas para un régimen de flujo vórtice/vórtice-espinal, modificado de Tzeng et al. (1993).	16
Figura 10: Campo de flujo de líquido en un sistema de columna de burbuja gas-líquido ($J_g = 5.3$ cm/s), Chen et al. (1994).	16
Figura 11: Difusión gaseosa. (a) Los dos gases se encuentran separados por una barrera. (b) Tras el retiro de la barrera, unas pocas moléculas de cada gas se encuentran en el otro lado. (c) Tras un cierto tiempo la mezcla de los dos gases es homogénea, y se deja de llevar a cabo la difusión. Modificado de Alonso & Finn (1967).	18
Figura 12: Difusión a través de un elemento de superficie, modificado de Alonso & Finn (1967).	18
Figura 13: Difusión a través de un elemento de volumen, modificado de Alonso & Finn (1967).	18
Figura 14: Cambio en la concentración debido a una difusión estacionaria a lo largo de un tubo, modificado de Alonso & Finn.	21
Figura 15: Difusión unidimensional en un medio semi infinito. Modificado de Seader et al. (1998).	22
Figura 16: Esquema celda cuasi 2-D, (a) vista frontal (b) vista perfil.	24
Figura 17: Celda cuasi 2-D (vista frontal).	24
Figura 18: Celda cuasi 2-D (vista perfil).	24
Figura 19: Esquema de celda cuasi 2-D en configuración experimental, vista frontal con corte transversal en la base (volumen de control indicado con color rojo).	25
Figura 20: Celda cuasi 2-D en configuración experimental.	25
Figura 21: Esquema general de volumen de control (Puntos N°1 y N°2 indican posición de toma de muestras).	25
Figura 22: Puntos de muestreo N°1 y N°2 en volumen de control (sin inyección de aire y barrera móvil instalada).	26
Figura 23: Puntos de muestreo N°1 y N°2 en volumen de control (sin inyección de aire y sin barrera móvil).	26
Figura 24: Puntos de muestreo N°1 y N°2 en volumen de control (con inyección de aire y barrera móvil instalada).	26
Figura 25: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en $t \geq 2:00$ [min].	27
Figura 26: Fotografía del sistema sin flujo de aire en equilibrio para colorante.	27
Figura 27: Conjunto tubo-jeringa.	29
Figura 28: Conjunto tubo-jeringa inserto en celda columnar 2-D.	29
Figura 29: Sistema de referencia para modelo de medio semi-infinito en volumen de control.	30
Figura 30: Columna 3-D (parte inferior). Posee llave de descarga en su base.	31
Figura 31: Columna 3-D (parte superior). Posee contenedor de espuma unido a mangueras de descarga de rebalse.	31
Figura 32: Esquema general método de probeta invertida en celda columnar 3-D.	32

Figura 33: Esquema de columna 3-D con método de probeta invertida (sin inyección de aire). (a) condición inicial (b) condición experimental.	33
Figura 34: Puntos de toma de muestras a lo largo de la columna (a) Llave de evacuación basal (b) Llave de evacuación en cota media (c) Parte superior.	35
Figura 35: Configuración experimental de columna 3-D para toma de muestras (sin inyección de aire).	36
Figura 36: Configuración experimental de columna 3-D para uso de Bubble Viewer® (sin inyección de aire).	38
Figura 37: Esquema de metodología para uso de Bubble Viewer® en tercera prueba experimental.	40
Figura 38: Fotografía de tren de burbujas dominante: (a) Zona analizada indicada por color celeste (b) Burbujas analizadas para cálculo de tamaño promedio d_{32}	41
Figura 39: Área de líquido (línea color azul) y área de gas (línea color rojo) en tren de burbujas: (a) Caso real (b) Caso ideal.	42
Figura 40: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en t: 0 [s].	43
Figura 41: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en t: 5 [s].	43
Figura 42: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en t: 20 [s].	43
Figura 43: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en t \geq 2:00 [min].	43
Figura 44: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 5 [s].	44
Figura 45: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 20 [s].	44
Figura 46: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 1:00 [min].	44
Figura 47: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 2:00 [min].	44
Figura 48: Datos experimentales de concentración – tiempo para espumante en cada posición sin flujo de aire.	45
Figura 49: Datos experimentales de concentración – tiempo para espumante en cada posición con flujo de aire (J_g : 0.46 cm/s).	45
Figura 50: Datos experimentales de concentración – tiempo para sulfato en cada posición sin flujo de aire.	45
Figura 51: Datos experimentales de concentración – tiempo para sulfato en cada posición con flujo de aire (J_g : 0.46 cm/s).	45
Figura 52: Ajuste de concentración de espumante en cada posición sin flujo de aire.	46
Figura 53: Ajuste de concentración de espumante en cada posición con flujo de aire (J_g : 0.46 cm/s).	46
Figura 54: Ajuste de concentración de sulfato en cada posición sin flujo de aire.	46
Figura 55: Ajuste de concentración de sulfato en cada posición con flujo de aire (J_g : 0.46 cm/s).	46
Figura 56: Datos experimentales de J_g local vs. diámetro del tubo muestreador : (a) Inyector Fino – 0.1 gpl (b) Inyector Fino – 0.3 gpl (c) Inyector Grueso – 0.1 gpl (d) Inyector Grueso – 0.3 gpl.	48
Figura 57: Resultados de regresión por condición de trabajo.	49
Figura 58: Correlación entre datos experimentales y teóricos de parámetro k.	50
Figura 59: Datos experimentales de concentración de espumante vs. tiempo por cota: (a) Inyector Fino – 0.1 gpl (b) Inyector Fino – 0.3 gpl (c) Inyector Grueso – 0.1 gpl (d) Inyector Grueso – 0.3 gpl.	52
Figura 60: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl.	55
Figura 61: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (total de datos).	55
Figura 62: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector fino a concentración requerida de 0.1 gpl (el tamaño promedio incluye las burbujas registradas desde los 160 hasta los 180 segundos).	55
Figura 63: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (el promedio incluye las burbujas registradas desde los 90 hasta los 120 segundos).	55

Figura 64: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.3 gpl.....	56
Figura 65: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.3 gpl (total de datos).....	56
Figura 66: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector fino a concentración requerida de 0.3 gpl (el promedio incluye las burbujas registradas desde los 160 hasta los 180 segundos).....	56
Figura 67: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector grueso a concentración requerida de 0.3 gpl (el promedio incluye las burbujas registradas desde los 70 hasta los 120 segundos).....	56
Figura 68: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Fino - 0.1 gpl).....	57
Figura 69: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Grueso - 0.1 gpl).....	57
Figura 70: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Fino - 0.3 gpl).....	57
Figura 71: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Grueso - 0.3 gpl).....	57
Figura 72: Sistema de referencia para modelo de tiempo de mezcla.....	59
Figura 73: Resultados de ajuste para modelo de tiempo de mezcla.....	59
Figura 74: Sistema de mangueras y sus componentes.....	66
Figura 75: Lanza de columna 2-D con sus componentes.....	66
Figura 76: Esquema general método de probeta invertida.....	67
Figura 77: Método de probeta invertida.....	67
Figura 78: Compresor de aire.....	68
Figura 79: Manómetro-válvula de presión de trabajo.....	68
Figura 80: Compresor de aire, sistema de mangueras y conjunto manómetro-válvula.....	69
Figura 81: Válvula de flujo.....	69
Figura 82: Inyector y lanza.....	70
Figura 83: Inyector inserto en lanza.....	70
Figura 84: Tubo de acrílico inserto dentro de la columna junto con tapón superior e inferior con sistema de cuerdas.....	71
Figura 85: Tubos de acrílico y soporte utilizado para sostenerlos en la parte superior de la columna.....	71
Figura 86: Longitud del tubo en superficie de la columna.....	72
Figura 87: Bubble Viewer® (vista perfil).....	73
Figura 88: Bubble Viewer® (vista frontal).....	73
Figura 89: Columna piloto 3-D, con equipo Bubble Viewer® en parte superior.....	74
Figura 90: Equipo Bubble Viewer® con cámara fotográfica montado en la parte superior de la columna.....	74
Figura 91: Tubo de muestreo de Bubble Viewer® con válvula.....	74
Figura 92: Tubo de muestreo de Bubble Viewer® conectado con columna.....	75
Figura 93: Extremo inferior de tubo de muestreo de Bubble Viewer® sellado con tapón.....	75
Figura 94: Curva ajustada de concentración de espumante vs. tiempo en cota superior: (a) Inyector Fino - 0.1 gpl (b) Inyector Fino - 0.3 gpl (c) Inyector Grueso - 0.1 gpl (d) Inyector Grueso - 0.3 gpl.....	77
Figura 95: Curva ajustada de concentración de espumante vs. tiempo en cota media: (a) Inyector Fino - 0.1 gpl (b) Inyector Fino - 0.3 gpl (c) Inyector Grueso - 0.1 gpl (d) Inyector Grueso - 0.3 gpl.....	78
Figura 96: Curva ajustada de concentración de espumante vs. tiempo en cota inferior: (a) Inyector Fino - 0.1 gpl (b) Inyector Fino - 0.3 gpl (c) Inyector Grueso - 0.1 gpl (d) Inyector Grueso - 0.3 gpl.....	78

Figura 97: Identificación de burbujas mediante software ImageJ®: (a) Fotografía inicial (b) Fotografía analizada.	80
Figura 98: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (incluye datos sesgados).	80
Figura 99: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (total de datos). Incluye datos sesgados.	81
Figura 100: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.3 gpl (incluye datos sesgados).	81
Figura 101: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (total de datos). Incluye datos sesgados.	82
Figura 102: Espesor característico y cálculo de diámetro mínimo de burbuja.	82
Figura 103: Distribución de espesores de burbujas (fotografías analizadas en condición inyector Grueso - 0.1 gpl).	83
Figura 104: Espectrofotómetro.	84
Figura 105: Curva de calibración de sulfato pentahidratado de cobre para una longitud de onda de 810 [nm].	85
Figura 106: Curva de calibración para una longitud de onda de 232 [nm].	85
Figura 107: Curva de absorbancia – longitud de onda en el rango de 190 – 900 nm.	90
Figura 108: Coeficiente de correlación y promedio del coeficiente de variación en el rango de 190 hasta 900 nm.	90
Figura 109: Curva de absorbancia - longitud de onda en el rango de 190 – 900 nm.	98
Figura 110: Coeficiente de correlación y promedio del coeficiente de variación en el rango de 190 hasta 900 nm.	98
Figura 111: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 1).	99
Figura 112: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 2).	100
Figura 113: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 3).	101
Figura 114: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 4).	102
Figura 115: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 5).	103
Figura 116: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 6).	104
Figura 117: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 7).	105
Figura 118: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 8).	106
Figura 119: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 9).	107
Figura 120: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 10).	108
Figura 121: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 11).	109

1 Introducción

1.1 Motivación

La flotación de minerales es un proceso industrial ampliamente utilizado en la industria minera para separar de forma selectiva minerales económicamente valiosos desde una roca original utilizando propiedades de carácter superficial que todos los materiales poseen. En particular, se saca provecho de las diferencias en la hidrofobicidad/hidrofilicidad existente entre las distintas fases minerales. En la práctica, la roca original es reducida de tamaño mediante operaciones de conminución (chancado y molienda) que producen un material particulado que tiene, en general, un tamaño de partícula bajo los 200 μm de diámetro. La variable tamaño de partícula obedece en este caso a una distribución de tamaños donde partículas bajo un micrómetro de diámetro, no son consideradas relevantes para el proceso.

El proceso utiliza burbujas de gas para coleccionar material previamente hidrofobizado. Existen numerosas teorías de cómo dichas burbujas coleccionan el material. En principio, para que una partícula sea coleccionada, esta debe tener un tamaño y densidad específica en un rango tal que le permita romper las líneas de corriente (*streamlines*) generadas por el movimiento ascendente de las burbujas en el medio acuoso. De esta forma las burbujas, principalmente gobernadas por fuerzas de empuje, se mueven hacia arriba y mientras el líquido se mueve hacia abajo. Es común observar estudios que indican que el líquido se mueve hacia abajo reduciendo la recuperación por arrastre y limpiando a las burbujas de material hidrofobizado de baja liberación o bajo contenido de material valioso. Incluso hay teorías que señalan que el movimiento ascendente de las burbujas con respecto al líquido afectaría negativamente la recuperación por la des-adhesión de partículas valiosas y que la presencia de material particulado en suspensión generaría un fluido de mayor densidad y viscosidad que haría aún más eficiente dicho proceso. De lo anterior, se hace relevante el conocer los patrones de flujo de gas a través de un líquido y el patrón de flujo de líquido resultante.

Existen estudios que indican que la distribución de gas dentro de una columna de flotación no es homogénea. De lo anterior se puede hipotetizar que el movimiento de las burbujas en celdas de flotación tienen asociados patrones de flujo que limitarán el transporte de líquido y con esto, la transferencia de material particulado y de reactivos.

De esta forma, el objetivo de este trabajo es estudiar cómo dicho movimiento conjunto de líquido y gas afecta el transporte de reactivo a través de un flujo de burbujas. Adicionalmente, estudios relacionados con una mejor evaluación de la velocidad superficial relacionados con el diámetro del tubo muestreador y la probabilidad de muestreo de burbujas serán implementados.

Se reducirá el alcance del estudio a flujos de gas similares a aquellos generados en celdas columnares donde existe una dirección preferencial (vertical) de gas en un volumen de líquido dado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar cómo el movimiento conjunto de líquido y gas afecta el transporte de reactivo a través de un flujo de burbujas y presentar variantes en la metodología de medición de la velocidad superficial de gas para obtener un parámetro de caracterización de gas en celdas de flotación columnar más robusto y de mayor significado físico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la resistencia al transporte de reactivo que un tren de burbujas ejerce en un medio similar al observado en una columna de flotación (sistema cuasi 2-D).
- Estimar experimentalmente en una columna piloto de flotación (sistema 3-D) usando diferentes tubos muestreadores la velocidad superficial de gas y estudiar su comportamiento cuando se varía la dosificación de espumante y el tipo de inyector utilizado.
- Determinar la concentración de espumante en estado transiente a lo largo del eje axial de una celda columnar (sistema 3-D) cuando se varía la dosificación de este y el tipo de inyector utilizado.
- Determinar la distribución de tamaños de burbujas en una celda columnar (sistema 3-D) cuando se varía la dosificación de espumante y el tipo de inyector utilizado.

1.3 Alcances

- Los reactivos utilizados fueron Sulfato pentahidratado de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y el espumante Aerofroth 70 Plus. Ambos reactivos se usaron en el sistema cuasi 2-D mientras que en el sistema 3-D solo se utilizó el reactivo superficialmente activo.
- Las pruebas fueron realizadas utilizando agua potable tanto en el sistema cuasi 2-D como en el 3-D.
- El estudio se realizó utilizando sólo un solo caudal volumétrico de gas tanto en el sistema cuasi 2-D como en el 3-D.

2 Revisión bibliográfica

2.1 Flotación de minerales

La flotación es, sin duda, la técnica de procesamiento de minerales más relevante y versátil para la separación y concentración de minerales sulfurados y oxidados. Tanto su uso y aplicación se están ampliando de manera continua para procesar mayores tonelajes (Wills & Napier – Munn, 2006; Yianatos et al., 2008).

Originalmente patentado en 1906 por George Chapman, el proceso de flotación ha permitido la extracción de cuerpos mineralizados complejos y/o de baja ley los cuales de haber sido procesados de otra forma, habrían sido considerados como negocios no rentables (Lynch et al., 2010).

La flotación es un proceso selectivo de separación de minerales (King, 2001) desarrollado para el tratamiento de los sulfuros de cobre, plomo, y zinc. El campo de la flotación actualmente se ha expandido para incluir platino, níquel, sulfuros con contenido de oro, óxidos, tales como hematita y casiterita, minerales oxidados, como por ejemplo malaquita y cerusita, y finalmente minerales no metálicos, como la fluorita, fosfatos, y carbón fino.

2.2 Principios de flotación

La flotación es un proceso de separación físico-químico que utiliza las diferencias en las propiedades de superficie de los minerales (Kelly & Spottiswood, 1982). La teoría de flotación es compleja (Nguyen & Schulze, 2003). Ella involucra las interacciones entre las tres fases presentes en el sistema (sólidos, agua, y espuma) con muchos subprocesos que hasta el día de hoy no son completamente conocidos (Savassi, 1999).

En principio, se ha establecido el proceso de la recuperación del material por flotación desde la pulpa mediante tres mecanismos (Johnson, 1972):

- Adhesión selectiva de partículas a las burbujas de aire (o “flotación verdadera”).
- Arrastre mecánico no selectivo de partículas que son transferidas a la espuma y reportadas en el concentrado (partículas finas típicamente bajo los 50 μm de diámetro).
- Atrapamiento físico de partículas gruesas en la espuma entre burbujas presentes en dicha fase (frecuentemente se hace referencia como “agregación”).

La adhesión de las partículas de mineral valioso a las burbujas de aire se espera que sea el mecanismo más relevante. Sin embargo, una vez que la recuperación de partículas es efectuada en la fase pulpa esto no asegura que dichas partículas sean reportadas en el concentrado pues existe una última etapa que tiene que ver con la retención y transporte de estas partículas a través de la fase espuma.

La función interesante que puede tener la fase de espuma es, entre otras, mejorar la selectividad general del proceso de flotación. La espuma logra esto parcialmente removiendo el material arrastrado hacia la corriente de concentrado usando mecanismos de drenaje, mientras retiene de manera preferencial el material al cual permanece unido. Esto incrementa la ley del concentrado reduciendo la recuperación de no-valiosos. La relación entre la recuperación y la ley es un *trade-off* que depende enormemente de las condiciones en que el proceso se lleve a cabo. En la fase de separación final en una celda de flotación, la fase de espuma, entre otros, es un determinante de la ley y recuperación del proceso de flotación (Vera, 2002).

Existen diversos reactivos de flotación los cuales poseen roles específicos tanto en la pulpa como en la espuma. En términos genéricos los reactivos han sido por muchos años clasificados ya sea como colectores, espumantes, reguladores, modificadores, etc. Sin embargo estudios recientes revelan que el rol de un reactivo va mucho más allá de un solo mecanismo y habitualmente se observan efectos mixtos incluso dependientes de la calidad del agua que se use en el proceso de separación (Leja, 1982).

Considerando lo anterior y el hecho de que la espuma tiene un efecto filtro para las partículas, sean hidrofobizadas o no, se han identificado diseños de celdas con el rol que ellas tienen dentro del proceso de separación.

La Figura 1 muestra sin pérdida de generalidad un circuito de concentración industrial clásico (Lynch et al., 2010).

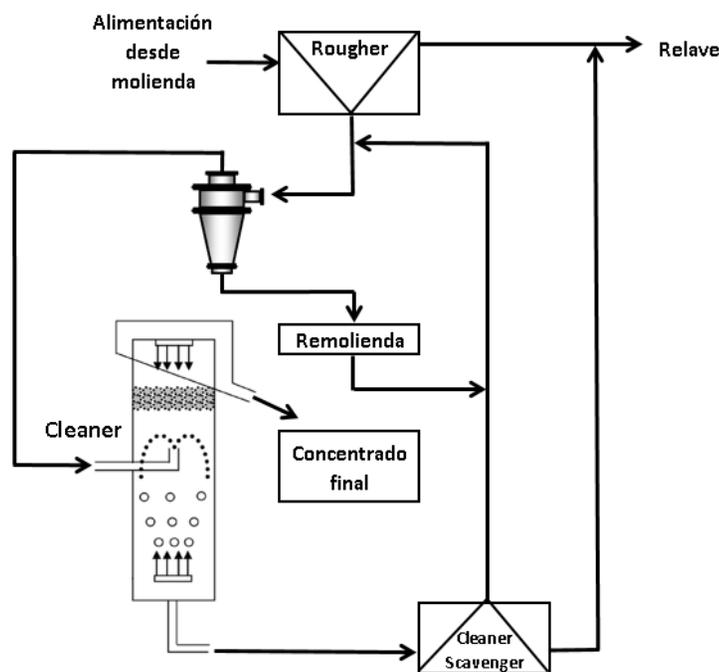


Figura 1: Circuito de concentración industrial clásico (Lynch et al., 2010).

La alimentación pasa a través de una etapa *Rougher* que tiene como objetivo maximizar la recuperación. Habitualmente esta se implementa utilizando celdas agitadas con porcentajes de sólidos de 30-40% y una altura de espuma de unos cuantos centímetros. La cola de la etapa *Rougher* es habitualmente enviada al relave final mientras que el concentrado es enviado a un sistema de clasificación denominado hidrociclón el cual permite clasificar las partículas de acuerdo a la masa de cada una (tamaño y densidad). Las partículas de menor masa son enviadas a la etapa *Cleaner* mientras que la cola es enviada a un proceso de remolienda para su posterior recirculación. Lo anterior es porque en muchas operaciones el material fino está correlacionado con el porcentaje en peso de la(s) especie(s) económicamente valiosas.

La etapa *Cleaner* consiste en una celda con diseño columnar. Esta trabaja con un porcentaje de sólidos de 20-25% y una altura de espuma desde decenas de centímetros hasta más de un metro,

por lo que el efecto “filtro” de partículas es mayor y tiene por objetivo maximizar la ley de concentrado. En esta etapa se obtiene el concentrado final.

La cola de la etapa *Cleaner* es enviada a la etapa *Cleaner-Scavenger* la cual consiste en muchos casos en series de celdas agitadas. Esta posee un porcentaje de sólidos variable de 25-40% y una altura de espuma de unos cuantos centímetros, por lo que el efecto de filtración de partículas es menor y se encarga de maximizar la recuperación. El concentrado de esta etapa tiene muchas formas de re-integrarse dentro de la operación. Para efectos del ejemplo, esta se recircula al hidrociclón mientras que su cola se envía al relave u otra etapa según la operación.

En lo siguiente se establecerán las características principales de celdas columnares y las herramientas para evaluar la dispersión de gas en ellas.

2.3 Diseño de la celda columnar

La Figura 2 muestra el esquema general de una columna de flotación. Las unidades comerciales poseen típicamente valores desde 9 a 15 m. de altura y 0.5 hasta 3.0 m. de diámetro. La sección transversal puede ser cuadrada o circular u otra. Dependiendo de la forma de la sección transversal, el lado del cuadrado o el diámetro de la columna se utiliza para designar el tamaño de esta.

Además de la forma, dos características que distinguen a las columnas de otros equipos de flotación son el sistema de generación de burbujas y el uso del agua de lavado.

La generación de burbujas se logra ya sea directamente mediante inyectores internos o tras un contacto externo entre el gas y el agua-pulpa (inyectores externos). Los inyectores internos están hechos de un tubo perforado revestido generalmente en tela (por ejemplo, tela filtrante) o de plástico perforado.

El agua de lavado se agrega a la espuma, usualmente en un arreglo de tubos perforados ubicados habitualmente sobre el nivel de espuma.

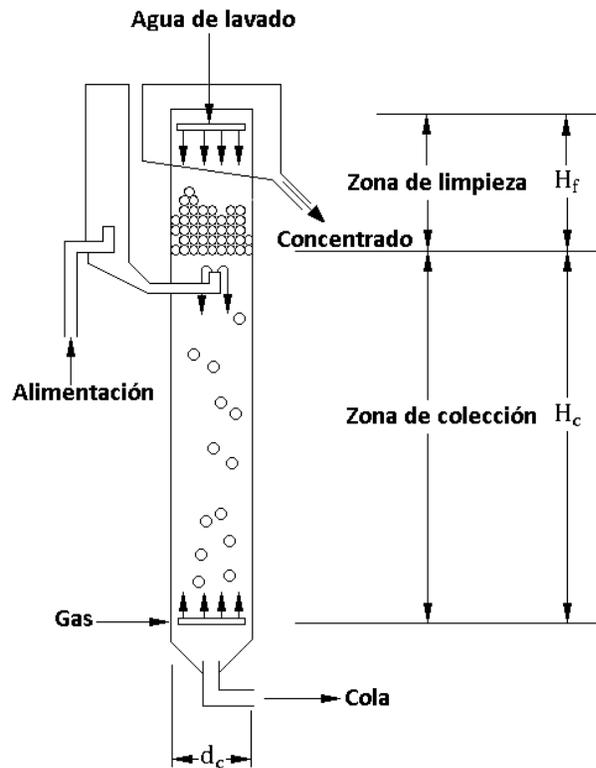


Figura 2: Esquema de una columna de flotación, modificado de Finch & Dobby (1990).

2.4 Operación de una celda columnar

Comúnmente la pulpa de alimentación (o suspensión) ingresa aproximadamente a un tercio de la parte superior de la columna y desciende en contracorriente a las burbujas generadas por el inyector en la parte inferior del reactor o celda. Las burbujas colectan las partículas flotables, lo cual ocurre en la zona de colección (Figura 2). La función principal del agua de lavado es limpiar la espuma de partículas de bajo valor económico (bajo nivel de hidrofobicidad) que son arrastradas junto al agua por las burbujas desde la zona de colección a la fase espuma. Por lo tanto, la zona de espuma también se conoce como zona de limpieza. El uso de agua de lavado es, en principio, lo que permitiría obtener altas leyes de concentrado.

El agua de lavado se divide entre aquella que rebalsa por el concentrado (y transporta las partículas colectadas) y la que baja a través de la espuma hacia la zona de colección. Esta última es la cual otorga la acción de limpieza y se conoce como *bias* de agua. Para una limpieza eficiente el *bias* de agua es normalmente mayor que cero en la dirección descendente. Esto se denomina operacionalmente como “*bias* positivo”.

El rendimiento general de una columna de flotación depende de la eficiencia de las zonas de colección y de limpieza y de la interacción entre ellas. Un término importante en este sentido es el *dropback* de partículas, que es aquella fracción de los sólidos que ingresa a la espuma y luego regresa a la zona de colección. Se ha demostrado que dicho *dropback* está constituido principalmente por partículas gruesas y/o de baja liberación (Rahman et al, 2014).

2.5 Variables relativas a la dispersión de gas

2.5.1 Velocidad superficial de gas (J_g)

La velocidad superficial de gas (o velocidad) J_g es el flujo volumétrico de gas dividido por el área de la sección transversal de la columna de acuerdo a la Ecuación (1).

$$J_g = \frac{Q_{g \text{ global}}}{A_{\text{celda}}} \quad (1)$$

Sus unidades son de $(\text{cm}^3\text{gas/s})/(\text{cm}^2\text{área columna})$, o unidades de velocidad (cm/s) . La velocidad superficial se ha definido como un parámetro de control útil debido a que permite evaluar parcialmente la dispersión de gas en la celda y, por ejemplo, comparar columnas de diferente diámetro. De manera análoga, las velocidades superficiales se presentan para otros fluidos, de acuerdo a la definición general,

$$J_i = \frac{Q_i}{A_{\text{celda}}} \quad (2)$$

Donde i puede ser bias de agua, agua de lavado, relave, etc.

La velocidad superficial J_g posee ciertas desventajas al calcularlo de acuerdo a la Ecuación (1), debido a que asume que el aire se encuentra distribuido de manera uniforme a lo largo de la sección transversal y no considera el *backmixing* de gas, gradientes de concentración de reactivos, entre otros. Desde un punto de vista de muestreo, en la operación habitualmente se utiliza un tubo de 1 [pulg] lo cual presenta dificultades relacionadas con la representatividad del flujo de burbujas. Al utilizar un sensor del tipo tubo muestral se asume una dirección preferencial del flujo de gas que no necesariamente es representativo de lo que ocurre en la celda de flotación.

Más allá de lo anterior, hay indicaciones de que se pueden obtener resultados diferentes de J_g solo al variar el diámetro del tubo muestreador (Gómez, 2011) según la Figura 3.

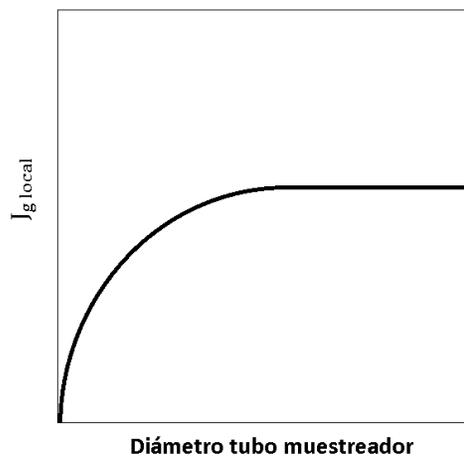


Figura 3: Relación general entre J_g local y diámetro del tubo muestreador. En principio la velocidad superficial de gas se estabiliza para valores de diámetro superiores a 4 pulgadas respectivamente (Gómez, 2011).

De acuerdo al conocimiento actual del autor, este efecto no ha sido desarrollado y publicado formalmente en la literatura científica y en consecuencia, es uno de los aspectos que este trabajo abordará.

2.5.2 Diámetro de Sauter de burbujas (d_{32})

Sauter (1926) realizó estudios para determinar la eficiencia de las mezclas de combustible atomizado y aire, las cuales se caracterizan por contener gotas de tamaños muy diferentes. De acuerdo al autor, la eficiencia de las mezclas de combustible siempre se incrementa de la siguiente forma:

- Reduciendo el tamaño promedio de las gotas, es decir, incrementando la fineza de la atomización.
- Disminuyendo las diferencias entre los tamaños de las gotas individuales, es decir, incrementando la uniformidad de la atomización. Grandes diferencias pueden causar perturbaciones en el flujo y en la cinética de combustión de la mezcla.

Dado que una mezcla de líquidos inmiscibles contiene gotas de tamaños muy diferentes, el objetivo es siempre determinar un valor representativo y característico de la distribución de tamaños lo cual se ha asociado a un tamaño promedio. Este valor se puede determinar de dos formas, ya sea midiendo el tamaño de una cantidad suficiente de gotas y luego calcular su promedio o calcular el promedio directamente sin conocer el tamaño de las gotas individuales. El primer método entrega información tanto de la fineza como de la uniformidad de la mezcla, mientras que el segundo sólo entrega información de la fineza, sin indicación alguna de la uniformidad.

Existen seis formas de calcular el tamaño promedio las cuales están dadas por los casos A hasta F (Tabla 1), las que sólo dependen de los parámetros que sean conocidos. Estos parámetros son n , número de gotas; L , suma de los diámetros de las gotas; O , área superficial total de las gotas; V , volumen total de las gotas.

De acuerdo a Sauter (1926) el mejor indicador viene dado por el caso F debido a que la eficiencia de la mezcla con respecto a la velocidad de vaporización y de combustión aumenta con la razón área - volumen total de las gotas, por lo que el valor de $d_{m,F}$ es el único caso que considera ambos parámetros.

Es importante mencionar que este estudio fue realizado para operaciones de combustión y no para operaciones de flotación. Sin embargo, los estudios indican que en flotación de minerales la contribución de tamaños finos y grandes de burbujas a la recuperación global es menor con respecto a tamaños de burbujas intermedios ubicados en torno a 1 [mm] de diámetro. En efecto, por una parte, tamaños finos de burbujas no tienen el empuje suficiente para llegar la interface pulpa-espuma en un tiempo acorde con la operación (tiempo de residencia de las partículas en la celda). Esta situación se ve aún más desfavorable cuando se consideran estas burbujas cargadas de partículas (*Backmixing* de burbujas) (Fuerstenau et al., 2007). Por otra parte tamaños importantes de burbujas (sobre 4 mm de diámetro) exhiben una movilidad significativa de la interfaz líquido-gas lo que genera una inestabilidad en la adhesión partícula-burbuja reduciendo los valores de carga de burbujas en estos casos (Tan et al., 2013). Lo anterior indica que la flotación de minerales requiere de una distribución de fineza intermedia y alta uniformidad.

Los estudios de Sauter (1926) fueron posteriormente aplicados de manera análoga a la flotación de minerales, es decir para una mezcla de gas y líquido (o suspensión). De acuerdo a lo anterior, en un proceso de flotación la distribución de tamaños de burbujas más característica puede ser representado por el tamaño d_{32} , el cual viene dado por el caso F,

$$d_{32} = d_{m,F} = \frac{\sum(d_i^3)}{\sum(d_i^2)} \quad (3)$$

En la actualidad la medición de tamaños de burbuja en procesos de flotación se ha desarrollado mediante el uso de tubos de muestreo y metodologías ópticas. Esto trae varios inconvenientes tales como el submuestreo de burbujas pequeñas o burbujas sobrecargadas de mineral y el sobremuestreo de burbujas de alto tamaño, variaciones en la estabilidad de burbujas, etc. La estabilidad de burbujas, altamente dependiente de la composición química del líquido, será evaluada en este trabajo en mayor detalle. Las distribuciones obtenidas habitualmente pueden ser descritas con un modelo Lognormal (Yianatos et. al 1986; Kamp, 2001) el cual se muestra en la Figura 4. En dicha distribución se ubican los diámetros d_{10} , d_{21} y d_{32} , donde el diámetro d_{32} tiene un sesgo hacia tamaños significativos de burbuja. Por esto la uniformidad en este trabajo será estudiada mediante las diferencias entre las magnitudes de cada uno de estos diámetros promedio.

Tabla 1: Tamaños característicos de gotas, modificado de Sauter (1926).

Caso	Valores conocidos	Tamaño promedio d_B
A	L y n	$d_{m,A} = d_{10} = \frac{\sum(d_i)}{n} = \frac{L}{n}$
B	O y n	$d_{m,B} = \sqrt{\frac{\sum(d_i^2)}{n}} = \sqrt{\frac{O}{4 \cdot \pi \cdot n}}$
C	V y n	$d_{m,C} = \sqrt[3]{\frac{\sum(d_i^3)}{n}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi \cdot n}}$
D	V y L	$d_{m,D} = \sqrt{\frac{\sum(d_i^3)}{\sum(d_i)}} = \sqrt{\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi \cdot L}}$
E	O y L	$d_{m,E} = d_{21} = \frac{\sum(d_i^2)}{\sum(d_i)} = \frac{O}{4 \cdot \pi \cdot L}$
F	V y O	$d_{m,F} = d_{32} = \frac{\sum(d_i^3)}{\sum(d_i^2)} = \frac{3 \cdot V}{O}$

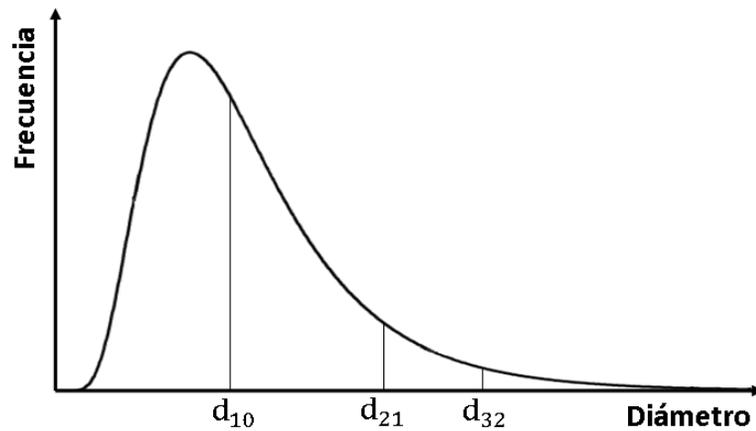


Figura 4: Distribución Log-normal para tamaños de burbuja.

Por otro lado el cálculo del tamaño promedio de burbuja mencionado anteriormente puede ser usado para evaluar el efecto de la concentración de espumante y la determinación de parámetros clásicos (por ejemplo, la CCC o concentración crítica de coalescencia). Un ejemplo de esto se presenta en la Figura 5, la cual muestra los resultados de las mediciones de tamaños de burbuja en soluciones de agua-espumante para dos tipos de inyectores: tela filtrante y vidrio poroso. Esto es claramente un efecto fuerte de la concentración de espumante para niveles bajo los 20 ppm aproximadamente.

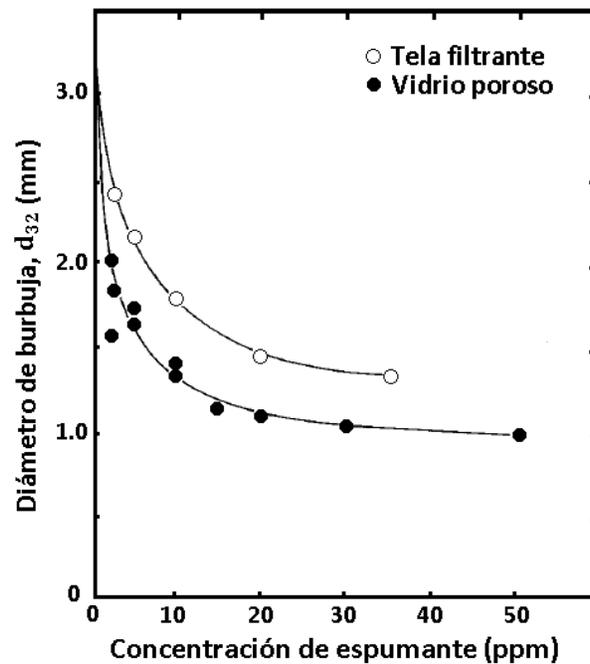


Figura 5: Efecto de la concentración de espumante (Frother 250C) en el tamaño de la burbuja para $J_g = 1.3$ cm/s, modificado de Flint et al. (1988).

De acuerdo a Finch & Dobby (1990), existe una relación entre el tamaño promedio de burbuja d_b y la velocidad superficial de gas, la cual es la siguiente,

$$d_b = C_e \cdot (J_g)^n \quad (4)$$

Donde $n = 0.25$ ha sido un buen ajuste para los sistemas estudiados hasta la fecha, mientras que el ponderador C_e se relaciona de manera inversa con la concentración de espumante principalmente.

2.5.3 Velocidad superficial de área de burbuja (S_b)

La velocidad superficial de área de burbuja tiene una gran importancia en la flotación de minerales, ya que se ha relacionado con la cinética de flotación mediante la Ecuación (5) donde k representa la velocidad específica de flotación, P la flotabilidad que representa el aspecto químico detrás de la hidrofobización del mineral, y el parámetro R_f es la recuperación por espuma (Gorain, 1998).

$$k = P \cdot S_b \cdot R_f \quad (5)$$

Esta relación ha sido cuestionada por autores debido a que el parámetro S_b está evaluado con el diámetro d_{32} , sesgado hacia valores altos de tamaños de burbujas. Lo anterior indica que el parámetro S_b sería un indicador de cuán mal un proceso de flotación se está llevando a cabo y no permitiría identificar cuán bien está funcionando (Heiskanen, 2002). Diferentes vías de obtención de este parámetro serán evaluadas y estudiadas en conjunto con las demás variables que definen el estado de dispersión de gas en celdas de flotación. En lo siguiente, se presenta una de las formas clásicas de obtener el parámetro S_b .

Sea n_b el número de burbujas dentro de la celda una función del tiempo. Suponiendo que todas las burbujas son esféricas y poseen el mismo diámetro d_b , el área (A_{bb}) y volumen (V_{bb}) total de las burbujas se expresa mediante las siguientes expresiones,

$$A_{bb} = n_b \cdot \pi \cdot d_b^2 \quad (6)$$

$$V_{bb} = \frac{1}{6} \cdot n_b \cdot \pi \cdot d_b^3 \quad (7)$$

Derivando las expresiones anteriores con respecto al tiempo se tiene lo siguiente,

$$\dot{A}_{bb} = \dot{n}_b \cdot (\pi \cdot d_b^2) \quad (8)$$

$$\dot{V}_{bb} = \dot{n}_b \cdot \left(\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_b^3\right) \quad (9)$$

Despejando el valor de \dot{n}_b de la Ecuación (8) y reemplazándolo en la Ecuación (9) se obtiene la siguiente expresión,

$$6 \cdot \dot{V}_{bb} = \dot{A}_{bb} \cdot \frac{d_b^3}{d_b^2} = \dot{A}_{bb} \cdot d_{32}$$

Siendo d_{32} el diámetro de Sauter mencionado en la sección 2.5.2. Dado que el valor de \dot{V}_{bb} corresponde al flujo volumétrico de gas, este se puede expresar en función de $J_{g \text{ global}}$ y del área de la celda mediante la Ecuación (1), lo que al ser considerado en la expresión anterior entrega el siguiente resultado,

$$S_{b1} = 6 \cdot \frac{J_{g \text{ global}}}{d_{32}} = \frac{\dot{A}_{bb}}{A_{\text{celda}}} \quad (10)$$

De acuerdo a su definición, la velocidad superficial de área de burbuja representa cuánto se incrementa el área de la sección transversal física de la celda al adicionar el área interfacial generada por las burbujas que la atraviesan. Por lo tanto su valor siempre será mayor o igual a 1. Adicionalmente este parámetro posee unidades de $[s^{-1}]$, es decir, unidades de frecuencia (Hz). Habitualmente las frecuencias están asociadas al número de veces que ocurre un evento en un intervalo de tiempo, pero dicho evento no ha sido claramente identificable.

2.6 Velocidad de las burbujas en un flujo de dos fases

Una de las teorías más remotas para la distribución de burbujas en una celda columnar es la de Nicklin (1962), en la cual se obtiene una expresión para el cálculo de la velocidad de las burbujas cuando estas ascienden en una fase líquida.

De acuerdo a esta teoría la velocidad posee un componente dado por la velocidad superficial del gas, otro dado por la velocidad superficial del líquido y finalmente uno dado por la velocidad de empuje, esto se explica de la siguiente forma:

En la Figura 6 para el caso (a) se tiene la inyección de aire a través de un líquido estático.

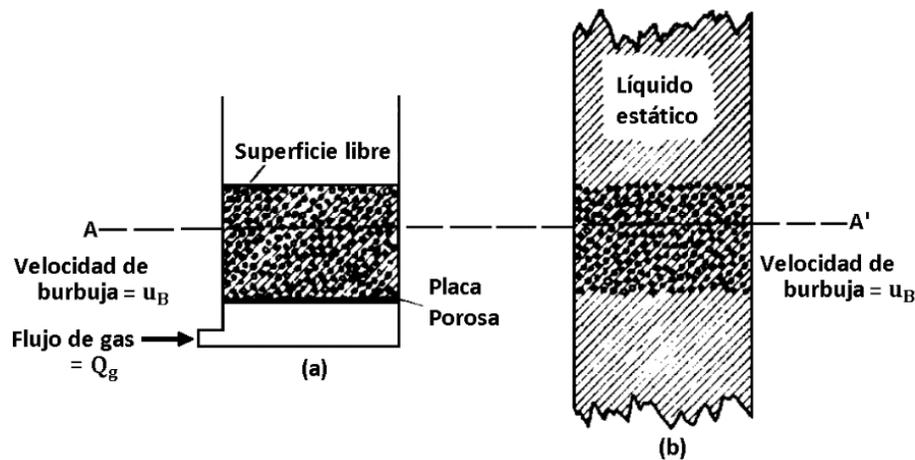


Figura 6: Ejemplos de ascenso de grupos de burbujas, modificado de Nicklin (1962).

Para este caso, se considera n el número de burbujas por unidad de volumen de la columna, uniformemente espaciadas, cada una de volumen V_B , subiendo a una velocidad u_B . Se tiene que el número de burbujas que llegan a la superficie por segundo (n') viene dado por,

$$n' = u_B \cdot A_{\text{celda}} \cdot n$$

Siendo A_{celda} el área de la sección transversal de la celda.

El flujo volumétrico de gas por unidad de tiempo (Q_g) por lo tanto será,

$$Q_g = n' \cdot V_B = u_B \cdot A \cdot n \cdot V_B$$

Sin embargo, al ser $n \cdot V_B$ el volumen de gas por unidad de volumen de la columna, esto es por definición el holdup de gas ε_g y reemplazándolo en la ecuación anterior se tiene el siguiente resultado,

$$u_B = \frac{Q_g}{\varepsilon_g \cdot A}$$

En la Figura 6 para el caso (b) se muestra a las burbujas en la misma configuración que en el caso anterior, pero esta vez subiendo con respecto a un líquido estático que se encuentra sobre ellas. La principal diferencia entre los casos (a) y (b) se debe al considerar el flujo de líquido a través de la sección AA'. En el caso (a) no hay un flujo neto de líquido, mientras que en el caso (b) debe haber un flujo neto de líquido de igual magnitud en dirección hacia abajo para contrarrestar el flujo ascendente de gas. El caso general (considerando flujo neto de líquido) representa la velocidad relativa entre las dos fases (u_R) o también conocida como *slip velocity*, concepto descrito por la Ecuación (11).

$$u_R = \frac{Q_g}{\varepsilon_g \cdot A} - \frac{Q_L}{(1 - \varepsilon_g) \cdot A} = \frac{u_0}{(1 - \varepsilon_g)} \quad (11)$$

Siendo Q_L el flujo volumétrico de líquido descendente (indicado por el signo negativo en la ecuación) que contrarresta el flujo ascendente de gas y u_0 la velocidad de empuje, la cual depende del tamaño, espaciado de las burbujas y de las propiedades del sistema. De esta última ecuación se puede tener la siguiente relación general para la velocidad de la burbuja,

$$\frac{Q_g}{\varepsilon_g \cdot A} = \frac{Q_g}{A} + \frac{Q_L}{A} + u_0 \quad (12)$$

O de manera análoga,

$$u_B = J_g + J_L + u_0 \quad (13)$$

El caso (a) se obtiene al imponer $Q_L = 0$ (cuando no hay un flujo neto de líquido).

La teoría de Nicklin (1962) se puede resumir en que el flujo neto de líquido tiende a bajar con el fin de contrarrestar el flujo ascendente de gas, sin embargo no menciona el comportamiento local del líquido en la sección transversal del flujo de burbujas. Esta teoría también asume que todas las burbujas poseen el mismo tamaño y que se encuentren distribuidas de manera uniforme a lo largo de la columna, es decir, se asume un flujo simétrico tanto para el gas como el líquido.

Estudios posteriores realizados por Chen et al. (1994), indican que hay zonas donde el líquido asciende con las burbujas principalmente en una “corriente central de burbujas”, mientras que en otras el líquido desciende cerca de las paredes de la columna alcanzando la mayor velocidad (sección 2.7). Este aspecto será estudiado con algún detalle en este trabajo.

2.7 Distribución de gas

2.7.1 Régimen de flujo en celdas columnares

Chen et al. (1994) realizaron estudios de las estructuras de flujo macroscópicas en columnas de burbujas 3-D y sistemas de fluidización gas-líquido-sólido bajo diversas condiciones operacionales usando el sistema PIV (*particle image velocimetry*) el cual consiste en el uso de láminas láser, grabación de video y procesamiento de imágenes como las técnicas más importantes.

En base a lo anterior se presentan los resultados obtenidos por los autores, es decir, las tres estructuras de flujo macroscópicas (régimenes de flujo) que pueden ser identificados en una columna de burbuja (Figura 7).

Cabe mencionar que el criterio para establecer los regímenes de flujo puede variar con las variables de diseño u operacionales tales como el tamaño de la columna, tipo de distribuidor y propiedades del líquido. Los regímenes de flujo serán analizados en esta sección.

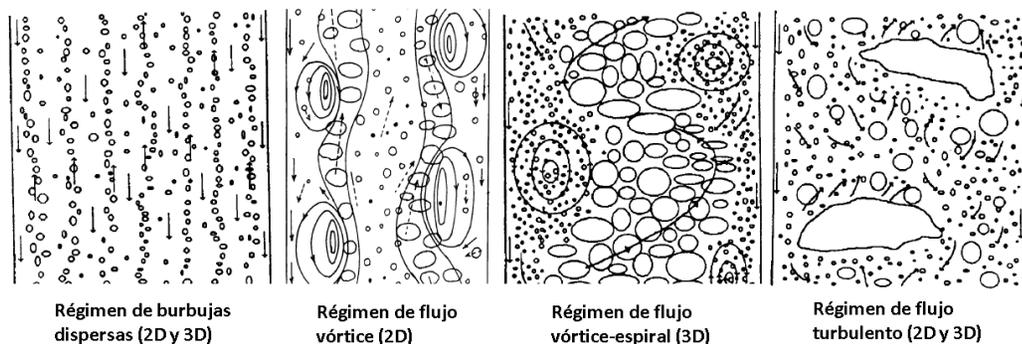


Figura 7: Regímenes de flujo en una columna de burbujas y un sistema de fluidización gas-líquido, modificado de Chen et al. (1994).

2.7.1.1 Régimen de flujo de burbujas dispersas

A bajas velocidades del gas, se observa que las corrientes de burbujas ascienden de forma rectilínea con una distribución de tamaño relativamente uniforme a lo largo de la columna. La coalescencia de burbujas es insignificante en este régimen. Por otro lado, el líquido es llevado hacia arriba en las cercanías de las corrientes de burbujas y baja entre dichas corrientes.

Un patrón de flujo de líquido típico en este régimen se muestra en la Figura 8 en la cual se observa que a medida que el líquido baja de manera rectilínea (en la parte superior), las burbujas ascendentes (no mostradas en la figura) inducen a que este se mueva de manera caótica como se muestra en la parte inferior.

Cabe mencionar que el movimiento rectilíneo del líquido descendente es el patrón de flujo más observado en este régimen el cual existe para una velocidad de gas de hasta 1.7 cm/s.

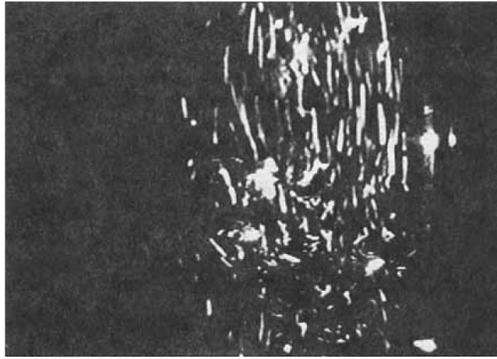


Figura 8: Campo de flujo de líquido en un sistema de columna de burbuja gas-líquido ($J_g = 1.0 \text{ cm/s}$), Chen et al. (1994).

2.7.1.2 Régimen de flujo vórtice - espiral

En este régimen se distinguen cuatro regiones de flujo, estas son las siguientes:

- (i) **Región de flujo descendente:** Se ubica adyacente a las paredes de la columna y se caracteriza por el líquido moviéndose en dirección hacia abajo y/o corrientes de sólidos moviéndose ya sea en dirección recta o de forma espiral dependiendo de las velocidades del gas y del líquido. Esta región está libre de burbujas a bajas velocidades de gas. Sin embargo, a velocidades de gas relativamente altas, se pueden observar pequeñas burbujas en esta región. El tamaño de esta región cambiará con la velocidad del gas.
- (ii) **Región de flujo vórtice - espiral:** Se ubica entre la región de flujo descendente y la corriente central de burbujas, se caracteriza por la existencia de líquido moviéndose en dirección espiral hacia abajo y/o vórtices de sólidos. La velocidad espiral-descendente varía con las velocidades de gas y de líquido. Toda la región está oscilando lateralmente hacia atrás y hacia adelante, estrechamente relacionado con el movimiento de oscilación de la región de burbujas rápidas ubicado en las cercanías.
- (iii) **Región de flujo de burbujas rápidas:** Se encuentra adyacente a la región de flujo vórtice-espiral y también es denominada en esta sección como “corriente central de burbujas”. En esta región se lleva a cabo una coalescencia y ruptura de burbujas significativa. También, los *clusters* de burbujas o burbujas coalescentes se mueven hacia arriba en forma espiral a una velocidad alta. Esta región también sirve como un deflector en la transferencia de masa radial tanto para fases sólidas y líquidas entre la región de pluma central y la región de flujo de vórtice-espiral. Cuando se establece el régimen de flujo vórtice-espiral, la región de flujo de burbujas rápidas establece la estructura de flujo macroscópica del sistema.
- (iv) **Región de pluma central:** Esta región se encuentra en el centro de la columna y está rodeada por la región de flujo de burbujas rápidas. Esta región se caracteriza por una distribución de tamaño de burbujas relativamente uniforme y una menor interacción burbuja-burbuja.

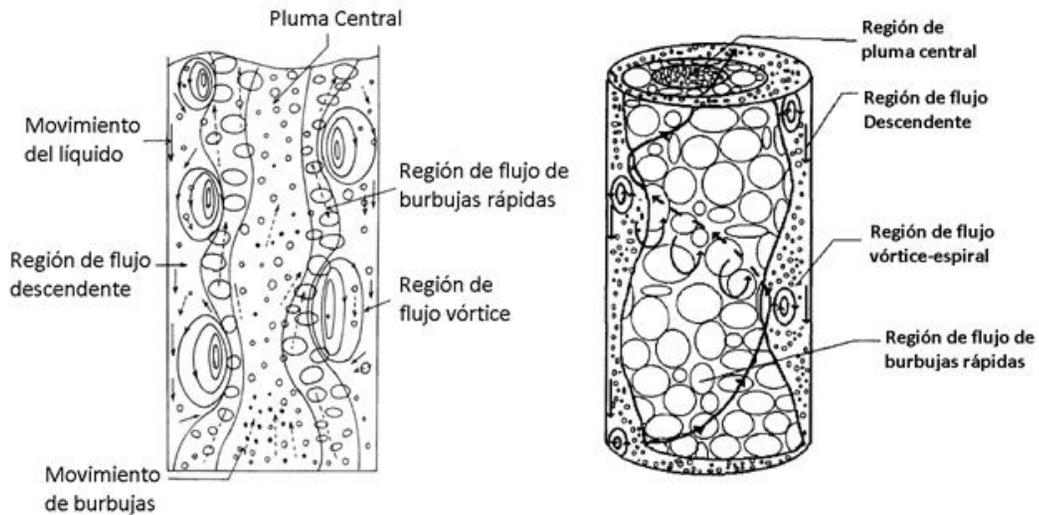


Figura 9: Regiones de flujo observadas en una columna de burbujas para un régimen de flujo vórtice/vórtice-espiral, modificado de Tzeng et al. (1993).

Por lo tanto, en el régimen de flujo vórtice-espiral (para velocidades de gas entre 2.1 a 4.2 cm/s), la fase líquida es llevada hacia arriba por la corriente central de burbujas la cual sube de forma espiral en el centro de la columna y baja en un patrón de vórtice y espiral en la región ubicada entre la corriente central de burbujas y la pared de la columna.

De acuerdo a estudios realizados por Tzeng et al. (1993) en un sistema 2-D, estas regiones de flujo se visualizaron cuando la velocidad superficial del gas varió en un rango entre 4.0-10 mm/s.

2.7.1.3 Régimen de flujo turbulento

A medida que la velocidad del gas supera los 4.9 cm/s, se empiezan a formar burbujas grandes debido a la coalescencia intensiva, la cual rompe gradualmente la estructura "continua" y eventualmente al patrón de flujo en espiral de la corriente central de burbujas.

Un patrón de flujo de líquido en este régimen se muestra en la Figura 10, en la cual se observa que el patrón de flujo de líquido es mucho más caótico y dinámico que el del régimen de flujo vórtice-espiral. La mezcla de líquido entre la parte inferior y la parte superior de la columna en el régimen de flujo turbulento no es tan rápida como en el régimen de flujo de vórtice-espiral.



Figura 10: Campo de flujo de líquido en un sistema de columna de burbuja gas-líquido ($J_g = 5.3$ cm/s), Chen et al. (1994).

2.7.2 Comparación de columnas 2-D y 3-D

De acuerdo a R. C. Chen, J. Reese & L. S. Fan (1994) se han encontrado similitudes entre las estructuras de flujo de columnas 2-D y 3-D al ser comparados con los resultados 2-D reportados por Tzeng et al. (1993), estas son las siguientes:

- Tres regímenes de flujo pueden ser identificados, estos son: burbujas dispersas, flujo vórtice (2-D) o flujo vórtice-espiral (3-D) y flujo turbulento.
- Ya sea en el régimen vórtice (2-D) o vórtice-espiral (3-D), se distinguen cuatro regiones de flujo, estas son: flujo descendente, flujo vórtice (2-D) o flujo vórtice-espiral (3-D), flujo de burbujas rápidas y pluma central.
- Tanto para columnas 2-D y 3-D, una capa delgada de flujo descendente libre de burbujas se encuentra en la región adyacente a las paredes.
- El líquido y/o los sólidos fluyen en un patrón de vórtice (2-D) o en un patrón de vórtice-espiral (3-D) en la región adyacente a la región de flujo descendente.
- En la región de flujo de burbujas rápidas, grandes burbujas coalescentes se mueven con una mayor velocidad en un movimiento ondulatorio en la columna 2-D y siguen un movimiento espiral en la columna 3-D. Se observa un efecto deflector de la región de flujo de burbujas rápidas en la transferencia de masa radial tanto para fases sólidas y líquidas en las columnas 2-D y 3-D.
- La región de pluma central la cual se encuentra en el centro de la columna y se caracteriza por una coalescencia burbuja-burbuja relativamente insignificante y una distribución de tamaño de burbuja uniforme.

En base a estas comparaciones es importante señalar que los límites superior e inferior de los regímenes de flujo y la estructura del flujo en sí (presentados en la sección 2.7.1) se verán afectados por el diseño de la columna, por ejemplo el tamaño de esta y el tipo de distribuidor de gas tanto para los sistemas de columnas 2-D y 3-D (Reese et al., 1992).

En el presente trabajo se utilizó un sistema cuasi 2-D en el cual se ajustaron las condiciones operacionales para trabajar en un régimen vórtice, esto se hizo variando la velocidad superficial de gas.

2.8 Transferencia de masa

2.8.1 Difusión molecular: Ley de Fick

Si hay dos gases separados por una barrera, como se muestra en la Figura 11, y se remueve la separación, se observará que los gases difunden entre sí hasta que, tras un cierto instante de tiempo, se tendrá una mezcla homogénea.

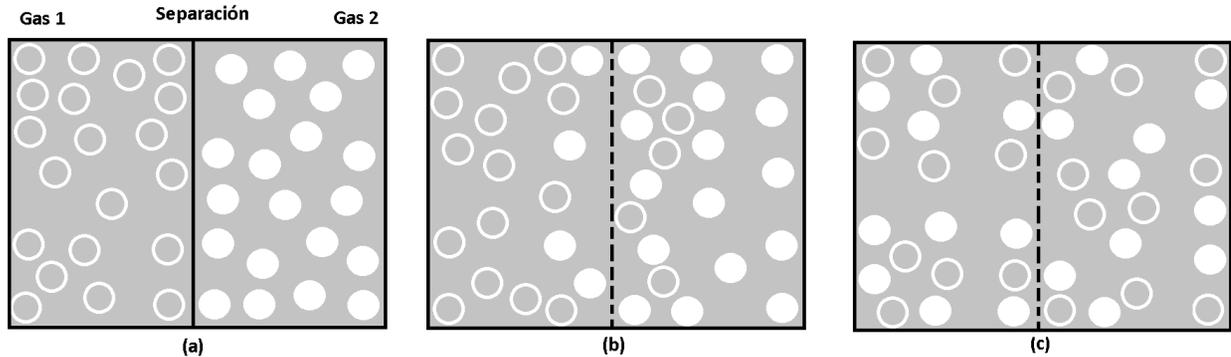


Figura 11: Difusión gaseosa. (a) Los dos gases se encuentran separados por una barrera. (b) Tras el retiro de la barrera, unas pocas moléculas de cada gas se encuentran en el otro lado. (c) Tras un cierto tiempo la mezcla de los dos gases es homogénea, y se deja de llevar a cabo la difusión. Modificado de Alonso & Finn (1967).

La difusión es en general el resultado de que la agitación molecular produce colisiones entre las moléculas, las cuales como consecuencia se dispersan.

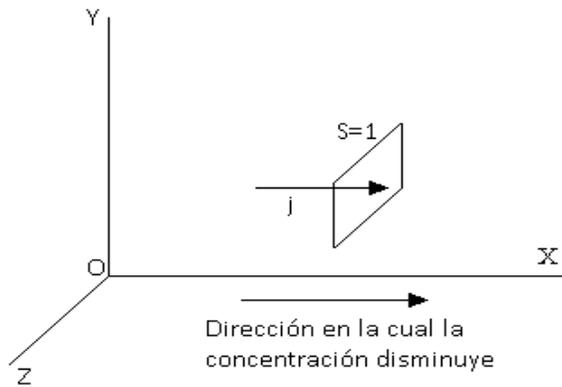


Figura 12: Difusión a través de un elemento de superficie, modificado de Alonso & Finn (1967).

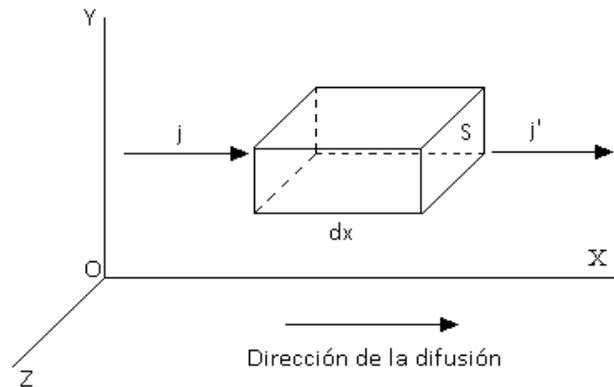


Figura 13: Difusión a través de un elemento de volumen, modificado de Alonso & Finn (1967).

Considerando la Figura 12, se asume que la concentración de la sustancia varía en una cierta dirección, la cual será designada como el eje-x, pero que, por el contrario, la concentración es la misma en todos los planos perpendiculares a aquella dirección. Entonces el número de átomos o moléculas por unidad de volumen (o la concentración) es una función sólo de la coordenada-x; es decir que, $n = n(x)$. Esto se expresa en $[m^{-3}]$. Luego la difusión ocurre en la dirección del eje-x.

Se considerará j a la densidad de corriente de partículas; es decir, el número neto de partículas que cruza por unidad de tiempo una unidad de área ubicada perpendicular a la dirección de la difusión. Esta densidad de corriente se expresa en $[m^{-2}s^{-1}]$.

Cuando la sustancia es homogénea (cuando n es constante), la densidad de corriente j es cero debido a que el mismo número de partículas cruza en una dirección como en la opuesta, y no existe

un transporte de masa neto. Sin embargo cuando la sustancia no es homogénea y n varía de posición en posición ocurre una corriente neta, o transporte de masa.

La intuición física, confirmada por experimentos, sugiere que a mayor densidad de corriente, mayor es la variación de la concentración $n(x)$ por unidad de longitud, o gradiente de concentración (es decir, mayor $\frac{\partial n}{\partial x}$).

Pruebas experimentales también muestran que hay una relación proporcional entre la densidad de corriente j y el cambio en la concentración por unidad de longitud, $\frac{\partial n}{\partial x}$; el cual es,

$$j = -D \frac{\partial n}{\partial x} \quad (14)$$

Donde la constante de proporcionalidad D es un coeficiente que depende de la sustancia, llamado coeficiente de difusión. El signo negativo indica que el flujo neto es en la dirección en la cual n disminuye.

La mayoría de los procesos de difusión cumplen la Ecuación (14) bastante bien, excepto cuando la concentración n es extremadamente baja, demasiado alta, o cambios repentinos a una distancia corta, tal que el razonamiento estadístico no es aplicable. La Ecuación (14) es conocida como la ley de Fick.

El coeficiente de difusión se expresa en $[m^2s^{-1}]$, tal que las unidades sean consistentes en la Ecuación (14). Se asume que D es independiente de la concentración, una aproximación válida sobre un amplio rango de condiciones.

La ley de Fick establece una relación entre la densidad de corriente y el cambio por unidad de longitud (o gradiente) de la concentración de la sustancia.

Al combinar la ley de Fick con el principio de conservación de moléculas (en el cual el número de moléculas debe permanecer constante), se obtiene una relación en la cual solo la concentración aparece. Para este propósito se considera un elemento de volumen orientado paralelamente a la dirección de la difusión como se muestra en la Figura 13, con una longitud dx y una sección transversal de área S . Su volumen es,

$$dV = \text{área de sección transversal} \cdot \text{longitud} = S \cdot dx$$

El número de partículas dentro del volumen a un instante dado es $n \cdot dV = n \cdot S \cdot dx$. El flujo entrante (es decir, el número de partículas que ingresa en el lado izquierdo por unidad de tiempo) es $j \cdot S$, y el flujo saliente a través del lado derecho es $j' \cdot S$.

La ley de conservación del número de moléculas requiere que la tasa de acumulación sea igual a la diferencia entre los flujos entrante y saliente. Lo cual es,

$$\text{Tasa de acumulación} = \text{flujo entrante} - \text{flujo saliente}$$

Por lo tanto se tiene,

$$\begin{aligned} \text{Tasa de acumulación} &= j \cdot S - j' \cdot S \\ \text{Tasa de acumulación} &= -(j' - j) \cdot S = -(dj) \cdot S = -\frac{\partial j}{\partial x} \cdot S \cdot dx \end{aligned}$$

Donde $dj = j' - j$ es la diferencia entre la densidad de corriente entre la salida y la entrada. Sin embargo la tasa de acumulación es igual al incremento por unidad de tiempo del número de partículas por unidad de volumen $\left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)$, multiplicado por el volumen ($S \cdot dx$), esto es,

$$\text{Tasa de acumulación} = \frac{\partial n}{\partial t} \cdot S \cdot dx$$

Igualando los dos resultados para la tasa de acumulación y cancelando el factor común $S \cdot dx$, se obtiene,

$$\frac{\partial n}{\partial t} = - \frac{\partial j}{\partial x}$$

Utilizando la ley de Fick de la Ecuación (14) para eliminar el término j , se tiene,

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (15)$$

También conocida como la segunda ley de Fick, expresa la conservación del número de partículas. Esta ecuación contiene la segunda derivada con respecto al espacio pero sólo la primera derivada con respecto al tiempo.

Al considerar el caso particular de estado estacionario, es decir, cuando la concentración permanece constante con el tiempo se tiene que, $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$, luego la Ecuación (15) queda de la siguiente forma,

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = 0$$

Integrando se tiene,

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \text{constante}$$

Sin embargo cuando se cumple la condición anterior, el valor de j es constante de acuerdo a la Ecuación (14). Por lo tanto en estado estacionario la densidad de corriente es la misma a través de cualquier sección transversal, es decir, a través de cualquier elemento de volumen tal como lo indica la Figura 13, el número de partículas difusoras que ingresan por unidad de tiempo en una posición es el mismo número de partículas que sale por unidad de tiempo en la otra posición. Esto quiere decir que, no hay acumulación o cambio en la concentración en ningún punto del medio, un hecho que es consistente con el concepto de condición estacionaria. De la Ecuación (14), se tiene que,

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{-j}{D}$$

Integrando dicha expresión, se obtiene,

$$\int_{n_0}^n dn = \int_0^x -\frac{j}{D} dx$$

Donde n_0 es la concentración de partículas en $x = 0$. Luego, dado que $\frac{j}{D}$ es constante en este caso, se tiene,

$$n = -\frac{j}{D} \cdot x + n_0$$

Este resultado indica que la concentración de partículas disminuye linealmente con la distancia a lo largo de la dirección de difusión, como se muestra en la Figura 14. La expresión anterior puede ser escrita como,

$$j = D \cdot \frac{n_0 - n}{x}$$

Esta expresión es equivalente a la ley de Fick dada por la Ecuación (14) pero sólo es válida para una corriente constante. De lo contrario la ecuación anterior entrega la corriente promedio entre dos puntos separados por una distancia x .

Cabe mencionar que bajo condiciones estacionarias es necesario alimentar partículas a una tasa constante en un lado y extraerlas a la misma tasa en el otro lado. Esto quiere decir que, cuando la concentración se mantiene constante en ambos extremos del tubo de largo L mostrado en la Figura 14, el mismo número de partículas que ingresa por unidad de tiempo en $x = 0$ debe ser extraído por unidad de tiempo en $x = L$. Si la concentración en $x = L$ es n_1 , entonces la ecuación anterior entrega lo siguiente,

$$j = D \cdot \frac{n_0 - n_1}{L}$$

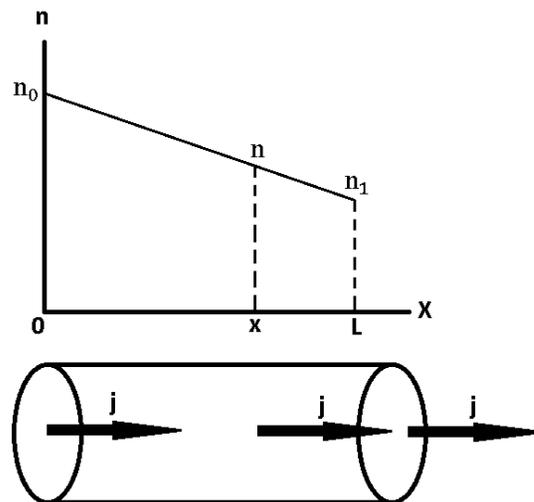


Figura 14: Cambio en la concentración debido a una difusión estacionaria a lo largo de un tubo, modificado de Alonso & Finn.

2.8.2 Medio semi infinito

Dado un medio semi infinito mostrado en la Figura 15, el cual se extiende en la dirección x desde $x = 0$ hasta $x = \infty$. Las coordenadas $Y - Z$ se extienden desde $-\infty$ hasta $+\infty$, pero no son de interés debido a que la difusión se lleva a cabo sólo en la dirección x . Por lo tanto, la Ecuación (15) se aplica a la región $x \geq 0$. En el instante $t \leq 0$, la concentración es C_{A_0} para $x \geq 0$. En el instante $t = 0$, la superficie del medio semi infinito en $x = 0$ se lleva de forma instantánea hacia la concentración $C_{A_s} > C_{A_0}$ y se mantiene así para $t > 0$. Por lo tanto, ocurre una difusión hacia el medio. Sin embargo dado que el medio es infinito en la dirección x , la difusión no se puede extender a $x = \infty$ y por lo tanto, cuando $x \rightarrow \infty$, $C_A = C_{A_0}$ para todo $t \geq 0$. Debido a que la ecuación diferencial parcial (15) y tanto su condición de borde en el tiempo (inicial) como sus dos condiciones de bordes en el espacio son lineales en la variable dependiente, C_A , se puede obtener una solución exacta de la segunda ley de Fick.

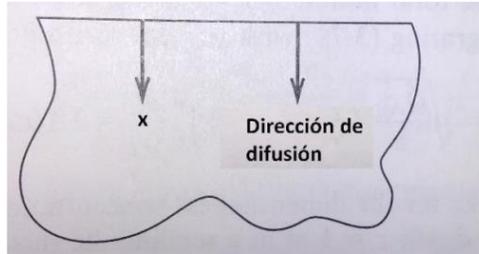


Figura 15: Difusión unidimensional en un medio semi infinito. Modificado de Seader et al. (1998).

El resultado, en función del cambio de concentración fraccional lograda es,

$$\theta = \frac{C_A - C_{A_0}}{C_{A_s} - C_{A_0}} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{AB} \cdot t}}\right) \quad (16)$$

Donde D_{AB} es la difusividad de la especie difusora A a través de B, erfc es la función error complementario, la cual se relaciona con la función error, erf , mediante la siguiente expresión,

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\eta^2} d\eta \quad (17)$$

La Ecuación (16) se utiliza para determinar la concentración en el medio semi infinito, como una función del tiempo y la distancia desde la superficie. Por lo tanto, se aplica con mayor rigurosidad a la difusión en sólidos y también con líquidos inactivos y gases cuando el medio está diluido en el soluto difusor.

Al utilizar la Ecuación (16) con $C_{A_0} = 0$ se obtiene la siguiente expresión,

$$C_A(x, t) = C_{A_s} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{AB} \cdot t}}\right) \quad (18)$$

En el presente trabajo esta relación se utilizará para estimar la difusividad radial de un reactivo a través de un flujo de burbujas.

2.9 Conclusiones de la revisión bibliográfica

De la revisión bibliográfica realizada se extraen las siguientes conclusiones:

1. La determinación del parámetro “velocidad superficial de gas” para evaluar la dispersión de gas en celdas de flotación presenta dificultades en términos no solo de la representatividad del muestreo sino en términos del valor real. Habitualmente se estima dicho parámetro utilizando tubos muestreadores de diámetros pequeños. Se requiere de una vía, al menos matemática, que permita estimar el valor real de velocidad superficial de gas.
 2. El movimiento preferencialmente ascendente de burbujas de gas en un líquido no tiene asociada una dispersión homogénea de gas y el movimiento descendente de líquido (relativo al gas) también sufre desviaciones de la realidad.
 3. El movimiento relativo de fases genera patrones de flujo que pueden afectar la transferencia de masa de reactivos (superficialmente activos y no superficialmente activos). Dicha transferencia de masa (o el inverso: la resistencia a la transferencia de masa) se puede evaluar en términos de una difusividad equivalente.
 4. Otro parámetro para determinar la dispersión de gas en una celda de flotación es el diámetro de Sauter. Más allá de que este parámetro haya sido desarrollado para otra aplicación industrial que no es la flotación de minerales, se trata de un valor sesgado hacia tamaños mayores de gota, o en el caso de flotación, hacia tamaños mayores de burbujas. Naturalmente, dicha información tiene valor, sin embargo, no permite definir el efecto neto de una distribución de tamaños de burbuja definido sobre la eficiencia del proceso. Por esta razón es recomendable calcular de manera adicional los diámetros d_{10} y d_{21} los cuales pueden entregar información más certera de una distribución de burbujas.
- . Cada uno de los puntos anteriores serán considerados en este trabajo.

3 Materiales y métodos

En este trabajo se utilizaron dos sistemas experimentales. La metodología implementada en cada uno de ellos se detalla en esta sección.

3.1 Estudio de resistencia a la transferencia de masa radial de un flujo de burbujas en celda cuasi 2-D

3.1.1 Setup celda cuasi 2-D

La celda cuasi 2-D es un equipo diseñado por Minerals & Metals Characterisation And Separation Research Group (M²CSRG). Este dispositivo emula un corte de una celda de flotación y posee una estructura de acero inoxidable. Posee los siguientes componentes:

- Una base de largo: 62 [cm], ancho: 10 [cm] y alto: 4.5 [cm].
- Una zona columnar de largo: 59 [cm], ancho: 2.6 [cm] y alto: 60 [cm].

La zona columnar posee dos placas de vidrio paralelas, cada una de 0.6 [cm] de grosor, separadas a una distancia de 1.2 [cm]. La celda posee un inyector de gas en su base del tipo lanza con orificios conectada a un cilindro de gas. En los experimentos se utilizó gas Nitrógeno (Anexo 6.1.1).

Las Figuras 16-18 y la Tabla 2 muestran el equipo con sus respectivas medidas.

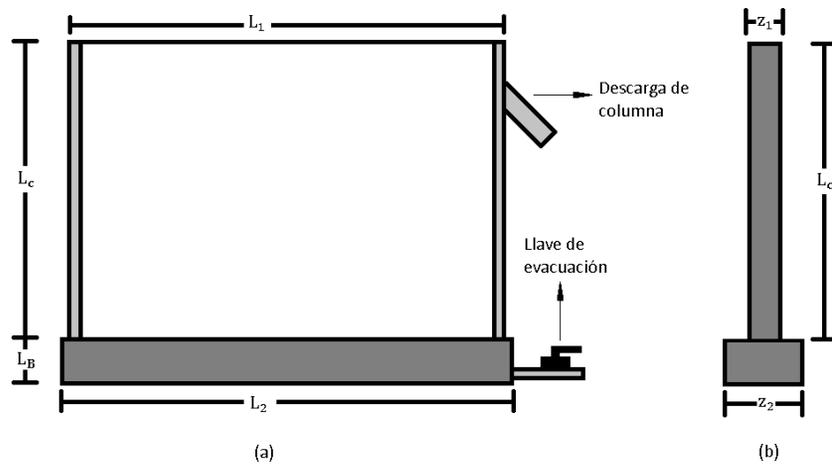


Figura 16: Esquema celda cuasi 2-D, (a) vista frontal (b) vista perfil.



Figura 17: Celda cuasi 2-D (vista frontal).



Figura 18: Celda cuasi 2-D (vista perfil).

Tabla 2: Medidas celda cuasi 2-D.

Base	Largo, L_2 [cm]	62
	Ancho, z_2 [cm]	10
	Alto, L_B [cm]	4.5
	Capacidad ¹ [L]	2.5
Zona Columnar	Largo, L_1 [cm]	59
	Ancho, z_1 [cm]	2.6
	Alto, L_c [cm]	60

Se trabajó solo con un tren de burbujas confinado entre dos paredes que aislan el tren del resto del sistema. Para esto se selló uno de los agujeros de la lanza utilizada con huincha aisladora. Esto generó un tren de burbujas marginal y uno dominante siendo este último utilizado en el caso de estudio.

Las Figuras 19-21 y la Tabla 3, muestran las dimensiones de la columna en la configuración experimental y el volumen de control utilizado.

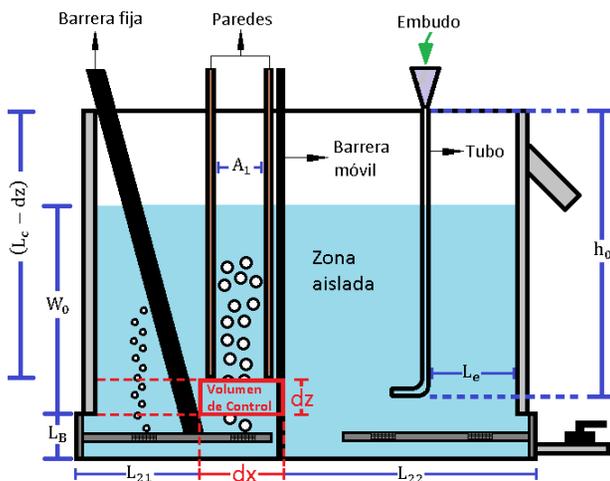


Figura 19: Esquema de celda cuasi 2-D en configuración experimental, vista frontal con corte transversal en la base (volumen de control indicado con color rojo).



Figura 20: Celda cuasi 2-D en configuración experimental.

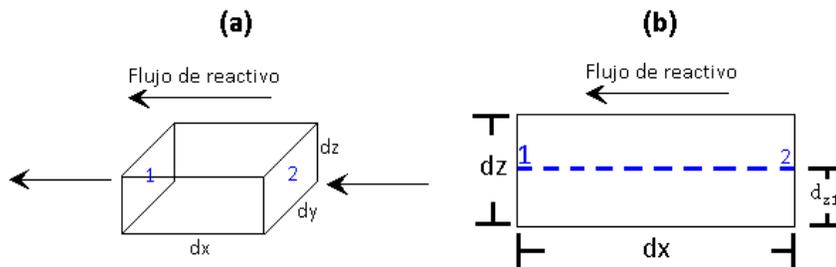


Figura 21: Esquema general de volumen de control (Puntos N°1 y N°2 indican posición de toma de muestras).

¹ Capacidad real de llenado la cual es menor al volumen entregado por las dimensiones de la base.

Tabla 3: Dimensiones de columna 2-D en montaje experimental sin inyección de aire.

Longitud L_{21} [cm]	15.0
Longitud L_{22} [cm]	33.0
Separación tubo, L_e [cm]	15.0
Profundidad tubo, h_0 [cm]	55.5
Distancia entre paredes, A_1 [cm]	6.4
Nivel de agua zona columnar ² , W_0 [cm]	39.0
Volumen de agua del sistema ³ [L]	5.0
Largo volumen de control, d_x [cm]	14.0
Ancho volumen de control, d_y [cm]	1.2
Alto volumen de control, d_z [cm]	6.5
Altura de toma de muestras ⁴ , d_{z1} [cm]	4.0

Las Figuras 22-24 muestran en detalle el volumen de control.

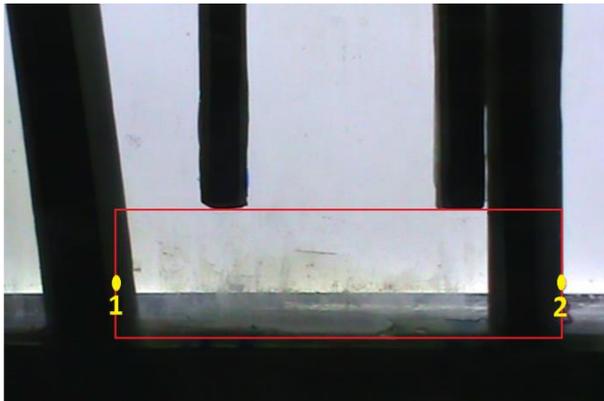


Figura 22: Puntos de muestreo N°1 y N°2 en volumen de control (sin inyección de aire y barrera móvil instalada).

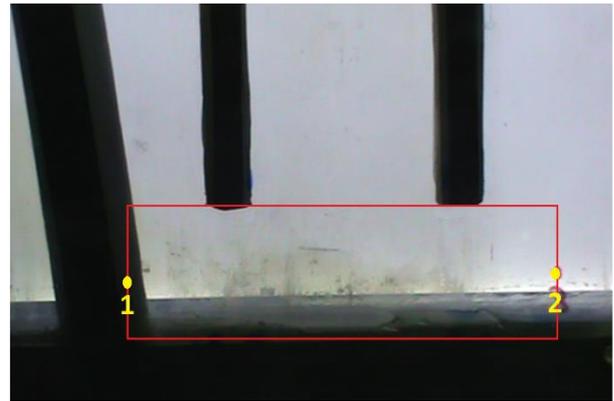


Figura 23: Puntos de muestreo N°1 y N°2 en volumen de control (sin inyección de aire y sin barrera móvil).



Figura 24: Puntos de muestreo N°1 y N°2 en volumen de control (con inyección de aire y barrera móvil instalada).

² No considera la inyección de aire.

³ Considera el volumen de agua tanto en la base como en la zona columnar a un nivel de agua de 39 [cm].

⁴ Medido con respecto a la parte superior de la base de la ceda.

3.1.2 Experimento N°1: Caracterización de flujo de aire y movimiento de líquido descendente teórico vs. real

De acuerdo a la configuración experimental mostrada en la sección 3.1.1, se determinó el flujo de gas del tren dominante mediante el método de la probeta invertida (Anexo 6.1.2), posteriormente utilizando el área entre las paredes, se calculó el valor de J_g de acuerdo a la Ecuación (1). Se buscó un valor de J_g que asegure un régimen vórtice, es decir, mayor a 0.4 y menor a $1.0 \left[\frac{cm}{s} \right]$ de acuerdo a Tzeng et al. (1993). Dicho tren fue el caso de estudio. Posteriormente mediante análisis de fotografía se midió el tamaño promedio de burbuja (d_{10} , d_{21} y d_{32}) y por consiguiente se calculó la velocidad superficial de área de burbuja (S_{b1}).

Luego mediante el uso de especies químicas solubles con coloración (o colorante), se realizó un registro visual que permitió estudiar el comportamiento del sistema tanto en ausencia como en presencia de aire. En este último caso adicionalmente se estimó la velocidad ascendente de burbuja y descendente del líquido. Las especies utilizadas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Condiciones de trabajo para registro visual.

Condición	Presión de trabajo [psi]	Especie utilizada	
Sin aire	-	Colorante	Sulfato
Con aire	10	Colorante	-

Para obtener el registro visual con y sin inyección de aire primero se agregó en el embudo la dosis de colorante/sulfato (20 g. para el primero y 40 g. para el segundo) diluida en un volumen de 500 [mL] provenientes del sistema mediante la llave de evacuación, seguidamente se retiró el conjunto embudo-tubo. Luego se agitó la solución ubicada en el sector aislado de la celda durante un tiempo de 30 [s], para posteriormente retirar la barrera móvil. Finalmente se registró mediante una cámara de video el comportamiento del sistema.

Las Figuras 25-26 muestran el estado final del sistema al utilizar sulfato y colorante sin inyección de aire.



Figura 25: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en $t \geq 2:00$ [min].



Figura 26: Fotografía del sistema sin flujo de aire en equilibrio para colorante.

En base a la tonalidad de las especies de las Figuras 25-26, se pudo observar que el equilibrio alcanzado por el sulfato es idéntico al caso de colorante, es decir, el volumen de control quedó a la misma concentración que la zona aislada. Por lo tanto el punto N°1 igualó su concentración al punto N°2.

Por esta razón se decidió utilizar el modelo de medio semi infinito (sección 2.8.2) para estimar la resistividad ya que dicha solución es la que mejor se adecuó a las características del sistema, es decir, esta solución propone que la concentración de reactivo es siempre constante en un extremo del volumen de control (para todo instante de tiempo en la posición inicial $x = 0$), mientras que a lo largo de este ($x > 0$) hay un aumento de concentración en función de la posición y del tiempo. Este procedimiento se detalla en la siguiente sección.

3.1.3 Experimento N°2: Estudio de resistividad al transporte de reactivo

De acuerdo a la configuración experimental mostrada en la sección 3.1.1, se determinó la concentración de reactivo en función del tiempo en dos zonas del volumen de control mediante muestreo. Esto se realizó para cuatro casos, los cuales involucraron el uso de espumante y sulfato de cobre tanto en ausencia como en presencia de aire, siendo este último el caudal determinado en base a las indicaciones de la sección 3.1.2 (Tabla 5).

Tabla 5: Condiciones de trabajo para toma de muestras.

Condición	Presión de trabajo [psi]	Reactivo utilizado	
Sin aire	-	Espumante	Sulfato
Con aire	10	Espumante	Sulfato

Los puntos de muestreo se ubicaron en los extremos del volumen de control y a una profundidad de 56 [cm] medida desde la parte superior de la zona columnar.

El muestreo se realizó utilizando un conjunto de tubos y jeringas, los cuales permitieron alcanzar los puntos N°1 y N°2. Cada muestra se tomó utilizando un conjunto tubo-jeringa distinto para minimizar el error de medición⁵.

Las Figuras 27-28 muestran el conjunto tubo-jeringa y su disposición dentro de la celda, mientras que el cálculo del volumen por muestra se presenta en la Tabla 6.

⁵ Las muestras se tomaron por dos personas en simultáneo.



Figura 27: Conjunto tubo-jeringa.

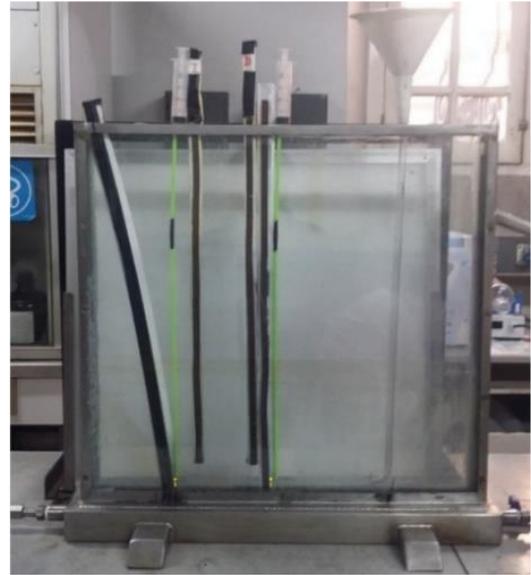


Figura 28: Conjunto tubo-jeringa inserto en celda columnar 2-D.

Tabla 6: Cálculo volumen de muestra para prueba experimental.

Largo tubo, $(L_c - d_{z1})$ [cm]	56
Longitud de agua en tubo, $(W_0 - d_{z1})$ [cm]	35
Radio tubo [cm]	0.2
Volumen de agua en tubo [mL]	4.4
Volumen extraído [mL]	5.0
Volumen de muestra (volumen tubo) [mL]	7.0

En los puntos N°1 y N°2 se extrajo un volumen de líquido de 5 [mL] el cual quedó dentro de la jeringa, y un volumen de 7.0 [mL] que quedó dentro del tubo respectivo. Este último corresponde al volumen de la muestra.

La Tabla 7 muestra la dosis de reactivo utilizada en función de la concentración requerida.

Tabla 7: Dosis de reactivo a utilizar en pruebas experimentales.

Medidas/Reactivo	Espumante	Sulfato
Concentración requerida [gpl]	0.3	3.93
Volumen del sistema [L]	5.0	5.0
Dosis de reactivo [g]	1.5	19.65

Para realizar el muestreo ya sea con o sin la inyección de aire, primero se agregó en el embudo la dosis de reactivo diluida en un volumen de 400 [mL] provenientes del sistema mediante la llave de evacuación, seguidamente se retiró el conjunto embudo-tubo.

Después se agitó la solución ubicada en el sector aislado durante 30 [s], para posteriormente sacar una muestra inicial en el punto N°2. Luego se retiró la barrera móvil y se inició el muestreo en los puntos N°1 y N°2 en intervalos de tiempo de 10 y 20 [s]. Finalmente se realizó un análisis de las

muestras mediante espectrofotometría para determinar la concentración de cada reactivo en función del tiempo en ambas posiciones (Anexo 6.4).

Una vez obtenidas las curvas experimentales de concentración vs. tiempo, se realizó un ajuste de los datos con la Ecuación (18) de medio semi infinito para estimar el coeficiente de difusión en cada condición de trabajo. Para ajustar los datos a dicho modelo se tomaron las siguientes consideraciones:

- Se asumió que la concentración en el punto N°2 (C_{A_s}) es constante, mientras que $C_A(x, t)$ con $x = 14$ [cm], equivale a la concentración del punto N°1.
- Para cada reactivo, el valor de C_{A_s} utilizado fue el promedio de los máximos valores alcanzados en el punto N°2 en las condiciones sin/con inyección de aire.
- El ajuste se realizó mediante el método de los mínimos cuadrados para determinar el coeficiente de difusión D_{AB} . Esto se realizó para las cuatro condiciones de trabajo.
- La resistividad se determinó mediante la siguiente expresión,

$$R [s \cdot cm^{-1}] = \frac{dx}{D_{AB}} \quad (19)$$

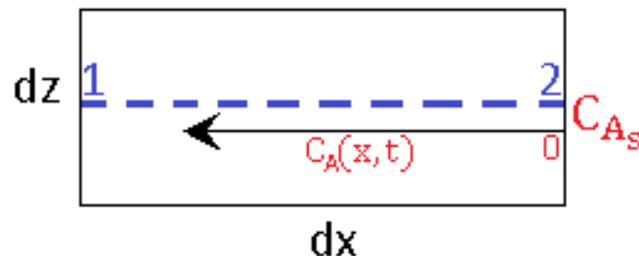


Figura 29: Sistema de referencia para modelo de medio semi-infinito en volumen de control.

3.2 Estudio de dispersión de gas y transporte axial reactivo en columna piloto 3-D

3.2.1 Setup columna piloto 3-D

Este equipo es una columna construida en acrílico. Posee un diámetro interno de 10.2 [cm] (d_c) y un largo de 3.2 [m] (L_c). La columna se encuentra apoyada en un soporte de 0.57 [m] de altura (H_s).

La columna posee un inyector de gas en su base del tipo lanza con orificios conectado a un compresor de aire (Anexo 6.2.1). Las Figuras 30-31 muestran la columna piloto.



Figura 30: Columna 3-D (parte inferior). Posee llave de descarga en su base.



Figura 31: Columna 3-D (parte superior). Posee contenedor de espuma unido a mangueras de descarga de rebalse.

3.2.2 Experimento N°1: Evaluación de mejoras en la medición de $J_{g \text{ local}}$ y efecto del diámetro del tubo muestreador

En la operación es común determinar el valor de la velocidad superficial de gas utilizando un tubo de sección definida, mediante un sistema del tipo probeta invertida. Este parámetro será denominado como $J_{g \text{ local}}$. De acuerdo a la teoría, tanto la distribución de tamaños de burbujas como el espaciamiento entre ellas no es uniforme dentro de la columna. Por esta razón se desconoce qué tan representativo es el valor de $J_{g \text{ local}}$.

En esta prueba se midió el valor de $J_{g \text{ local}}$ con tres tubos de diferente diámetro, para cuatro condiciones de trabajo. Por lo tanto los objetivos de esta prueba fueron los siguientes:

- Estudiar el comportamiento de $J_{g \text{ local}}$ al variar el diámetro del tubo muestreador, durante cada condición de trabajo.
- Realizar una estimación del valor de $J_{g \text{ global}}$.

Las condiciones de trabajo son detalladas en la Tabla 8.

Tabla 8: Condiciones de trabajo a 0.4 [bar] para experimento N°1.

Inyector	Concentración requerida [gpl]	Diámetro tubo [cm]		
		0.8	1.4	4.4
Grueso	0.3	0.8	1.4	4.4
Fino	0.3			
Grueso	0.1			
Fino	0.1			

La Figura 32 muestra el esquema general del método de la probeta invertida.

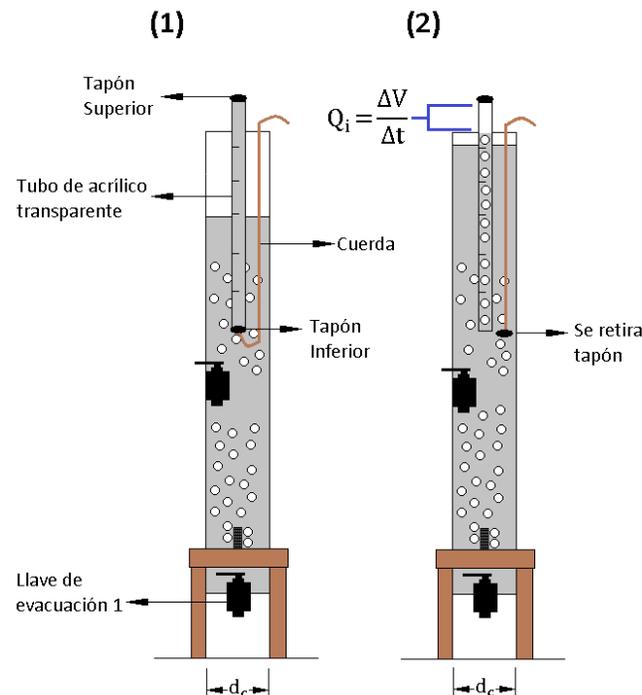


Figura 32: Esquema general método de probeta invertida en celda columnar 3-D.

El método de la probeta invertida consideró lo siguiente:

- Se definió una altura inicial de columna de agua (\bar{H}_w) de 2.60 [m].
- El volumen de agua utilizado dentro del tubo, fue parte del volumen inicial de la columna de agua. Por lo tanto la altura experimental de la columna de agua (H_w) fue menor.
- Cada tubo se sumergió a una profundidad de 50 [cm] de la columna de agua (Anexo 6.2.2 para mayor detalle).

En base a las consideraciones anteriores, la Figura 33 y la Tabla 9 muestran el esquema y las medidas utilizadas en la columna con el método de la probeta invertida.

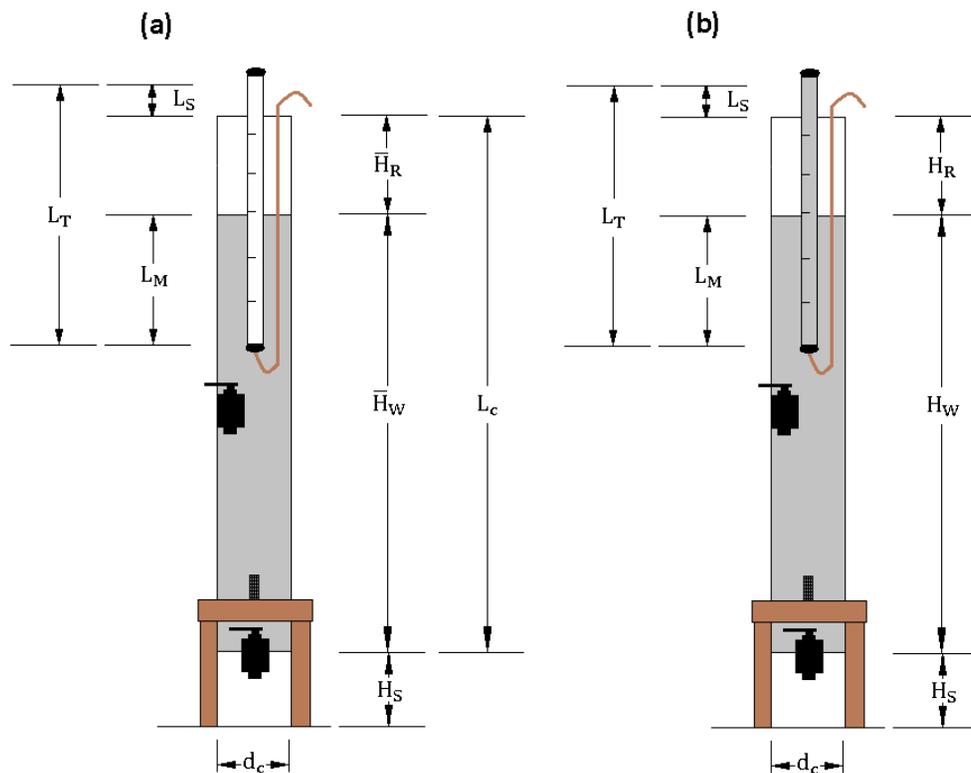


Figura 33: Esquema de columna 3-D con método de probeta invertida (sin inyección de aire). (a) condición inicial (b) condición experimental.

Tabla 9: Medidas de columna 3-D con método de probeta invertida (sin inyección de aire).

Datos columna	Diámetro interno tubo [cm]		
	0.8	1.4	4.4
Longitud del tubo en superficie, L_S [m]	0.20		
Longitud del tubo sumergido, L_M [m]	0.50		
Longitud del tubo, L_T [m]	1.30		
Longitud de cada tapón dentro del tubo [cm]	0.60	1.00	2.50
Longitud del tubo con agua [m]	1.29	1.28	1.25
Volumen estimado del tubo con agua [L]	0.065	0.20	1.90
Altura de columna del tubo con agua [m]	0.01	0.02	0.23
Altura inicial de columna de agua, \bar{H}_W [m]	2.60		
Altura inicial de columna sin agua, \bar{H}_R [m]	0.60		
Altura experimental de columna de agua, H_W [m]	2.59	2.58	2.37
Altura experimental de columna sin agua, H_R [m]	0.61	0.62	0.83
Volumen columna de agua [L]	21.2	21.0	19.3
Volumen de agua del sistema [L]	21.25		

La Tabla 10 muestra la dosis de espumante utilizada en la columna en función de la concentración requerida.

Tabla 10: Dosis de espumante a agregar en función de la concentración requerida del sistema.

Volumen de agua del sistema [L]	21.25	
Concentración de espumante requerida [gpl]	0.1	0.3
Dosis de espumante [g]	2.1	6.4

Dada una condición de trabajo y un tubo, para realizar las mediciones primero se agregó la dosis de espumante en la parte superior de la columna de agua, diluida en un volumen de 3.0 [L], obtenido mediante la llave de evacuación basal. Después se inyectó aire durante un tiempo de 5.0 [min] para que el reactivo se distribuyera de manera uniforme en el volumen de agua. Posteriormente se detuvo la inyección de aire.

Las pérdidas de agua por rebalse se reincorporaron a la columna mediante el sistema de baldes. Esto con el fin de no desperdiciar espumante. Luego se llenó el tubo con el volumen de líquido proveniente de la columna.

Se dispuso el tubo de manera vertical en la parte superior de la columna sumergido en 50 [cm] de la columna de agua, seguidamente se inyectó aire en la columna y tras un tiempo de 12 [s] se retiró el tapón inferior mediante el sistema de cuerdas.

Finalmente se registró el descenso del nivel de agua dentro del tubo con la cámara de video, para ello, una vez retirado el tapón inferior del tubo muestreador, se esperó a que las burbujas ingresaran por este hasta llegar al extremo superior. Si al menos una burbuja lograba llegar al extremo superior se iniciaba la medición del tiempo, la cual se detuvo cuando todo el volumen de agua de la porción externa del tubo fuese desplazado (longitud de 20 cm).

La Tabla 11 resume el número de repeticiones para cada tubo en una condición de trabajo dada, junto con el respectivo consumo de espumante.

Tabla 11: Número de mediciones y uso de espumante requerido a presión de trabajo 0.4 [bar].

Inyector	Concentración requerida	Diámetro interno tubo [mm]			Espumante utilizado en 18 mediciones [g]
		8	14	44	
Grueso	0.3 gpl	3 repeticiones	3 repeticiones	3 repeticiones	6.4
Fino	0.3 gpl				
Fino	0.1 gpl				
Grueso	0.1 gpl				2.1
Total		12 repeticiones	12 repeticiones	12 repeticiones	8.5

De la Tabla 11 se observa un total de 36 repeticiones y un consumo total de espumante de 8.5 [g].

3.2.3 Experimento N°2: Dispersión axial de reactivo superficialmente activo

El objetivo principal de esta prueba fue el siguiente:

- Determinar cómo el movimiento de líquido descendente afecta el transporte de espumante en la dirección axial de la columna.

Para esto se tomaron muestras de 45 [mL] en la base, en la zona media y en la parte superior de la columna cada 30 [s], durante un tiempo de 6.0 [min]⁶ (Figura 34).



Figura 34: Puntos de toma de muestras a lo largo de la columna (a) Llave de evacuación basal (b) Llave de evacuación en cota media (c) Parte superior.

⁶ Las muestras se tomaron de forma manual por tres personas en simultáneo.

Las condiciones de trabajo son detalladas en la Tabla 12.

Tabla 12: Condiciones de trabajo a 0.4 [bar] para experimento N°2.

Inyector	Concentración requerida [gpl]
Grueso	0.3
Fino	0.3
Grueso	0.1
Fino	0.1

La Figura 35 y la Tabla 13 muestran el esquema y las medidas utilizadas en la configuración experimental.

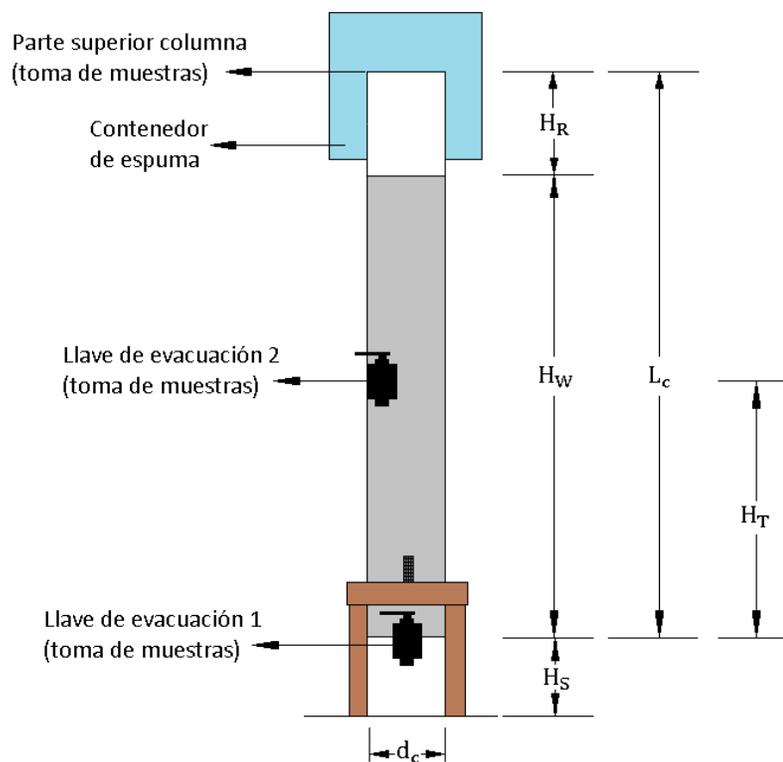


Figura 35: Configuración experimental de columna 3-D para toma de muestras (sin inyección de aire).

Tabla 13: Medidas de columna 3-D durante toma de muestras (sin inyección de aire).

Datos columna	
Cota llave de evacuación cota media, H_T [m]	1.56
Altura de columna sin agua, H_R [m]	0.60
Altura columna de agua, H_W [m]	2.60
Volumen columna de agua [L]	21.25
Concentración de espumante requerida [gpl]	0.1 0.3
Dosis de espumante [g]	2.1 6.4

Para realizar el muestreo en cada condición de trabajo primero se agregó la dosis de espumante en la parte superior de la columna de agua, diluida en un volumen de 3.0 [L], obtenido mediante la llave de evacuación basal. Luego tras 2.0 [min] posteriores a la adición de espumante se prosiguió con la inyección de aire y se inició el muestreo. Cabe señalar que la toma de muestras en la parte superior de la columna se realizó siempre que hubo rebalse al momento de la extracción.

Finalmente tras la toma de muestras en cada condición de trabajo, se realizó su posterior análisis mediante espectrofotometría para determinar la concentración en cada zona de la columna en función del tiempo (Anexo 6.4).

3.2.4 Experimento N°3: Evaluación detallada de la distribución de tamaños de burbuja

En esta prueba se busca caracterizar el tren de burbujas utilizado en los experimentos anteriores (secciones 3.2.2 y 3.2.3).

Por lo tanto los objetivos fueron los siguientes:

- Determinar el tamaño promedio de burbuja en función del tiempo tras la adición de espumante.
- Determinar distribuciones de tamaños de burbuja.

Las condiciones de trabajo son detalladas en la Tabla 14 mientras que la distribución de tamaños de burbuja se obtuvo usando el equipo Bubble Viewer® (Anexo 6.2.3).

Tabla 14: Condiciones de trabajo a 0.4 bar para experimento N°3.

Inyector	Concentración requerida [gpl]
Grueso	0.3
Fino	0.3
Grueso	0.1
Fino	0.1

La Figura 36 y Tabla 15 muestran el esquema y las medidas de la columna utilizadas en la configuración experimental.

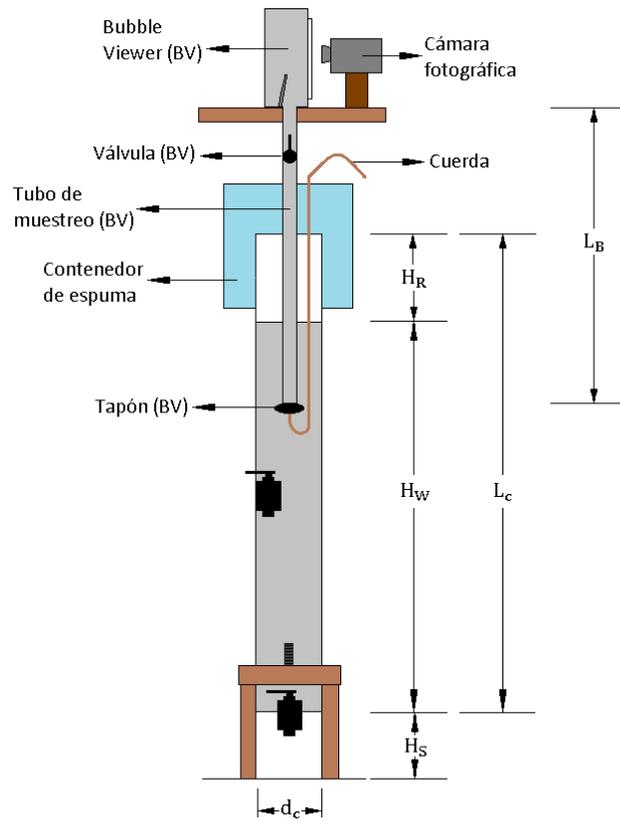


Figura 36: Configuración experimental de columna 3-D para uso de Bubble Viewer® (sin inyección de aire).

Tabla 15: Medidas de columna 3-D para uso de Bubble Viewer® (sin inyección de aire).

Datos columna		
Volumen Bubble Viewer® [L]	7.0	
Largo tubo de muestreo (BV), L_B [m]	2.08	
Diámetro interno tubo de muestreo [cm]	2.8	
Volumen de agua en tubo de muestro [L]	1.28	
Altura de columna sin agua, H_R [m]	0.60	
Altura columna de agua, H_W [m]	2.60	
Volumen columna de agua [L]	21.25	
Concentración de espumante requerida [gpl]	0.1	0.3
Dosis de espumante [g]	2.1	6.4

Una vez instalado el equipo Bubble Viewer® en la parte superior de la columna, para realizar la toma de fotografías en cada condición de trabajo primero se agregó la dosis de espumante en la parte superior de la columna de agua, diluida en un volumen de 3.0 [L], obtenido mediante la llave de evacuación basal.

Después se inyectó aire en la base de la columna y de manera simultánea se retiró el tapón del tubo de muestreo. Posteriormente se esperó un tiempo promedio de 12 [s] para que las burbujas se visualizaran en el equipo. Luego se inició la toma de fotografías (Tabla 16).

Tabla 16: Número de fotografías en el tiempo por condición de trabajo.

Condición de trabajo a 0.4 [bar]	N° de fotografías	Intervalo de tiempo [min]
Inyector Grueso – 0.3 gpl	241	2.0
Inyector Grueso – 0.1 gpl	241	2.0
Inyector Fino – 0.3 gpl	361	3.0
Inyector Fino – 0.1 gpl	361	3.0

Cabe señalar que el intervalo de tiempo al utilizar el inyector grueso fue menor en comparación al caso del inyector fino. Esto se debe a que al utilizar el inyector grueso el nivel de agua del equipo Bubble Viewer® descendió a mayor rapidez debido a la presencia de burbujas de mayor tamaño, lo que limitó el tiempo de toma de fotografías.

Tras la toma de fotografías se cerró la válvula del tubo de muestreo y se extrajo una muestra de agua de 45 [mL] del equipo Bubble Viewer® para medir la concentración de espumante mediante espectrofotometría.

Finalmente se realizó un posterior análisis de las fotografías mediante el software ImageJ®.

Para determinar la distribución de tamaños de burbujas, se realizaron histogramas iniciales mediante el software MS Excel para visualizar el comportamiento general de los datos. Dado que en dichos histogramas se observó una alta presencia de burbujas pequeñas se estableció un criterio para filtrar los datos por un diámetro mínimo (detalle en Anexo 6.3.3). Una vez realizado lo anterior se ajustaron los datos a una distribución Log-Normal mediante el software EasyFit.

La Figura 37 muestra de manera esquemática la metodología realizada en la columna piloto mientras que la Tabla 17 indica el tiempo empleado en cada actividad.

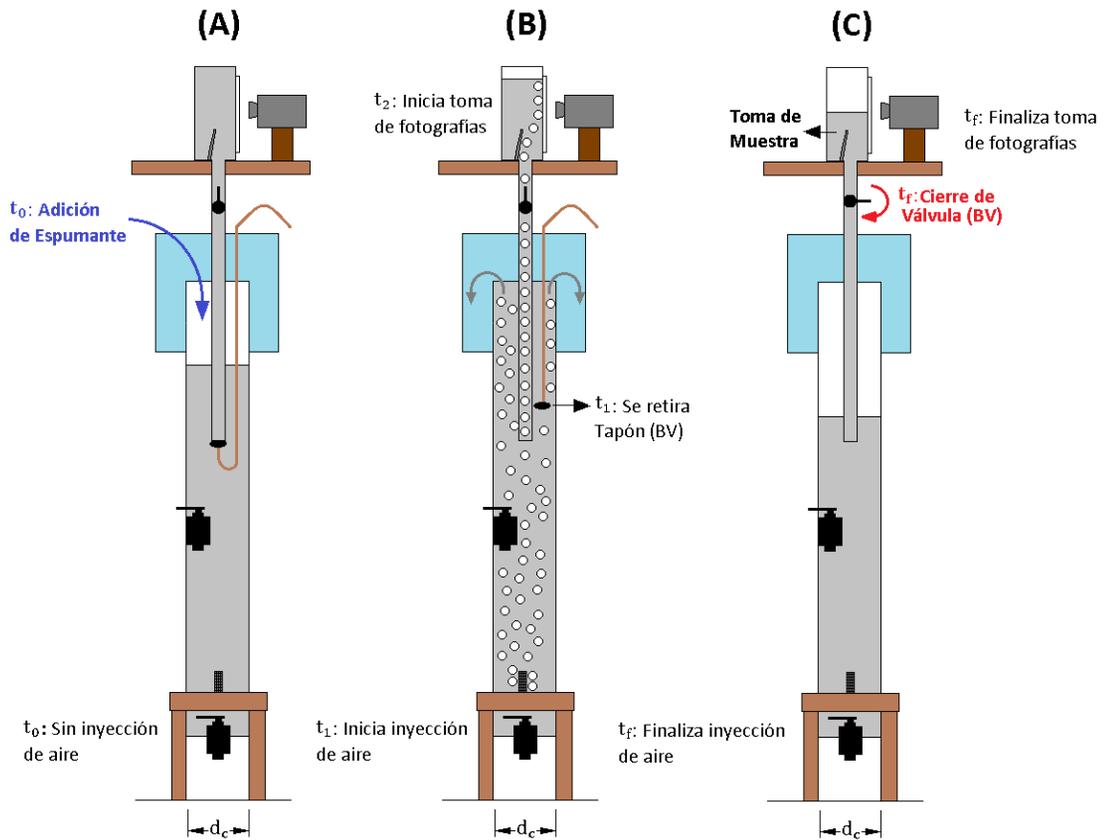


Figura 37: Esquema de metodología para uso de Bubble Viewer® en tercera prueba experimental.

Tabla 17: Distribución de tiempos de cada actividad para uso de Bubble Viewer®.

Actividad	Condición de trabajo a 0.4 [bar]				Tiempo de inicio (promedio) [min]	
	Inyector Grueso 0.3 gpl	Inyector Grueso 0.1 gpl	Inyector Fino 0.3 gpl	Inyector Fino 0.1 gpl	Variable	Valor [min]
Adición espumante [min]	2.0	2.0	2.0	2.0	t_0	0
Preparación B.V. ⁷ [min]	10.7	10.0	10.7	10.7	t_1	12.5
Inyección de aire ⁸ [s]	9.3	9.8	16.2	14.2	t_2	12.7
Toma de fotografías [min]	2.0	2.0	3.0	3.0	t_f	15.2

⁷ Actividades relacionadas con la preparación del equipo, tales como, su llenado con agua, realizar el enfoque de la cámara, colocar el tapón en el tubo de muestreo, limpiar las burbujas adheridas a la pantalla del recipiente para asegurar que no hubiese sesgo en los datos, etc.

⁸ Tiempo transcurrido desde la inyección de aire hasta que las burbujas se visualizan en el equipo.

4 Resultados y Discusión

4.1 Celda cuasi 2-D

4.1.1 Experimento N°1: Caracterización de flujo de aire y movimiento de líquido descendente teórico vs. real

Las variables de dispersión de gas del tren dominante se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18: Variables de dispersión de gas de tren dominante.

Caudal volumétrico, Q_g [$\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$]	3.5
Área de influencia, A_1 [cm^2]	7.68
Velocidad superficial de gas, J_g [$\frac{\text{cm}}{\text{s}}$]	0.46
Tamaño promedio burbuja, d_{32} [cm]	0.52
Tamaño promedio burbuja, d_{21} [cm]	0.46
Tamaño promedio burbuja, d_{10} [cm]	0.41
Velocidad superficial de área de burbuja S_{bl} [s^{-1}]	5.30

Para determinar la razón entre el área de líquido y de gas en el caso en que este último se encuentre homogéneamente distribuido en la sección transversal, se realizó un análisis de fotografía del tren de burbujas (Figura 38).

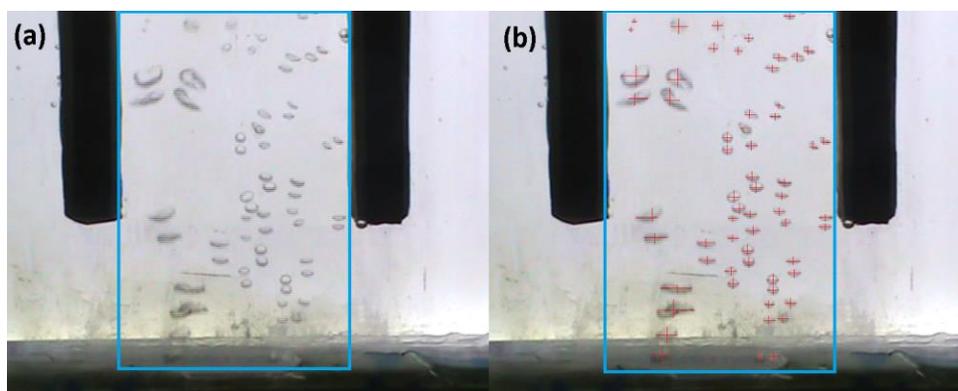


Figura 38: Fotografía de tren de burbujas dominante: (a) Zona analizada indicada por color celeste (b) Burbujas analizadas para cálculo de tamaño promedio d_{32} .

De la Figura 38 se calculó el tamaño promedio d_{32} , luego utilizando la superficie total de las burbujas analizadas se determinó el número de burbujas equivalentes que ocupan la misma área. Este cálculo se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19: Cálculo de número teórico de burbujas de diámetro equivalente.

N° de burbujas analizadas	61
Tamaño promedio burbuja, d_{32} [cm]	0.52
Área burbuja promedio [cm^2]	0.21
Área total burbujas analizadas [cm^2]	9.10
N° de burbujas equivalentes, $n_{T\text{Beq}}$	43
Ancho zona analizada [cm]	6.4
Alto zona analizada [cm]	15.6

Para determinar la ubicación espacial de las burbujas equivalentes en la zona analizada, se propuso la siguiente relación,

$$n_{Beq} = n_{BX} \cdot n_{BY} \quad (20)$$

Siendo n_{BX} el número de burbujas equivalentes en la dirección horizontal y n_{BY} el número de burbujas equivalentes en la dirección vertical, este último cumpliendo la siguiente condición,

$$n_{BY} = n_{BX} \cdot \left(\frac{\text{Alto zona analizada}}{\text{Ancho zona analizada}} \right) \quad (21)$$

Una vez determinado el número de burbujas equiespaciadas en cada dirección de la zona analizada, se puede determinar el área ocupada tanto por el gas como por el líquido. Finalmente dado que el caudal de líquido descendente debe ser igual en magnitud al caudal de gas ascendente de acuerdo a Nicklin (1965) se puede calcular el cambio en la velocidad de líquido al comparar el caso ideal con el real, mediante la siguiente expresión,

$$\vec{v}_{\text{líquido}} = \vec{v}_{\text{gas}} \cdot \left(\frac{A_{\text{gas}}}{A_{\text{líq}}} \right) \quad (22)$$

Los resultados se muestran en la Figura 39 mientras que el cálculo respectivo se presenta en la Tabla 20.

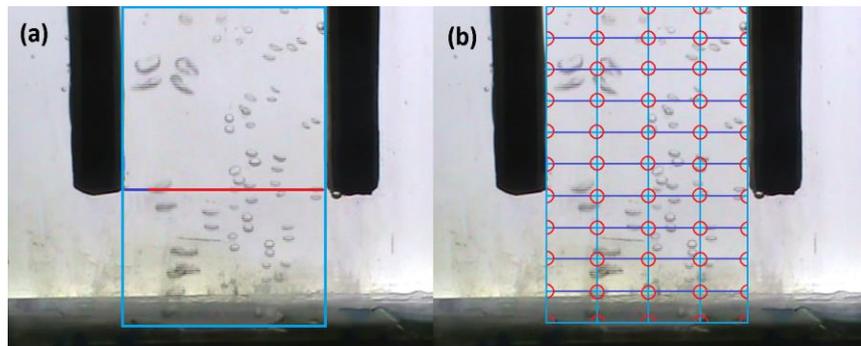


Figura 39: Área de líquido (línea color azul) y área de gas (línea color rojo) en tren de burbujas: (a) Caso real (b) Caso ideal.

Tabla 20: Cálculo de área de gas y de líquido.

Parámetro	Caso real	Caso ideal
n_{BX} teórico	-	4.2
n_{BX} real		4.0
n_{BY} teórico		10.2
n_{BY} real		10.0
Área gas, A_{gas} [cm ²]	6.7	2.5
Área líquido, $A_{\text{líq}}$ [cm ²]	0.9	5.2
Razón ($A_{\text{GAS}}/A_{\text{líquido}}$)	7.2	0.5

De estos resultados se observa que la velocidad del líquido en el caso real es mucho mayor que el caso ideal. Esto se debe principalmente a la baja sección transversal que posee el líquido para descender a diferencia del caso ideal donde esta área es mayor.

Por otro lado las Figuras 40-43 muestran el registro visual obtenido tanto para el uso de sulfato como de colorante sin inyección de aire.



Figura 40: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en $t: 0$ [s].

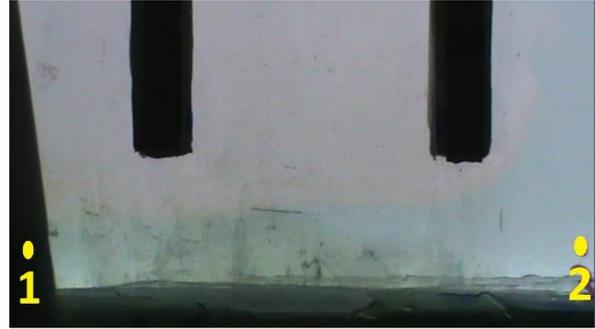


Figura 41: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en $t: 5$ [s].

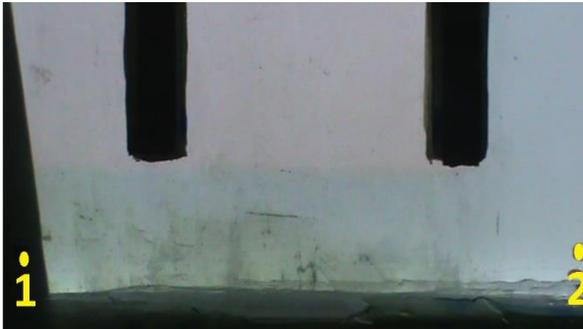


Figura 42: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en $t: 20$ [s].

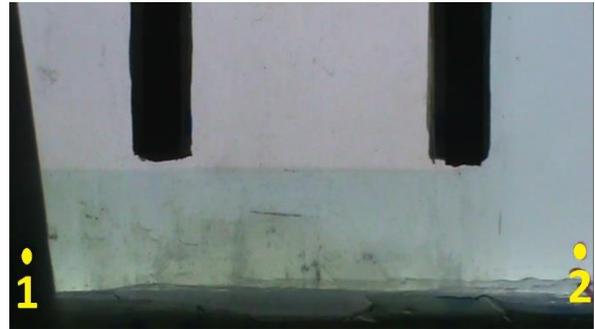


Figura 43: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en $t \geq 2:00$ [min].

En base a este registro, se pudo observar que la zona aislada se mantuvo a una concentración constante, la cual fue alcanzada por todo el volumen de control en un determinado instante de tiempo, razón por la cual se decidió utilizar el modelo de medio semi infinito, como se comentó en la sección 3.1.2.

Las Figuras 44-47 muestran el registro visual obtenido para el uso de colorante con inyección de aire.

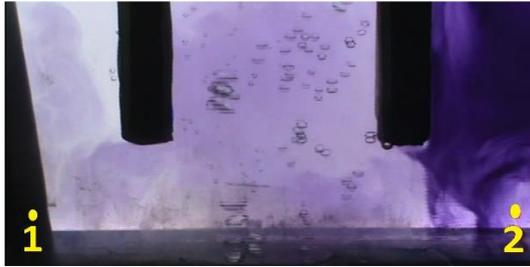


Figura 44: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 5 [s].

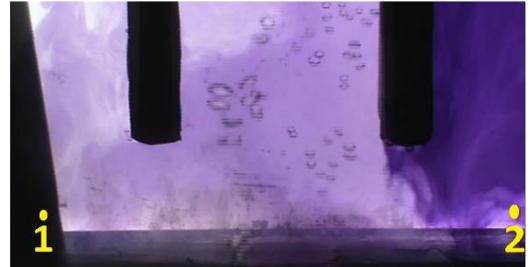


Figura 45: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 20 [s].

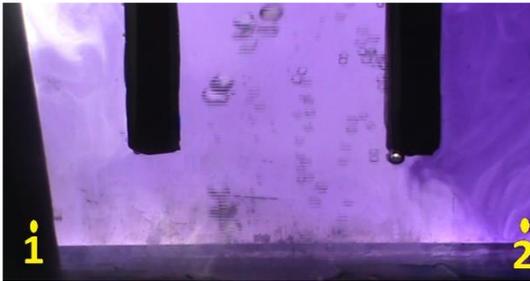


Figura 46: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 1:00 [min].



Figura 47: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 2:00 [min].

Del registro anterior se pudo determinar tanto la velocidad descendente del líquido como la ascendente de burbuja las cuales se detallan en la Tabla 21.

Tabla 21: Velocidad de líquido descendente y ascendente de burbuja de tren dominante.

Velocidad de líquido descendente, J_L $\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$	7.0
Velocidad de burbuja, u_B $\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$	27

Utilizando los datos de la Tabla 21 se puede estimar la velocidad de empuje mediante la Ecuación (13) de Nicklin (1965),

$$u_0 = 27 - 0.46 - 7.0$$

$$u_0 = 19.7 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$$

Del registro con inyección de aire se pudo observar que el tren de burbujas efectivamente actuó como una barrera al desplazar el colorante en la dirección axial. Sin embargo, dicha barrera no es impermeable en la dirección radial debido a que parte del colorante logra atravesarla llegando hacia el punto N°1. La razón de que el tren de burbujas no sea impermeable se debe a que el flujo no es continuo ni homogéneo, además presentó vórtices en su interior lo que permitió el paso de reactivo a través de este.

4.1.2 Experimento N°2: Estudio de resistividad al transporte de reactivo
 Las datos de concentración en el tiempo se presentan en las Figuras 48-51.

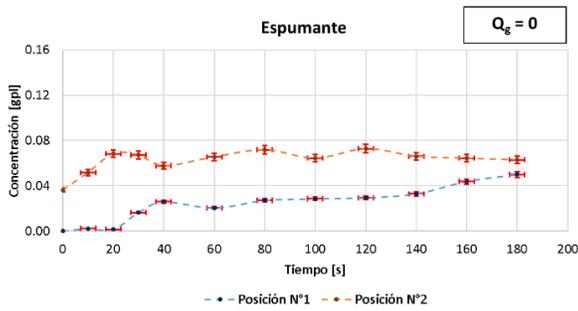


Figura 48: Datos experimentales de concentración – tiempo para espumante en cada posición sin flujo de aire.

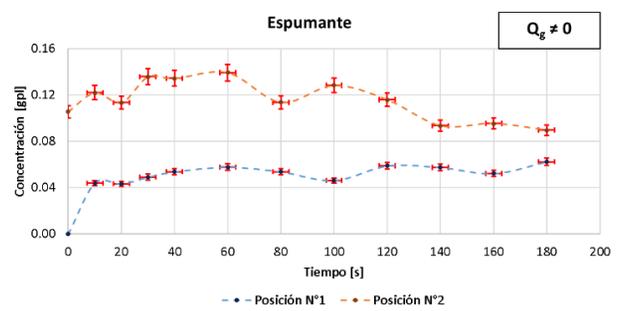


Figura 49: Datos experimentales de concentración – tiempo para espumante en cada posición con flujo de aire (J_g : 0.46 cm/s).

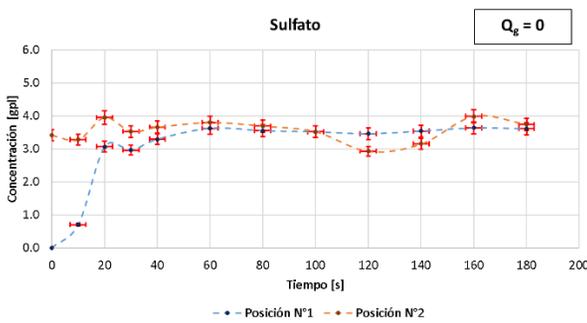


Figura 50: Datos experimentales de concentración – tiempo para sulfato en cada posición sin flujo de aire.

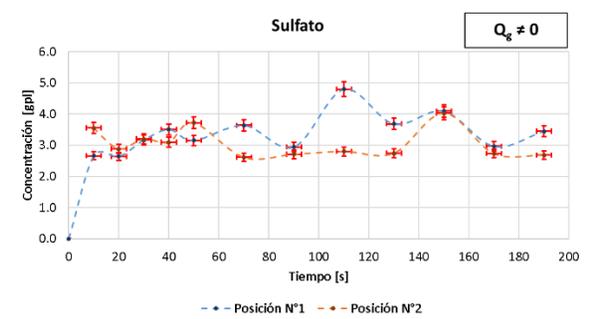


Figura 51: Datos experimentales de concentración – tiempo para sulfato en cada posición con flujo de aire (J_g : 0.46 cm/s).

Los resultados del ajuste al modelo semi infinito se muestran en las Figuras 52-55.

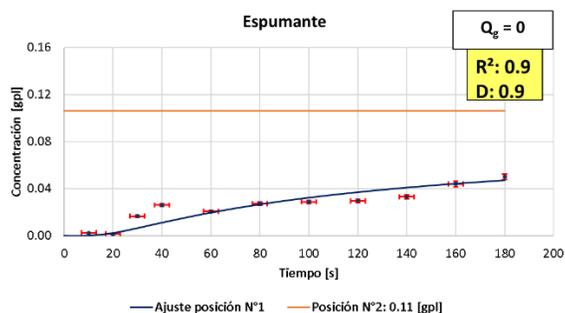


Figura 52: Ajuste de concentración de espuma en cada posición sin flujo de aire.

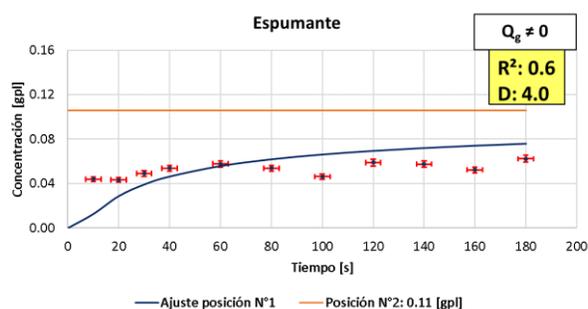


Figura 53: Ajuste de concentración de espuma en cada posición con flujo de aire ($J_g = 0.46 \text{ cm/s}$).

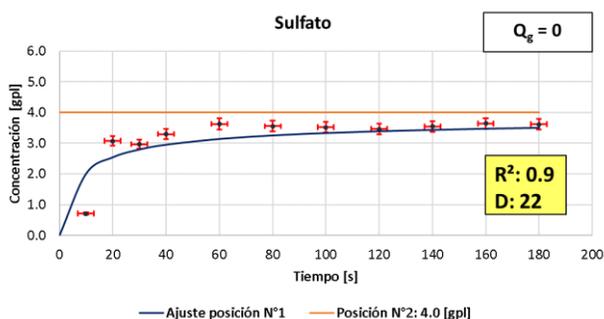


Figura 54: Ajuste de concentración de sulfato en cada posición sin flujo de aire.

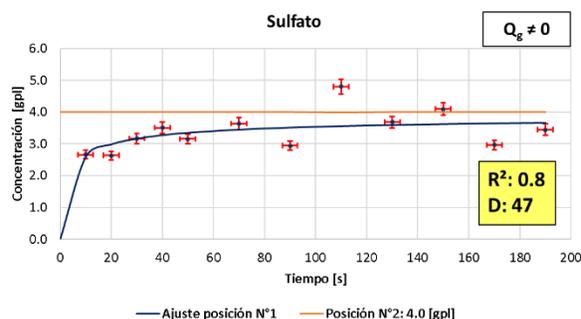


Figura 55: Ajuste de concentración de sulfato en cada posición con flujo de aire ($J_g = 0.46 \text{ cm/s}$).

Finalmente la Tabla 22 resume los resultados del ajuste realizado.

Tabla 22: Resumen de ajuste modelo semi infinito para espuma y sulfato.

Condición	Espuma			Sulfato		
	$R_{ap} [\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}]$	Error	R^2	$R_{ap} [\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}]$	Error	R^2
Sin aire ($Q_g = 0$)	15	$\pm 4.7\%$	0.9	0.6	$\pm 7.2\%$	0.9
Con aire ($J_g = 0.46 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$)	3.5	$\pm 6.2\%$	0.6	0.3	$\pm 7.5\%$	0.8

En base a los resultados de la Tabla 22 y a lo expuesto en la sección 4.1 se concluye lo siguiente:

- La resistividad del sulfato (reactivo presente en el seno del líquido) es menor que la del espuma (reactivo superficialmente activo), lo que es esperable debido a la alta solubilidad que posee el primero en agua por ser una sal. Por otro lado se observa que el modelo de medio semi infinito se ajustó mejor a la condición sin inyección de aire tanto para el uso de espuma como de sulfato.
- Al inyectar aire se observa que la resistividad para ambos reactivos disminuyó, esto sumado a lo observado en el registro audiovisual se desprende que el tren de burbujas facilitó la difusión de reactivo en la dirección radial. Por lo tanto el tren además de tener un componente de tipo barrera posee otro componente de tipo convectivo, este último facilitó la difusión de reactivo en la dirección radial.

4.2 Celda piloto 3-D

4.2.1 Experimento N°1: Evaluación de mejoras en la medición de J_g local y efecto del diámetro del tubo muestreador

El cálculo de J_g local se realizó mediante la siguiente expresión,

$$J_{g \text{ local}} = \frac{Q_{g \text{ local}}}{A_{\text{tubo}}} = \left(\frac{1}{A_{\text{tubo}}} \right) \cdot \frac{\Delta V_{\text{tubo}}}{\Delta t_{\text{medición}}} = \left(\frac{1}{A_{\text{tubo}}} \right) \cdot \frac{A_{\text{tubo}} \cdot \Delta h_{\text{tubo}}}{\Delta t_{\text{medición}}}$$

Lo que es equivalente a,

$$J_{g \text{ local}} = \frac{\Delta h_{\text{tubo}}}{\Delta t_{\text{medición}}} \quad (23)$$

Siendo Δh_{tubo} la porción externa del tubo de 20 [cm], y $\Delta t_{\text{medición}}$ el tiempo medido desde que la primera burbuja llega a la parte superior del tubo hasta desplazar todo el volumen de líquido de dicha porción. El parámetro $\Delta t_{\text{medición}}$ considera cuánto tardan las burbujas en ingresar al tubo e indirectamente la probabilidad de que dicho evento ocurra.

La Tabla 23 muestra un resumen del análisis estadístico realizado con los tiempos de medición⁹ (detalle en Anexo 6.3.1).

Tabla 23: Resumen análisis estadístico de tiempos de medición.

Condición de trabajo a 0.4 bar	Parámetro Estadístico	Diámetro interno tubo [cm]		
		0.8	1.4	4.4
		$\Delta \bar{t}_{\text{medición}}$ [s]		
Inyector Fino 0.1 gpl	Media	33.89	30.29	26.78
	Desv. Est.	1.85	5.54	5.80
Inyector Fino 0.3 gpl	Media	30.65	24.27	14.51
	Desv. Est.	1.59	1.01	0.89
Inyector Grueso 0.1 gpl	Media	25.30	17.95	11.83
	Desv. Est.	4.58	0.82	1.04
Inyector Grueso 0.3 gpl	Media	35.02	18.24	6.86
	Desv. Est.	7.11	1.90	1.83

De acuerdo a la Tabla 23 se observa una tendencia descendente de $\Delta \bar{t}_{\text{medición}}$ cuando se aumenta el diámetro del tubo muestreador (a una condición de trabajo dada). Esta tendencia también se aprecia al aumentar la concentración de espumante o al utilizar un inyector de poros más grandes lo que se representa de mejor manera en el tubo de mayor diámetro.

⁹ Para cada condición de trabajo y para un tubo dado, el registro del tiempo de medición se realizó en tres repeticiones.

La Figura 56 muestra los resultados para la medición de $J_{g\text{ local}}$ mediante el método de la probeta invertida para diferentes diámetros de tubos muestrales y diferentes condiciones de inyección de aire. Por otro lado la Tabla 24 indica el error asociado a cada medición (detalle en Anexo 6.3.1).

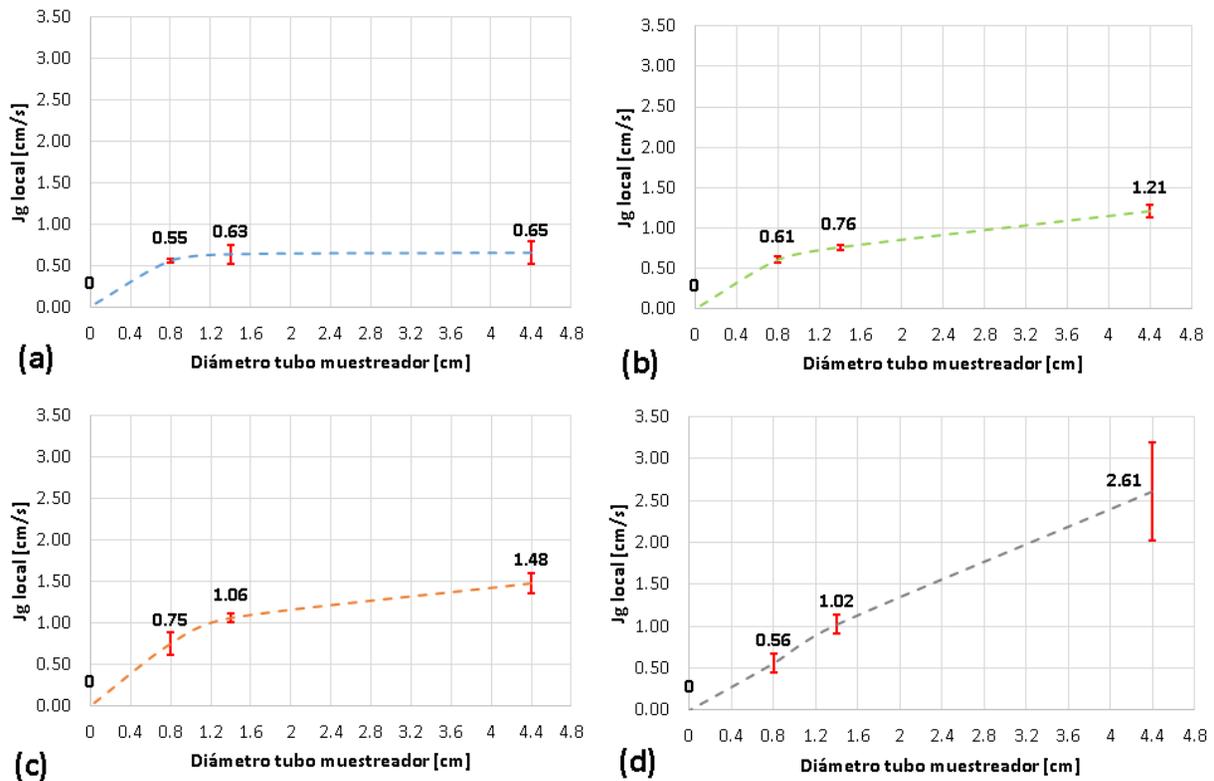


Figura 56: Datos experimentales de $J_{g\text{ local}}$ vs. diámetro del tubo muestreador : (a) Inyector Fino – 0.1 gpl (b) Inyector Fino – 0.3 gpl (c) Inyector Grueso – 0.1 gpl (d) Inyector Grueso – 0.3 gpl.

Tabla 24: Resumen Análisis estadístico de datos para $J_{g\text{ local}}$.

Condición de trabajo a 0.4 bar	Parámetro Estadístico	Diámetro interno tubo [cm]		
		0.8	1.4	4.4
Inyector Fino 0.1 gpl	Media	0.55	0.63	0.65
	Desv. Est.	0.02	0.11	0.14
	Coef. Var [%]	4.3	17.6	20.9
Inyector Fino 0.3 gpl	Media	0.61	0.76	1.21
	Desv. Est.	0.04	0.03	0.08
	Coef. Var [%]	5.9	4.2	6.2
Inyector Grueso 0.1 gpl	Media	0.75	1.06	1.48
	Desv. Est.	0.14	0.05	0.12
	Coef. Var [%]	18.0	4.7	8.2
Inyector Grueso 0.3 gpl	Media	0.56	1.02	2.61
	Desv. Est.	0.11	0.11	0.58
	Coef. Var [%]	19.2	10.7	22.3

De acuerdo a Gómez (2011), la relación $J_{g \text{ local}}$ con el diámetro de tubo muestreador, corresponde, en principio, a una función asintótica donde a valores superiores de 10 [cm] de diámetro, el valor de la velocidad superficial se estabiliza. Considerando lo anterior, para estimar el valor de $J_{g \text{ global}}$ con los datos experimentales se utilizará una regresión del tipo:

$$J_{g \text{ local}}(d) = J_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot d}) \quad (24)$$

Siendo d el diámetro del tubo muestreador en [cm], J_{∞} representa el valor real de velocidad superficial de gas en $\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$ y k es la constante que indica el crecimiento de la tasa de muestreo via cambios en el diámetro del tubo muestreador en $[\text{cm}^{-1}]$. Ambas constantes fueron determinadas mediante el método de los mínimos cuadrados. Una vez realizado esto, se estimó el valor de $J_{g \text{ global}}$ evaluando la Ecuación (24) en el diámetro de la columna, es decir:

$$J_{g \text{ global}} = J_{g \text{ local}}(d = 10.2)$$

También se define el diámetro crítico (d_k) de la siguiente forma,

$$J_{g \text{ local}}(d_k) = 80\% \cdot J_{\infty} \quad (25)$$

Los resultados de la regresión se presentan en la Figura 57 mientras que el cálculo de $J_{g \text{ global}}$ se presenta en la Tabla 25.

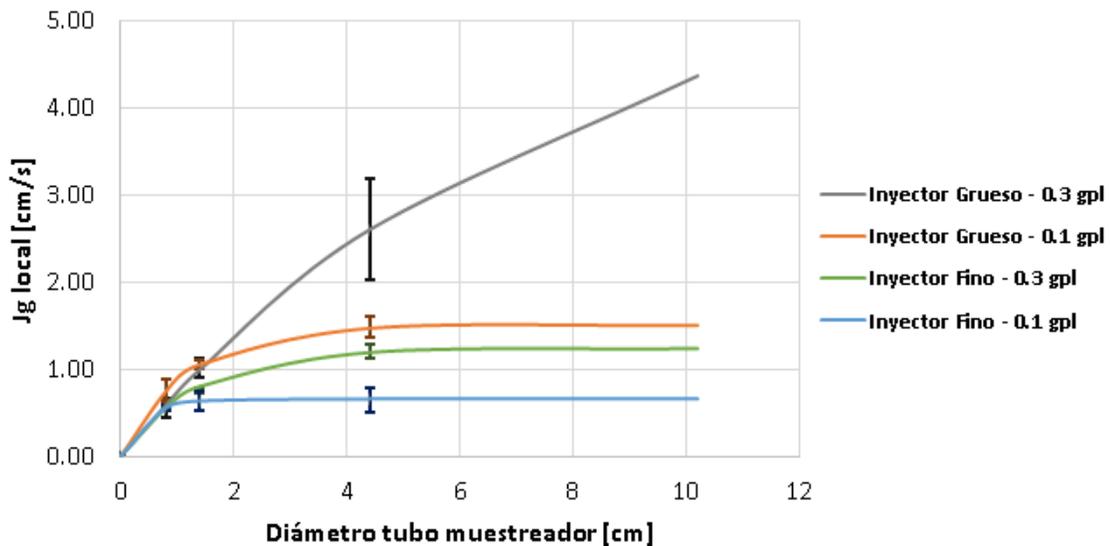


Figura 57: Resultados de regresión por condición de trabajo.

Tabla 25: Resultados regresión y cálculo de J_g global.

Condición de trabajo a 0.4 bar	J_∞ [cm/s]	k [cm ⁻¹]	Coefficiente R ²	J_g global [cm/s]	d_k [cm]
Inyector grueso 0.3 gpl	5.92	0.13	1.00	4.38	12.2
Inyector grueso 0.1 gpl	1.51	0.86	1.00	1.51	1.9
Inyector fino 0.3 gpl	1.25	0.74	0.99	1.25	2.2
Inyector fino 0.1 gpl	0.65	2.37	1.00	0.65	0.7

En lo siguiente se busca eliminar el problema muestral del uso de un tubo de diámetro reducido (habitualmente utilizado en planta) mediante la corrección de ese valor usando la Ecuación (24). Para ello se decide determinar la funcionalidad entre las condiciones operacionales y el valor de k . Dado que no es posible cuantificar numéricamente el inyector utilizado, se propone un modelo recursivo para k , el cual relaciona dicho parámetro con los valores utilizados de concentración y los obtenidos de J_∞ . El modelo es el siguiente,

$$k = k_0 + k_1 \cdot C + k_2 \cdot J_\infty \quad (26)$$

Siendo C la concentración de espumante en la columna en [gpl], J_∞ el parámetro determinado de la Ecuación (24) en $\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$ y k_0 , k_1 y k_2 las constantes a determinar mediante el método de los mínimos cuadrados.

Los resultados del ajuste se muestran en la Figura 58 mientras que los valores de las constantes del modelo se presentan en la Tabla 26.

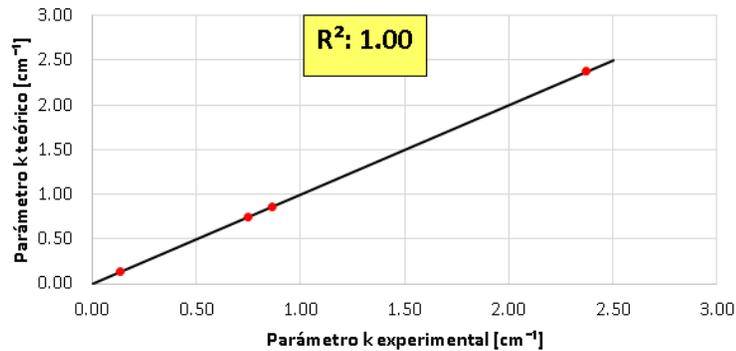


Figura 58: Correlación entre datos experimentales y teóricos de parámetro k .

Tabla 26: Resultados de ajuste para cálculo de parámetro k .

Variable	Valor
k_0	17.74
k_1	-6.93
k_2	-2.62

Utilizando la Ecuación (24) y (26) es posible tener una solución recursiva para obtener el valor del parámetro J_{∞} .

$$J_{\infty} = \frac{J_{g \text{ local}}(d)}{(1 - e^{-(k_0 + k_1 \cdot C + k_2 \cdot J_{\infty}) \cdot d})} \quad (27)$$

De los resultados anteriores se puede mencionar lo siguiente:

- Se observa que tal como lo indica la teoría, la distribución de tamaños de burbujas así como el espaciamiento entre ellas no es uniforme dentro de la columna. De cumplirse dicha uniformidad se esperaría que el valor de $J_{g \text{ local}}$ en cualquier condición de trabajo fuese el mismo al variar el diámetro del tubo. Por otro lado se tiene que para una condición de trabajo dada, al aumentar el diámetro se aumenta el espacio de muestreo y por consiguiente la probabilidad de que un mayor número de burbujas asciendan por el tubo (incluyendo las de mayor tamaño), es decir, hay un mayor caudal volumétrico por unidad de área, y por lo tanto, el valor de $J_{g \text{ local}}$ será mayor.
- $J_{g \text{ local}}$ es una función creciente tanto de la concentración de espumante (C) como del tamaño de poros del inyector. Los errores para $J_{g \text{ local}}$ dados por el coeficiente de variación fluctuaron entre 4 - 22% respectivamente.
- La velocidad de ascenso de las burbujas en un medio acuoso está determinada por las fuerzas que actúan sobre las burbujas, las dos más importantes son el empuje del líquido y el roce. El balance entre estas dos fuerzas indica que, en general, las burbujas más grandes se mueven con mayor rapidez que las más pequeñas (Clift et al., 1978). En base a lo anterior se desprende que al utilizar un inyector grueso las burbujas formadas ascenderán más rápido por la fase líquida, lo que aumenta el valor de $J_{g \text{ local}}$. También se tiene que un incremento en la concentración de espumante disminuye el tamaño promedio de las burbujas, esto a su vez incrementa el número y el área superficial total de estas, lo que se traduce en un aumento del caudal volmétrico por unidad de área y por lo tanto aumenta el valor de $J_{g \text{ local}}$. La Ecuación (4) confirma dicha relación.
- El diámetro crítico varía por condición de trabajo. De las mediciones realizadas no es posible establecer un diámetro crítico estándar que asegure un 80% de representatividad del valor real de la velocidad superficial de gas.
- Los resultados obtenidos por el modelo matemático de la Ecuación (24) poseen una alta correlación con los datos experimentales obtenidos y a su vez son consistentes con el conocimiento planteado por el autor Gómez (2011).
- El valor de $J_{g \text{ global}}$ más alto se obtuvo al utilizar un Inyector Grueso con 0.3 gpl. Dicho valor fue de $4.38 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$. Cabe señalar que a pesar de lo alto que es este valor en comparación a los restantes, en la operación se han utilizado valores de dicho orden de magnitud. De acuerdo a Gorain et al (1996) se han utilizado valores de J_g de hasta $6.4 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$ respectivamente. El alto error de medición obtenido al utilizar un Inyector Grueso con 0.3 gpl a un diámetro de 4.4 [cm], así como las limitaciones de este experimento se comentarán en la sección 4.4.2.

4.2.2 Experimento N°2: Dispersión axial de reactivo superficialmente activo
 Las datos de concentración de espumante en el tiempo se presentan en la Figura 59.

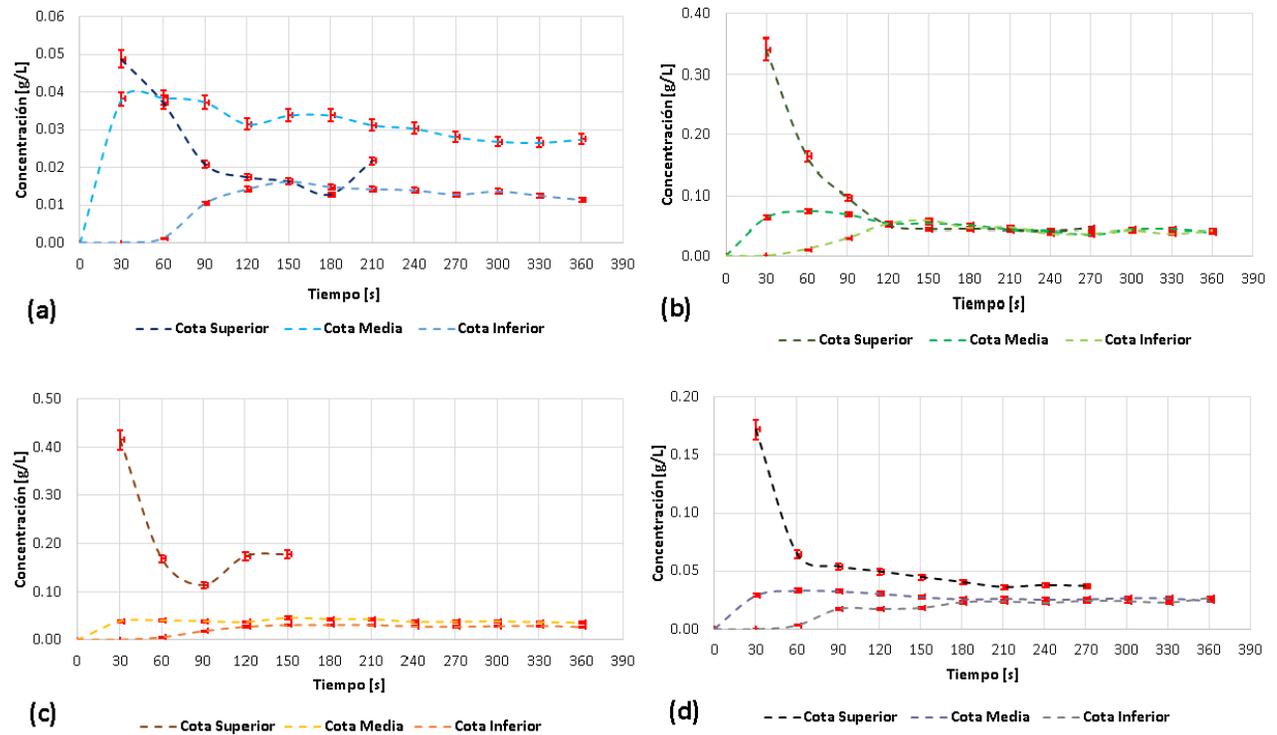


Figura 59: Datos experimentales de concentración de espumante vs. tiempo por cota: (a) Inyector Fino – 0.1 gpl (b) Inyector Fino – 0.3 gpl (c) Inyector Grueso – 0.1 gpl (d) Inyector Grueso – 0.3 gpl.

De estos resultados se puede observar que la concentración de espumante en la cota superior tiende a disminuir con el tiempo hasta estabilizarse en un cierto valor. Esta disminución se debe tanto por sus pérdidas en el rebalse como por su dispersión a lo largo de la columna por el movimiento descendente del líquido. Debido a esto último la concentración de espumante en las cotas media e inferior es creciente y se aprecia que también alcanza una estabilización en un determinado instante de tiempo.

Para estimar la concentración final en la columna se realizará una regresión del tipo,

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-k \cdot t} + C_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (28)$$

Esta se usará con los datos obtenidos en la cota superior, mientras que en la cota media e inferior se utilizará la siguiente expresión,

$$C(t) = C_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (29)$$

Siendo C_0 , k y C_{∞} las constantes a determinar mediante el método de los mínimos cuadrados.

El tiempo en el cual la concentración se estabiliza en cada cota se denominará en este trabajo como t_{mezcla} , el cual se determinará de la siguiente forma en la cota superior,

$$C(t_{mezcla}) = 110\% \cdot C_{\infty} = \bar{C}_{\infty}$$

Mientras que en la cota media e inferior se obtuvo mediante la siguiente condición,

$$C(t_{mezcla}) = 90\% \cdot C_{\infty} = \bar{C}_{\infty}$$

La Tabla 27 resume los resultados obtenidos en este experimento (detalle en Anexo 6.3.2).

Tabla 27: Resultados en toma de muestras por condición de trabajo.

Condición de trabajo a 0.4 bar		 inyector Grueso 0.3 gpl	 inyector Grueso 0.1 gpl	 inyector Fino 0.3 gpl	 inyector Fino 0.1 gpl
Concentración requerida [gpl]		0.3	0.1	0.3	0.1
Tiempo de mezcla experimental, t_{mezcla} [s]	Cota Superior	67	71	91	56
	Cota Media	34	45	36	14
	Cota Inferior	214	160	121	140
Concentración alcanzada, \bar{C}_{∞} [gpl]	Cota Superior	0.048	0.041	0.064	0.023
	Cota Media	0.022	0.032	0.036	0.025
	Cota Inferior	0.023	0.027	0.040	0.023
Concentración alcanzada c/r a requerida [%]	Cota Superior	16%	41%	21%	23%
	Cota Media	7%	32%	12%	25%
	Cota Inferior	8%	27%	13%	23%
Promedio concentración alcanzada c/r a requerida [%]		10%	33%	15%	23%
Concentración promedio en columna [gpl]		0.031	0.033	0.046	0.023
Pérdidas promedio de agua en rebalse [L]		13.65	13.65	13.65	13.65
Concentración de espumante en rebalse [gpl]		0.45	0.14	0.44	0.14

De la Tabla 27 se observa que la máxima concentración alcanzada con respecto a la requerida fue de un 33% mientras que la más baja fue de un 10%, esto se debe a las altas pérdidas de reactivo en el rebalse el cual fue de un 64% del volumen inicial de agua. Por esta razón se concluye que el reactivo se transportó con las burbujas hasta llegar a la fase espuma y por consiguiente se perdió en el rebalse.

A pesar de las altas pérdidas de reactivo se verifica que es posible dispersar un reactivo con una tendencia cercana a la homogeneización a lo largo del eje axial de la columna (considerar que la escala del gráfico (a) de la Figura 59 es mayor que los gráficos restantes). Las limitaciones de este experimento se comentarán en la sección 4.4.3.

4.2.3 Experimento N°3: Evaluación detallada de la distribución de tamaños de burbuja

En esta sección se debe considerar lo siguiente:

- Todos los datos fueron filtrados por un diámetro mínimo de 0.29 [mm] (Anexo 6.3.3).
- Los histogramas realizados con MS Excel, incluyen todas las burbujas registradas por el software ImageJ® desde el inicio de la toma de fotografías hasta el tiempo que esta concluyó (2.0 min. para inyector grueso y 3.0 min. para inyector fino).
- Los histogramas realizados con EasyFit, se realizaron con 5000 datos, correspondientes a las primeras burbujas registradas por la toma de fotografías.

En base a lo anterior los histogramas y las curvas con los tamaños de burbujas en el tiempo realizados con el software MS Excel se presentan en las Figuras 60-67, mientras que los histogramas realizados con el software EasyFit se presentan en las Figuras 68-71.

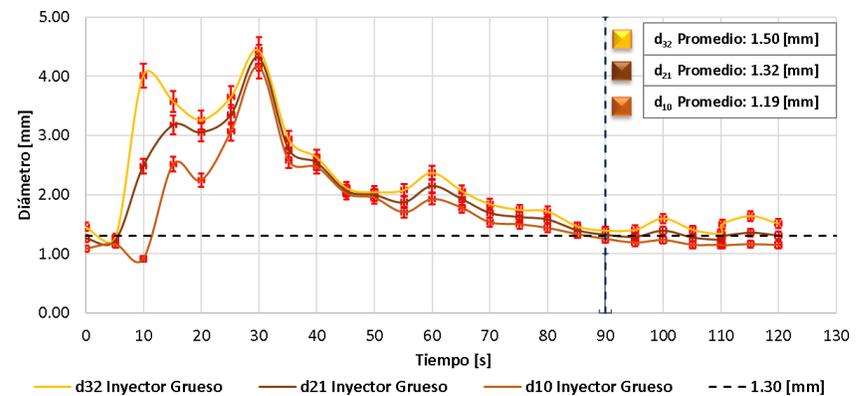
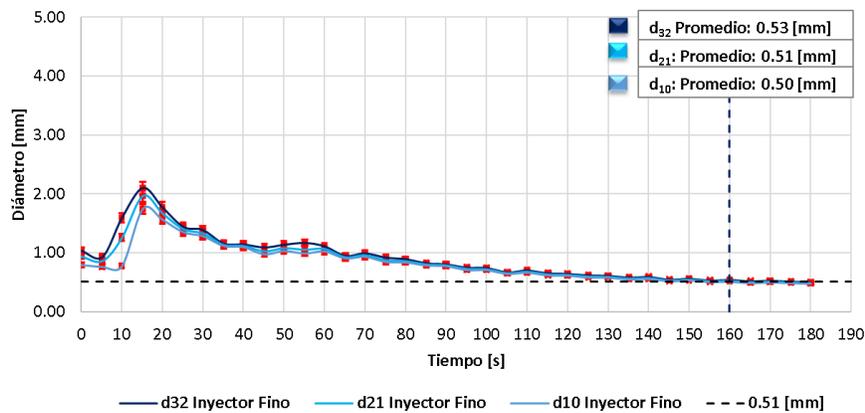
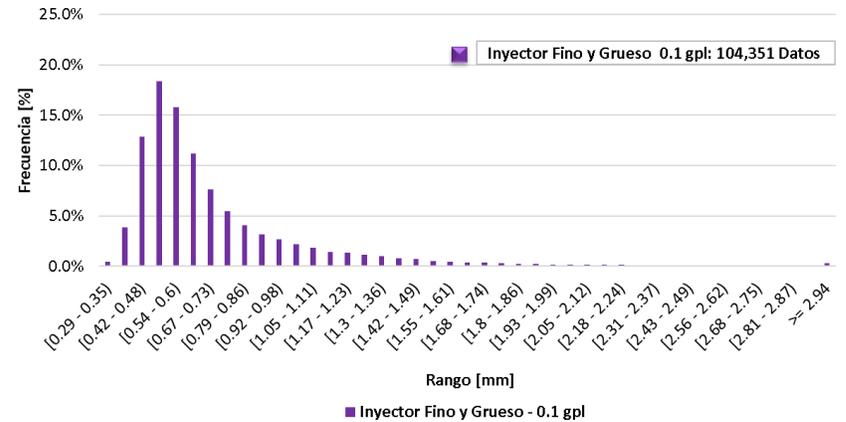
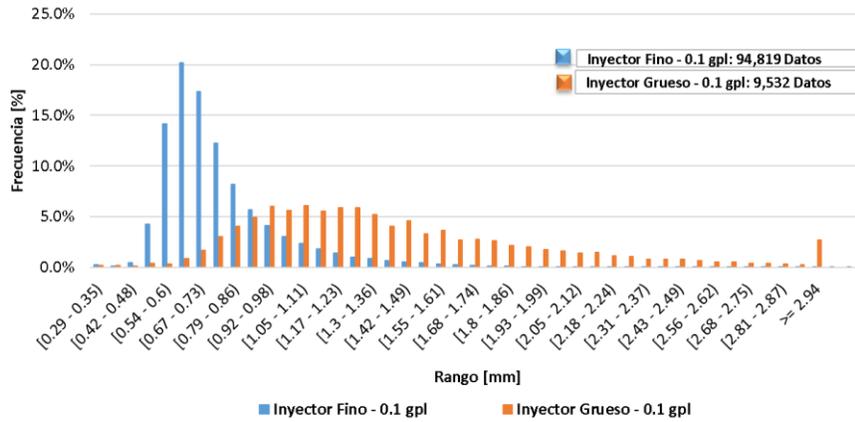


Figura 62: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector fino a concentración requerida de 0.1 gpl (el tamaño promedio incluye las burbujas registradas desde los 160 hasta los 180 segundos).

Figura 63: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (el promedio incluye las burbujas registradas desde los 90 hasta los 120 segundos).

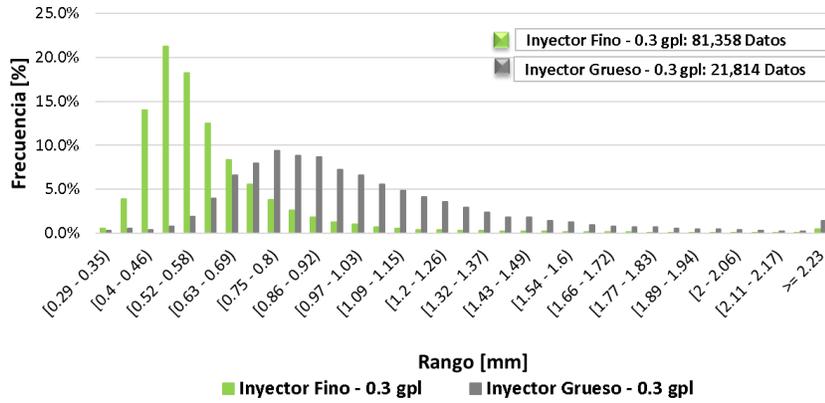


Figura 64: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.3 gpl.

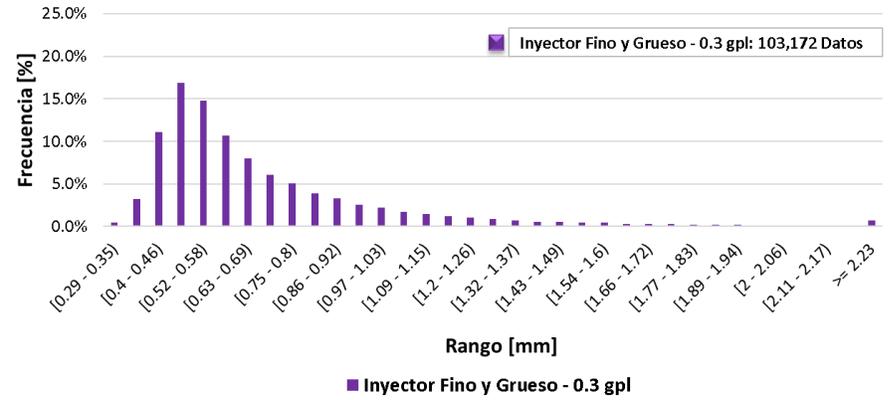


Figura 65: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.3 gpl (total de datos).

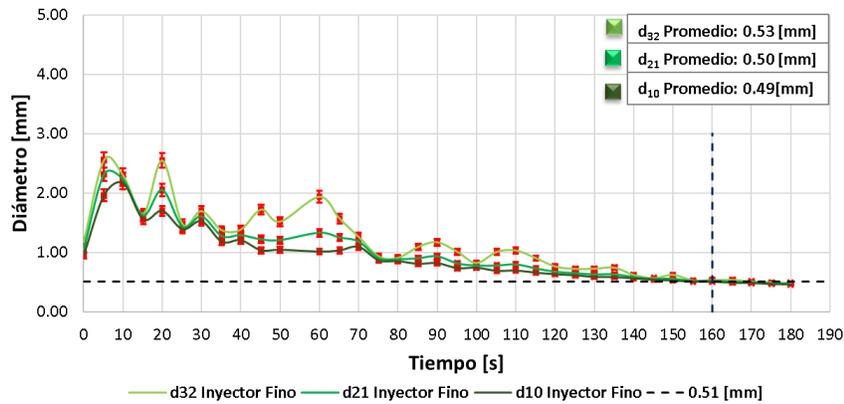


Figura 66: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector fino a concentración requerida de 0.3 gpl (el promedio incluye las burbujas registradas desde los 160 hasta los 180 segundos).

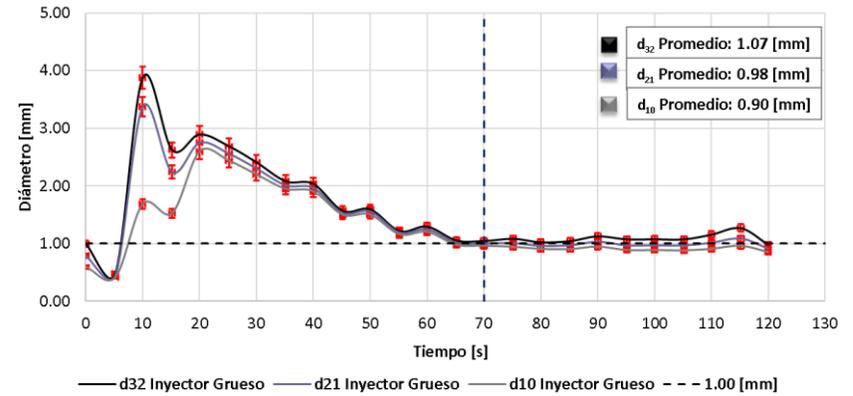


Figura 67: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector grueso a concentración requerida de 0.3 gpl (el promedio incluye las burbujas registradas desde los 70 hasta los 120 segundos).

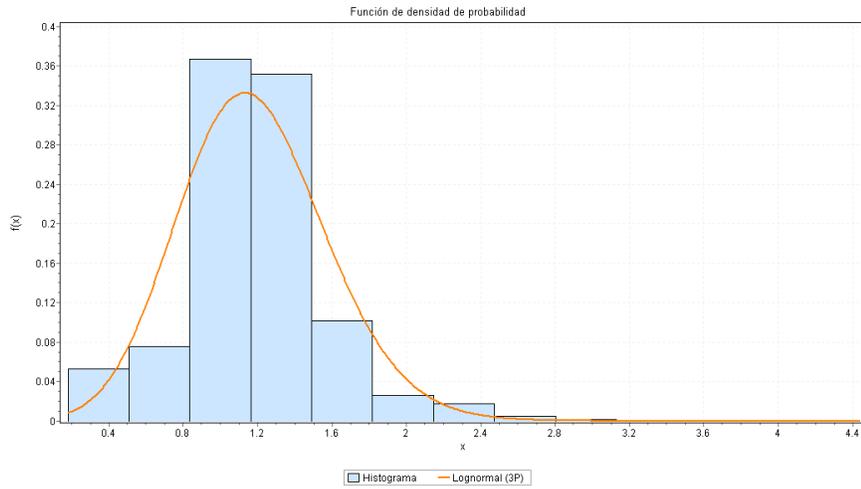


Figura 68: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Fino - 0.1 gpl).

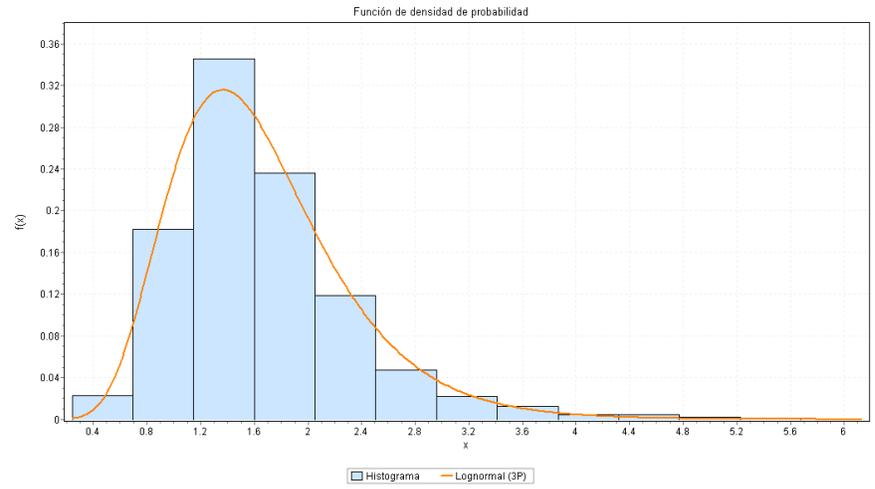


Figura 69: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Grueso - 0.1 gpl).

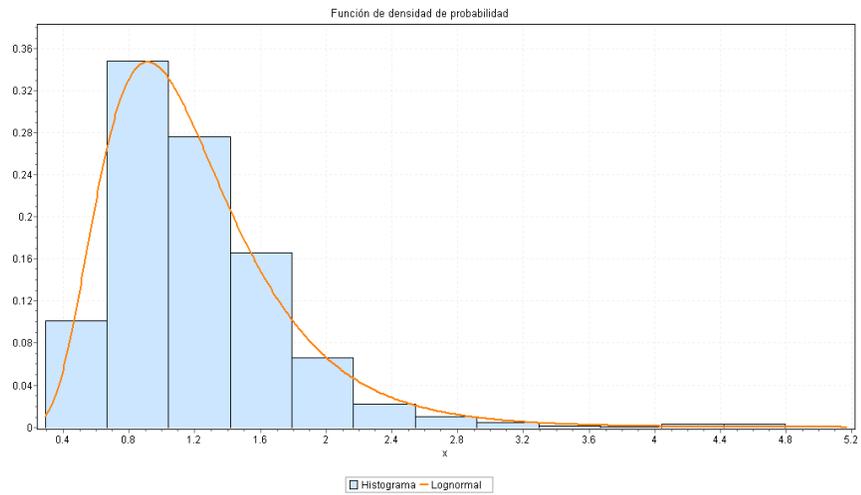


Figura 70: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Fino - 0.3 gpl).

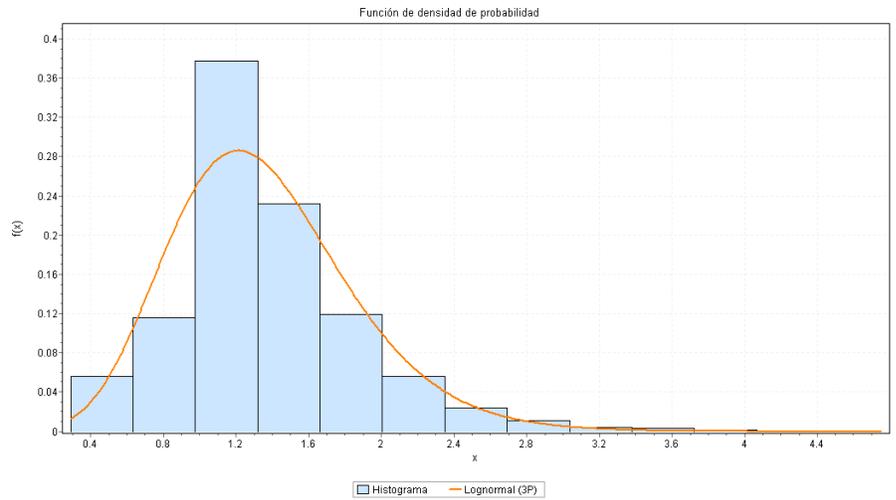


Figura 71: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Grueso - 0.3 gpl).

De los resultados se observa que para las cuatro condiciones de trabajo el tamaño promedio de burbuja disminuye con el tiempo, lo que verifica el efecto de la dosis de espumante en el tamaño de burbuja durante su dispersión a lo largo de la columna.

La Tabla 28 indica el tamaño promedio mínimo registrado en este experimento.

Tabla 28: Fineza y uniformidad para condiciones de trabajo.

Condición de trabajo a 0.4 bar	d_{10} [mm]	d_{21} [mm]	d_{32} [mm]	$(d_{32} - d_{21})$ [mm]	$(d_{32} - d_{21})$ [mm]
Inyector Grueso – 0.3 gpl	0.90	0.98	1.07	0.09	0.17
Inyector Fino – 0.3 gpl	0.49	0.50	0.53	0.03	0.04
Inyector Grueso – 0.1 gpl	1.19	1.32	1.50	0.18	0.31
Inyector Fino – 0.1 gpl	0.50	0.51	0.53	0.02	0.03

De acuerdo a la Tabla 28, se observa que al utilizar un inyector fino se obtiene la mayor fineza debido a los bajos valores del diámetro d_{32} . Por otro lado la mayor uniformidad se presenta con el mismo inyector debido a los bajos valores de las diferencias entre d_{32} con d_{10} y d_{21} respectivamente.

Finalmente la Tabla 29 muestra los parámetros de la distribución Log-Normal ajustada.

Tabla 29: Parámetros de distribución Log-Normal para ajuste por EasyFit.

Condición de trabajo a 0.4 bar	σ [mm]	μ [mm]	S [mm]	\bar{X} [mm]	S/\bar{X} [%]
Inyector Grueso – 0.3 gpl	0.199	0.896	0.513	1.358	38
Inyector Fino – 0.3 gpl	0.430	0.095	0.544	1.205	45
Inyector Grueso – 0.1 gpl	0.324	0.620	0.680	1.653	41
Inyector Fino – 0.1 gpl	0.087	1.503	0.400	1.183	34

4.3 Resultados adicionales

En esta sección se presentan resultados complementarios a la línea central del trabajo realizado.

4.3.1 Modelo multivariable para tiempo de mezcla

De los resultados obtenidos en la sección 4.2.2, se observa que en los cuatro casos de estudio los mayores tiempos de mezcla fueron alcanzados en la cota inferior, seguido de la cota superior y finalmente la cota media. Por otro lado se observa que no hay una tendencia clara en los tiempos de mezcla al cambiar de condición de trabajo, por lo tanto se propone un modelo inicial para determinar el tiempo de mezcla, el cual posee la siguiente forma,

$$t_{mezcla} = a \cdot (H - \alpha)^2 + b \cdot (H - \alpha) + c \cdot J_{g\ global} + d \quad (30)$$

Siendo $J_{g\ global}$ la velocidad superficial global en $\left[\frac{cm}{s}\right]$ (obtenida en la sección 4.2.1), H la profundidad en [m] medida desde la parte superior de la columna y a , α , b , c y d las constantes a determinar mediante el método de los mínimos cuadrados. La Figura 72 muestra el sistema de referencia de la Ecuación (30).

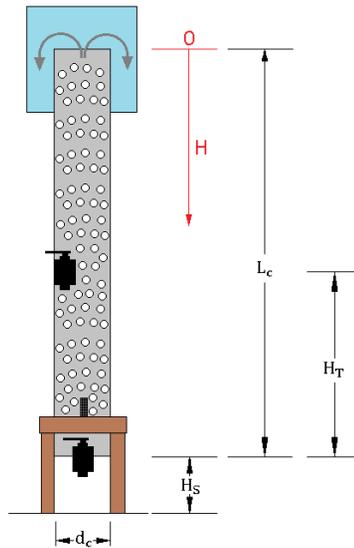


Figura 72: Sistema de referencia para modelo de tiempo de mezcla.

Los resultados del ajuste se muestran en la Figura 73 mientras que los valores del modelo de t_{mezcla} se presentan en la Tabla 30 (detalle en Anexo 6.3.2).

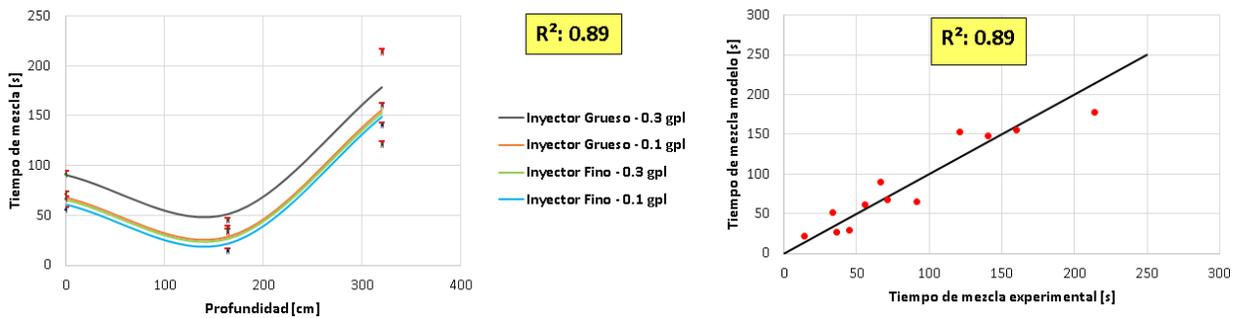


Figura 73: Resultados de ajuste para modelo de tiempo de mezcla.

Tabla 30: Resultados de ajuste para modelo de tiempo de mezcla.

Variable	Valor
a	$3.28E^{-3}$
α	118.30
b	$1.04E^{-5}$
c	7.90
d	9.88

De la Figura 73, se observa que al aumentar la concentración de espumante o al utilizar un inyector de poros más grandes se tiende a aumentar el tiempo de mezcla. Dado que cada condición de trabajo tiene una velocidad superficial de gas asociada (comentado en la sección 4.2.1), este modelo indica que mayores valores de la velocidad superficial de gas tienden a aumentar el tiempo de mezcla.

Cabe mencionar que aún cuando los ponderadores de la profundidad (a y b) son los de menor valor en la Ecuación (30) la profundidad pondera un 58% del tiempo total mientras que la velocidad superficial de gas pondera un 24% respectivamente.

4.3.2 Muestreo en Bubble Viewer®

Los resultados del análisis de muestras mencionado en la sección 3.2.4 se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31: Resultados para análisis de muestras de Bubble Viewer®.

Condición de trabajo a 0.4 [bar]							
Inyector Grueso 0.3 gpl		Inyector Grueso 0.1 gpl		Inyector Fino 0.3 gpl		Inyector Fino 0.1 gpl	
Medición absorbancia		Medición absorbancia		Medición absorbancia		Medición absorbancia	
1°	0.026	1°	0.032	1°	0.040	1°	0.023
2°	0.025	2°	0.030	2°	0.040	2°	0.027
3°	0.026	3°	0.031	3°	0.042	3°	0.028
Promedio	0.026	Promedio	0.031	Promedio	0.041	Promedio	0.026
σ	0.001	σ	0.001	σ	0.001	σ	0.002
C.V	2.2%	C.V	3.2%	C.V	2.8%	C.V	10%
Concentración obtenida [gpl]	0.001	Concentración obtenida [gpl]	0.003	Concentración obtenida [gpl]	0.005	Concentración obtenida [gpl]	0.001

De la Tabla 31 se observa que la concentración obtenida en el equipo Bubble Viewer® es en promedio un 2.0% para una concentración requerida de 0.1 [gpl] y 1.0% para una concentración requerida de 0.3 [gpl]. Esto corrobora los resultados obtenidos en la sección 4.2.2, es decir, que hay una fracción del reactivo que asciende junto a las burbujas, mientras que la otra desciende con el líquido.

4.3.3 Cálculo alternativo de S_b

En la sección 2.5.3 se presentó una forma clásica de cómo obtener el parámetro S_b (nombrado como S_{b1}). Sin embargo existe otra forma para obtener el mismo parámetro, asumiendo que en este caso el número de burbujas es constante en el tiempo y que el tamaño de burbuja es una función del tiempo. Esta expresión se obtiene al derivar con respecto al tiempo las ecuaciones (6) y (7), lo cual entrega las siguientes expresiones,

$$\dot{A}_{bb} = 2 \cdot \pi \cdot n_b \cdot d_b \cdot \dot{d}_b \quad (31)$$

$$\dot{V}_{bb} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot n_b \cdot d_b^2 \cdot \dot{d}_b \quad (32)$$

Despejando el valor de \dot{d}_b de la Ecuación (31) y reemplazándolo en la Ecuación (32) se obtiene la siguiente expresión,

$$4 \cdot \dot{V}_{bb} = \dot{A}_{bb} \cdot \frac{d_b^2}{d_b} = \dot{A}_{bb} \cdot d_{21}$$

Siendo d_{21} uno de los diámetros característicos de Sauter mencionado en la sección 2.5.2.

De forma análoga el valor de \dot{V}_{bb} se expresa en función de $J_{g \text{ global}}$ y del área de la celda mediante la Ecuación (1), lo que al ser considerado en la expresión anterior entrega el siguiente resultado,

$$S_{b2} = 4 \cdot \frac{J_{g \text{ global}}}{d_{21}} = \frac{\dot{A}_{bb}}{A_{\text{celda}}} \quad (33)$$

Considerando el caso general, es decir, tanto n_b como d_b dependientes del tiempo al derivar con respecto al tiempo las Ecuaciones (6) y (7), se tienen las siguientes expresiones,

$$\dot{A}_{bb} = \pi \cdot d_b^2 \cdot \dot{n}_b + 2 \cdot \pi \cdot n_b \cdot d_b \cdot \dot{d}_b \quad (34)$$

$$\dot{V}_{bb} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot \dot{n}_b \cdot d_b^3 + \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot n_b \cdot d_b^2 \cdot \dot{d}_b \quad (35)$$

Dependiendo de la variable que sea despejada de la Ecuación (34) y reemplazada en la Ecuación (35), se tienen los siguientes resultados:

- Despejando n_b o \dot{d}_b

$$S_b = \frac{\dot{A}_{bb}}{A_{\text{celda}}} = 4 \cdot \frac{J_{g \text{ global}}}{d_{21}} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi \cdot \dot{n}_b \cdot d_b^3}{d_{21} \cdot A_{\text{celda}}} + \frac{\pi \cdot d_b^4 \cdot \dot{n}_b}{d_b \cdot d_{21} \cdot A_{\text{celda}}} \quad (36)$$

- Despejando \dot{n}_b

$$S_b = \frac{\dot{A}_{bb}}{A_{\text{celda}}} = 6 \cdot \frac{J_{g \text{ global}}}{d_{32}} - \frac{3 \cdot \pi \cdot n_b \cdot d_b^2 \cdot \dot{d}_b}{d_{32} \cdot A_{\text{celda}}} + \frac{2 \cdot \pi \cdot n_b \cdot d_b \cdot \dot{d}_b}{A_{\text{celda}}} \quad (37)$$

Por lo tanto se concluye que si bien el parámetro S_{b1} es recurrentemente utilizado en la literatura, existe más de una forma para definir el parámetro S_b de acuerdo a los supuestos realizados. El caso general es una expresión más compleja que puede incluir tanto al parámetro S_{b1} como S_{b2} .

Utilizando los valores de $J_{g\ global}$ obtenidos en la sección 4.2.1, la Tabla 32 resume los valores de S_b obtenidos en esta experiencia.

Tabla 32: Cálculo de velocidad superficial de área de burbuja.

Condición de trabajo a 0.4 bar	$J_{g\ global} \left[\frac{cm}{s} \right]$	$d_{32} [mm]$	$S_{b1} [s^{-1}]$	$d_{21} [mm]$	$S_{b2} [s^{-1}]$
Inyector Grueso – 0.3 gpl	4.38	1.07	246	0.98	179
Inyector Fino – 0.3 gpl	1.25	0.53	142	0.50	100
Inyector Grueso – 0.1 gpl	1.51	1.50	60	1.32	46
Inyector Fino – 0.1 gpl	0.65	0.53	74	0.51	51

En la operación el rango típico de valores para S_{b1} es desde 40 hasta 120 $[s^{-1}]$. Sin embargo en la Tabla 32 se observa que el valor más alto es de 246, el cual se debe a su alto valor de $J_{g\ global}$, es decir, 4.38 $\left[\frac{cm}{s} \right]$. Dicho valor de $J_{g\ global}$ es viable de acuerdo a lo comentado en la sección 4.2.1.

Por otro lado se observa que hay diferencias de hasta un 30% al comparar los valores de S_{b1} y S_{b2} , siendo el primero siempre mayor al segundo. Esto indica que se requiere un mayor estudio en la operación para determinar cual de estos parámetros representa de mejor manera el funcionamiento de la planta.

4.4 Limitaciones, contribución y recomendaciones

En el presente trabajo se buscó estudiar comportamientos dados por la evaluación e impacto de la dispersión de gas, los cuales pueden ser de utilidad a la hora de optimizar o mejorar el proceso de flotación columnar de minerales.

Sin embargo, más allá de lo anterior en esta sección se presentan las principales contribuciones obtenidas durante los experimentos correspondientes a la línea central del trabajo.

4.4.1 Estudio de resistividad al transporte de reactivo

Dentro de las principales limitaciones de este experimento destaca que las muestras se tomaron de forma manual por dos personas en simultáneo, es decir, que existe un error de sincronización por cada persona lo que disminuyó la precisión del muestreo en el instante exacto de tiempo.

La principal contribución de esta prueba fue generar una primera aproximación de una metodología definitiva (prueba estándar) que permita entender cómo el reactivo se mueve a través de un flujo de burbujas mediante el cálculo de la difusividad o de forma análoga una resistividad equivalente.

El cálculo de este indicador de forma experimental es relevante ya que permite comparar reactivos y a la vez permitiría predecir cuál es más apto a escala industrial dependiendo de los requerimientos de la operación, sin la necesidad de realizar pruebas en planta. Uno de los requerimientos se puede asociar al tiempo de residencia de los reactivos dentro de la columna el cual es un parámetro que debiese considerarse para optimizar el proceso de flotación columnar.

En la operación se requiere que el tiempo de residencia de los reactivos sea mayor o igual que el del material particulado para que el proceso sea eficiente (en términos de costos). Esto se relaciona de manera directa con el transporte de los reactivos a través de la pulpa y por lo tanto el estudio de la transferencia de masa a través de un flujo de burbujas es un primer paso para buscar mejoras en el proceso general.

El estudio respectivo se realizó en un sistema 2-D debido a que este entrega beneficios prácticos, tales como aislar un tren de burbujas, facilidad para la extracción de muestras, entre otros.

Dado que la metodología propuesta considera un sistema de dos fases, se recomienda trabajar en un sistema de tres fases, para lo cual se sugiere adicionar material particulado del tipo hidrofóbico e hidrofílico (por ejemplo Molibdenita y Cuarzo) usando porcentajes de sólidos típicos de la operación, utilizar algún mecanismo que permita extraer las muestras de manera sincronizada y en lo posible disminuir el intervalo de tiempo del muestreo para tener mayor robustez en los resultados.

4.4.2 Evaluación de mejoras en la medición de J_g local y efecto del diámetro del tubo muestreador

La principal limitación de este experimento fue el uso de un compresor de aire el cual no es ideal. Esto se debe a que se observaron pequeñas fluctuaciones de presión manométrica¹⁰ lo cual se tradujo en variaciones de caudal que generaron los principales errores de medición de $J_{g\text{ local}}$. Por razones de muestreo, es esperable que dichas fluctuaciones de caudal generen un alto error de $J_{g\text{ local}}$ a valores altos de diámetro del tubo muestreador lo cual se verifica al utilizar un Inyector Grueso con 0.3 gpl a un diámetro de 4.4 [cm]. Este valor fue el que sobreestimó el valor de $J_{g\text{ global}}$ en dicha condición operacional.

¹⁰ Cada vez que se observó dicha situación durante las pruebas experimentales se reguló manualmente la válvula de flujo para mantener constante la presión a 0.4 [bar].

La principal contribución de esta prueba fue generar una primera aproximación de un modelo definitivo que permita escalar el valor de $J_{g\text{ local}}$ desde cualquier diámetro, a su valor correspondiente de $J_{g\text{ global}}$. Este último valor carecería de error de muestreo y por lo tanto será un parámetro de control de la operación más robusto.

Los resultados obtenidos son consistentes y ratifican el conocimiento planteado por el autor Gómez (2011), por lo tanto este estudio va en la dirección correcta. Por otro lado es esperable que el comportamiento “asintótico” se observe en celdas columnares a escala industrial dado que se tiene el antecedente de un autor que cuenta con experiencia en dicho tipo de mediciones en planta. También se recomienda realizar las mediciones respectivas adicionando material particulado en la columna piloto utilizando porcentajes de sólidos típicos de la operación.

Para validar y obtener resultados más robustos se recomienda utilizar un compresor adecuado para este tipo de pruebas, es decir, que logre otorgar un caudal volumétrico constante a una presión de trabajo dada.

También se recomienda un mayor número de mediciones ya sea con una mayor cantidad de tubos muestreadores de diferente diámetro así como de un mayor número de condiciones operacionales. Esto se debe a que la Ecuación (27) requiere una mayor cantidad de puntos para poder ser validada.

4.4.3 Dispersión axial de reactivo superficialmente activo

Dentro de las principales limitaciones de este experimento destaca que las muestras se tomaron de forma manual por tres personas en simultáneo, es decir, que existe un error de sincronización por cada persona lo que disminuyó la precisión del muestreo en el instante exacto de tiempo. También destacan las pequeñas variaciones de caudal dadas por el compresor de aire (mencionadas en la sección 4.4.2) las cuales tienen un efecto directo en la velocidad descendente del líquido (comentado en la sección 4.1.1), y por consiguiente afectan el transporte de reactivo.

La contribución principal de esta prueba fue demostrar que efectivamente es posible dispersar un reactivo (en este caso superficialmente activo) de manera axial a lo largo de toda la columna piloto de flotación. Sin embargo dado que la concentración alcanzada dentro de la columna es mucho menor que la obtenida en el rebalse, no es posible asegurar que esta sea la forma óptima de dispersar el reactivo.

Es esperable que en columnas a escala industrial se observe un comportamiento similar de la dispersión axial de reactivo superficialmente activo, ya que de acuerdo a los autores citados en este trabajo (Nicklin, 1962; Chen et al., 1994) al inyectar aire en la base de una columna de agua existe movimiento descendente de líquido a lo largo de la dirección axial, el cual se opone al movimiento ascendente de gas y que dependiendo de la velocidad superficial de esta última es posible acentuar dichos patrones de flujo.

Por lo tanto se recomienda continuar este estudio para determinar la dispersión de reactivo adicionando la dosis inicial en diferentes profundidades de la columna de agua (por ejemplo en la zona media y en la parte más baja). Adicionalmente se recomienda utilizar reactivos no superficialmente activos (por ejemplo Sulfato Pentahidratado de Cobre el cual es sencillo de identificar mediante espectrofotometría), utilizar algún mecanismo que permita extraer las muestras de manera sincronizada, y finalmente disminuir el intervalo de tiempo del muestreo para tener una estimación más precisa del tiempo de mezcla por cota.

5 Conclusiones

El presente trabajo permitió conocer en mayor detalle el comportamiento de la dispersión de gas y del transporte de reactivo dentro de una celda columnar, y las metodologías requeridas para caracterizar un tren de burbujas. Las conclusiones son las siguientes.

a. Celda cuasi 2-D

La Tabla 33 resume las resistividades aparentes obtenidas con la metodología propuesta.

Tabla 33: Resumen de resistividades aparentes en celda cuasi 2-D.

Condición	Espumante			Sulfato		
	R_{ap} [$\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}$]	Error	R^2	R_{ap} [$\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}$]	Error	R^2
Sin aire ($Q_g = 0$)	15	\pm 4.7%	0.9	0.6	\pm 7.2%	0.9
Con aire ($J_g = 0.46 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$)	3.5	\pm 6.2%	0.6	0.3	\pm 7.5%	0.8

De los datos de la Tabla 33 se concluye lo siguiente:

- Un tren de burbujas permite transportar reactivo en la dirección axial, sin embargo eso no lo hace necesariamente impermeable. Esto se debe a que el tren de estudio facilitó el paso de reactivo en la dirección radial, lo cual se debe a un componente convectivo causado por la no homogeneidad en la dispersión del gas.
- El reactivo superficialmente activo en presencia de aire posee un mejor comportamiento en términos de transporte que el no superficialmente activo.

b. Columna piloto 3-D

Las conclusiones de esta sección son las siguientes:

- El diámetro del tubo muestreador es relevante para obtener resultados de velocidad superficial de gas representativos en la celda columnar.
- El modelo propuesto de $J_{g \text{ local}}$ - Diámetro el cual cumple la condición propuesta por Gómez (2011), entregó resultados consistentes que ratifican el conocimiento planteado por el autor, por lo que este estudio va en la dirección correcta. Se recomienda continuar este estudio teniendo en consideración las recomendaciones planteadas en este trabajo.
- El movimiento descendente del líquido permitió transportar espumante a lo largo de toda la columna, sin embargo la mayor cantidad de reactivo se transportó junto con las burbujas hasta llegar a la fase espuma y posteriormente al rebalse. Debido a las altas pérdidas de reactivo se recomienda continuar este estudio adicionando la dosis inicial en diferentes profundidades de la columna de agua teniendo en consideración las recomendaciones planteadas en este trabajo.

6 Anexos

6.1 Detalle setup Celda Cuasi 2-D

6.1.1 Inyección de gas

El cilindro de Nitrógeno se encuentra conectado a una manguera central la cual posee una válvula de flujo (válvula 1) que permite regular el caudal a una presión de trabajo dada. Dicha manguera se encuentra unida a un conector que posee dos extremos de mangueras, tal como se observa en la Figura 74.



Figura 74: Sistema de mangueras y sus componentes.

El primero de los extremos conduce el caudal de Nitrógeno hacia una lanza que se encuentra inserta en la base¹¹. Dicha lanza posee dos agujeros separados a una distancia determinada, cada uno cubierto con un inyector, el cual es un cilindro poroso con orificios de 0.5 [cm] de diámetro. Por lo tanto cada lanza permite generar hasta dos trenes de burbujas. La Figura 75 muestra una de las lanzas junto a sus componentes.



Figura 75: Lanza de columna 2-D con sus componentes.

Por otro lado el segundo extremo de la manguera se encuentra libre para determinar el caudal volumétrico mediante el método de la probeta invertida.

¹¹ La base permite almacenar dos lanzas, cada una inserta a un extremo de esta.

6.1.2 Método de probeta invertida

Este método permite determinar el caudal que ingresa a la lanza ubicada en la base de la celda. Consiste en un recipiente con agua en el cual se ubica una probeta de manera invertida (esta última llena de agua), la que posee en su interior una manguera que inyectará el gas Nitrógeno (en este caso el segundo extremo). De esta forma es posible registrar de manera visual el desplazamiento de líquido en el tiempo dentro de la probeta.

Para aplicar dicho procedimiento se debió fijar una presión de trabajo, una posición de la válvula 1, mantener la válvula 2 cerrada y la válvula 3 abierta. Las Figuras 76-77 muestran el método de la probeta invertida.

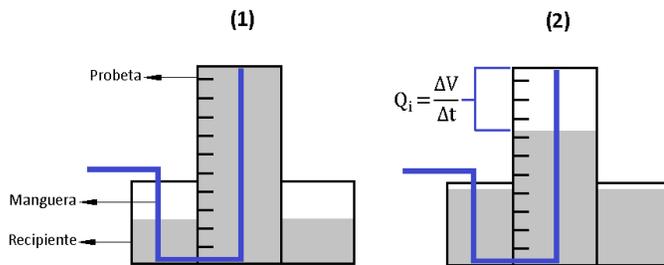


Figura 76: Esquema general método de probeta invertida.



Figura 77: Método de probeta invertida.

Los pasos a seguir para medir el caudal volumétrico del tren dominante fueron los siguientes:

1. Se varió la posición de la válvula 1 (con válvula 2 cerrada y válvula 3 abierta) a una presión de trabajo de 10 [psi]¹², luego mediante el método de la probeta invertida se determinó el caudal volumétrico de aire que ingresaba a la celda.
2. Una vez medido el caudal volumétrico, este se reincorporó a la celda abriendo la válvula 2 y cerrando la válvula 3.
3. Mediante un registro de fotografías, se determinó la proporción de aire que utilizaba el tren dominante.

¹² Para dicha presión de trabajo, en cualquier posición de la válvula 1 no generó rebalse de la columna de agua.

6.2 Detalle setup Columna Piloto 3-D

6.2.1 Dispersión de gas

La inyección de aire se realizó mediante un compresor de aire (Bauker modelo N° TD2006) el cual posee las siguientes características.

Tabla 34: Datos de fabricación de compresor de aire.

Caudal [$\frac{L}{min}$]	124
Presión de trabajo [bar]	8.0

El compresor se encuentra conectado a un sistema de mangueras, las cuales están unidas entre sí por un conjunto válvula-manómetro que permite regular la presión de trabajo en todo instante. En esta columna, todas las pruebas experimentales se realizaron a una presión de trabajo de 0.4 [bar].



Figura 78: Compresor de aire.



Figura 79: Manómetro-válvula de presión de trabajo.

El extremo de manguera que conduce el flujo de aire hacia la columna se encuentra unido a una lanza, la cual está inserta en la base. Esta posee una válvula de flujo que regula el ingreso de aire.



Figura 80: Compresor de aire, sistema de mangueras y conjunto manómetro-válvula.



Figura 81: Válvula de flujo.

La formación de burbujas dentro de la columna se logra con un inyector que se encuentra inserto en la lanza, el cual es un tubo poroso hueco de 10 [cm] de largo que posee un diámetro exterior de 2.4 [cm] y un diámetro interior de 1.8 [cm].

Dicho tubo se formó mediante la unión de partículas de acero inoxidable de un cierto tamaño (ya sea de 5 ó 10 μm) con un pegamento especial. Luego el tubo fue calentado en un horno en el que las partículas se sinterizaron, formando así la estructura porosa.

Por lo tanto el tubo no posee poros del tamaño de las partículas sino que los espacios entre las partículas permiten la circulación de aire y la formación de burbujas a través de este.

En este trabajo se utilizó tanto el inyector de partículas de 5 [μm] como el de 10 [μm], los cuales se nombraron como inyector fino y grueso respectivamente.



Figura 82: Inyector y lanza.



Figura 83: Inyector inserto en lanza.

6.2.2 Experimento N°1: Método de probeta invertida

Para llevar a cabo esta prueba se utilizó el método de la probeta invertida con el fin de realizar las mediciones de $J_{g,local}$. Este método consiste en introducir de forma vertical un tubo de una cierta longitud dentro de la columna. El tubo se encuentra lleno de agua, sellado en ambos extremos por dos tapones, sin embargo el tapón del extremo inferior se encuentra sujeto por un sistema de cuerdas que permite su retiro en cualquier instante.

Una vez que se inyecta aire dentro de la columna se retira el tapón del extremo inferior del tubo lo que permite el ascenso de burbujas por este, lo que disminuye su nivel de agua por desplazamiento del gas durante el transcurso del tiempo. Esto permite obtener un valor local de la velocidad superficial del gas.

Para aplicar este método se utilizaron tres tubos de acrílico transparente, cada uno de largo 1.3 [m] los cuales poseen los siguientes diámetros externos e internos:

- 10 [mm] y 8 [mm]
- 20 [mm] y 14 [mm]
- 50 [mm] y 44 [mm]

Las Figuras 84-85 muestran los tubos de acrílico utilizados y su disposición dentro de la columna.

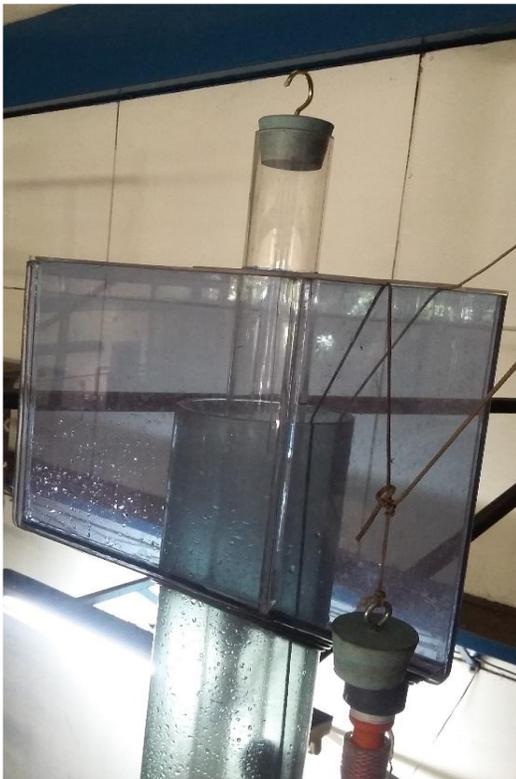


Figura 84: Tubo de acrílico inserto dentro de la columna junto con tapón superior e inferior con sistema de cuerdas.



Figura 85: Tubos de acrílico y soporte utilizado para sostenerlos en la parte superior de la columna.

El método de la probeta invertida considero lo siguiente:

- Los tubos se sujetaron en el contenedor de espuma mediante un soporte de acrílico, el cual permitió que cada uno pudiera sumergirse en 50 [cm] de agua al trabajar con una altura inicial de columna de agua de 2.60 [m].
- Dicho soporte permitió que los tubos se posicionaran en el centro de la columna y que este se mantuviera vertical en todo instante.
- El descenso del nivel de agua dentro del tubo se registró mediante una cámara de video para que la medición de los tiempos fuese lo más precisa posible.
- La longitud del tubo registrada fue la porción que se encontraba fuera de la columna (longitud del tubo en superficie de 20 cm), debido a que el rebalse de la columna no permitió ver el descenso de líquido en la porción interna de esta (Figura 86).



Figura 86: Longitud del tubo en superficie de la columna.

6.2.3 Experimento N°3: Bubble Viewer®

El equipo Bubble Viewer® es utilizado principalmente en columnas de flotación y permite tomar fotografías de burbujas, consiste en lo siguiente:

- Un recipiente cilíndrico de 20 [cm] de largo y 28.5 [cm] de diámetro, el cual posee una pantalla de vidrio en su parte frontal para la visualización de las burbujas. Posee una tapa en su parte superior para su llenado con agua y posee una capacidad de almacenaje de 7.0 [L].
- El recipiente posee una placa de vidrio inclinada ubicada en su interior, la que permite desviar la trayectoria de las burbujas hacia la parte frontal, esto para mejorar la precisión de las fotografías.
- Posee un soporte de ancho 36.5 [cm], largo 59.5 [cm] y una altura de 25.5 [cm] respectivamente. Este permite sostener el recipiente y además permite el posicionamiento de una cámara fotográfica (en este experimento se utilizó una cámara Nikon D7200).



Figura 87: Bubble Viewer® (vista perfil).



Figura 88: Bubble Viewer® (vista frontal).

Para su funcionamiento, el equipo se debe posicionar en la parte superior de la columna y conectarse con esta mediante un tubo de largo 2.08 [m] (tubo de muestreo B.V.) el cual se encuentra sumergido a una profundidad dada de la columna de agua.

La instalación y uso de Bubble Viewer® se explica en los siguientes puntos:

1. En el extremo inferior del tubo de muestreo se debe colocar un tapón que impida las filtraciones de agua. Este tapón se debe amarrar a un sistema de cuerdas que permita su retiro en cualquier instante.
2. El extremo inferior del tubo debe sumergirse en la columna de agua a una profundidad dada mientras que el extremo superior se debe conectar con el recipiente.
3. Tanto el tubo de muestreo como el recipiente se deben llenar de agua mediante la apertura de la tapa ubicada en la parte superior de este último. Cabe señalar que el volumen de agua utilizado tanto en el recipiente como en el tubo de muestreo es adicional al volumen utilizado en la columna de agua. Este último indicará la dosis de espumante requerida para alcanzar una concentración dada.

- Una vez que la cámara ya haya sido instalada, se puede inyectar aire en la columna y retirar el tapón del tubo de muestreo en cualquier instante. Las burbujas ascenderán por este tubo y desplazarán el volumen de líquido contenido en el recipiente hacia abajo. En dicho instante se puede realizar la toma de fotografías hasta que el nivel de agua del recipiente descienda lo suficiente a tal punto de no poder visualizar las burbujas.

Las Figuras 30-93 muestran el equipo Bubble Viewer® instalado en la columna piloto 3-D.



Figura 89: Columna piloto 3-D, con equipo Bubble Viewer® en parte superior.



Figura 90: Equipo Bubble Viewer® con cámara fotográfica montado en la parte superior de la columna.



Figura 91: Tubo de muestreo de Bubble Viewer® con válvula.



Figura 92: Tubo de muestreo de Bubble Viewer® conectado con columna.



Figura 93: Extremo inferior de tubo de muestreo de Bubble Viewer® sellado con tapón.

6.3 Detalle resultados Columna Piloto 3-D

6.3.1 Experimento N°1: Análisis estadístico de datos en método de probeta invertida

La Tabla 35 muestra el análisis estadístico de los tiempos de medición, mientras que la Tabla 36 muestra el análisis de $J_{g \text{ local}}$ respectivo.

Tabla 35: Análisis estadístico para tiempos de medición.

Condición de trabajo a 0.4 [bar]	Diámetro Interno [cm]																	
	0.8						1.4						4.4					
	$\Delta t_{\text{medición}}$ [s]			Media	Desv. Est.	Coef. Var.	$\Delta t_{\text{medición}}$ [s]			Media	Desv. Est.	Coef. Var.	$\Delta t_{\text{medición}}$ [s]			Media	Desv. Est.	Coef. Var.
Inyector Grueso 0.3 gpl	33.19	42.86	29.01	35.02	7.11	20.3%	18.49	20.01	16.23	18.24	1.90	10%	5.71	5.89	8.97	6.86	1.83	26.7%
Inyector Grueso 0.1 gpl	20.26	29.19	26.47	25.30	4.58	18.1%	18.16	17.04	18.65	17.95	0.82	5%	11.93	12.82	10.74	11.83	1.04	8.8%
Inyector Fino 0.3 gpl	32.48	29.74	29.72	30.65	1.59	5.2%	24.46	23.18	25.17	24.27	1.01	4%	14.71	13.55	15.29	14.51	0.89	6.1%
Inyector Fino 0.1 gpl	35.90	33.52	32.26	33.89	1.85	5.5%	25.42	29.15	36.32	30.29	5.54	18%	32.93	26.02	21.40	26.78	5.80	21.7%

Tabla 36: Análisis estadístico para $J_{g \text{ local}}$.

Condición de trabajo a 0.4 [bar]	Diámetro Interno [cm]																	
	0.8						1.4						4.4					
	$J_{g \text{ local}}$ [cm/s]			Media	Desv. Est.	Coef. Var.	$J_{g \text{ local}}$ [cm/s]			Media	Desv. Est.	Coef. Var.	$J_{g \text{ local}}$ [cm/s]			Media	Desv. Est.	Coef. Var.
Inyector Grueso 0.3 gpl	0.58	0.45	0.66	0.56	0.11	19.2%	1.00	0.92	1.14	1.02	0.11	11%	3.07	2.80	1.95	2.61	0.58	22.3%
Inyector Grueso 0.1 gpl	0.91	0.66	0.70	0.75	0.14	18.0%	1.05	1.11	1.02	1.06	0.05	5%	1.47	1.36	1.61	1.48	0.12	8.2%
Inyector Fino 0.3 gpl	0.57	0.64	0.62	0.61	0.04	5.9%	0.76	0.80	0.74	0.76	0.03	4%	1.19	1.29	1.14	1.21	0.08	6.2%
Inyector Fino 0.1 gpl	0.53	0.56	0.57	0.55	0.02	4.3%	0.74	0.64	0.52	0.63	0.11	18%	0.52	0.63	0.79	0.65	0.14	20.9%

En cada condición de trabajo hubo rebalse de agua, el cual inició a un tiempo determinado transcurrida la inyección de aire. Estos valores se obtuvieron del registro audiovisual y se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37: Análisis estadístico para tiempos de espera de rebalse.

Condición de trabajo a 0.4 [bar]	Diámetro Interno [cm]																	
	0.8						1.4						4.4					
	$\Delta t_{\text{espera rebalse}}$ [s]			Media	Desv. Est.	Coef. Var.	$\Delta t_{\text{espera rebalse}}$ [s]			Media	Desv. Est.	Coef. Var.	$\Delta t_{\text{espera rebalse}}$ [s]			Media	Desv. Est.	Coef. Var.
Inyector Grueso 0.3 gpl	12.00	12.00	12.00	12.00	0.00	0.0%	20.00	18.00	14.00	17.33	3.06	18%	10.00	14.00	18.00	14.00	4.00	28.6%
Inyector Grueso 0.1 gpl	13.00	17.00	17.00	15.67	2.31	14.7%	12.00	15.00	15.00	14.00	1.73	12%	16.00	13.00	10.00	13.00	3.00	23.1%
Inyector Fino 0.3 gpl	36.00	32.00	29.00	32.33	3.51	10.9%	32.00	35.00	35.00	34.00	1.73	5%	27.00	27.00	28.00	27.33	0.58	2.1%
Inyector Fino 0.1 gpl	36.00	40.00	35.00	37.00	2.65	7.2%	30.00	28.00	43.00	33.67	8.14	24%	34.00	26.00	24.00	28.00	5.29	18.9%

Dado que las condiciones de trabajo en los tres experimentos fueron equivalentes, los valores de la Tabla 37 son análogos para cada experimento.

6.3.2 Experimento N°2: Detalle de resultados

6.3.2.1 Rebalse de agua curvas ajustadas de concentración vs. tiempo

Los ajustes de cada curva de concentración – tiempo para la cota superior¹³ se muestran en la Figura 94.

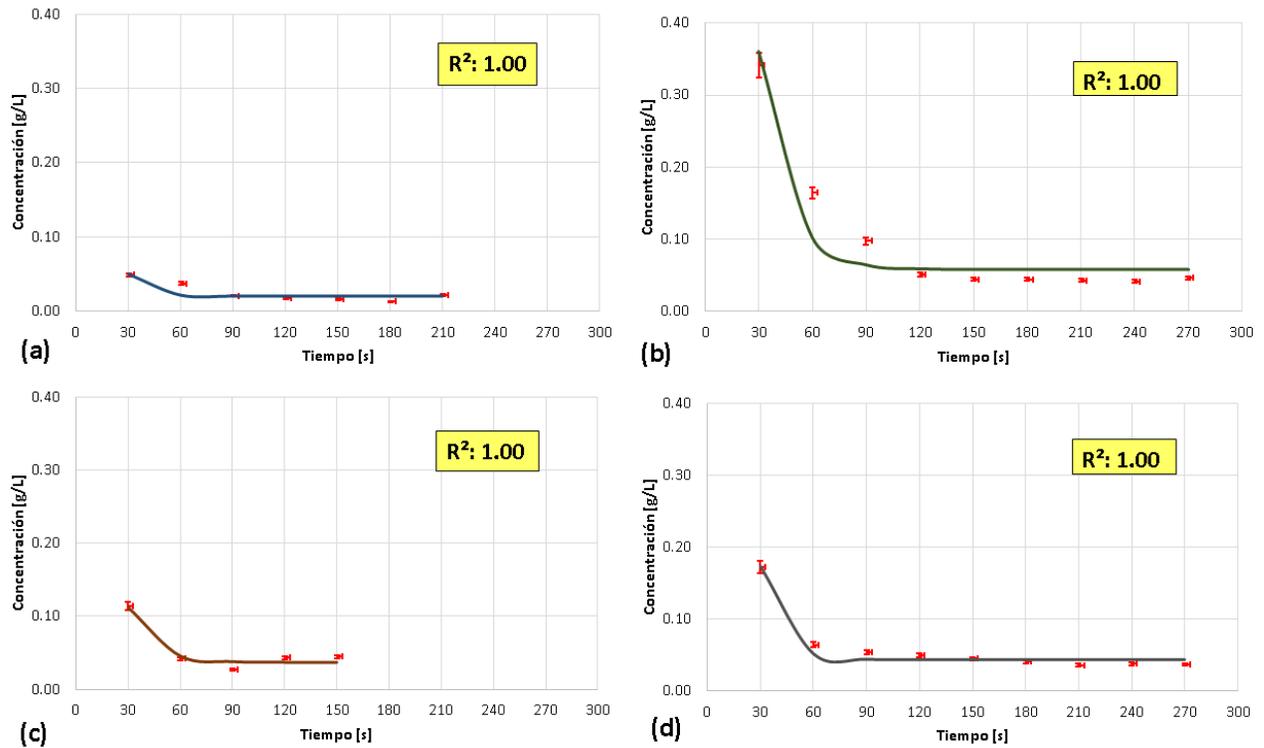


Figura 94: Curva ajustada de concentración de espumante vs. tiempo en cota superior: (a) Inyector Fino - 0.1 gpl (b) Inyector Fino - 0.3 gpl (c) Inyector Grueso - 0.1 gpl (d) Inyector Grueso - 0.3 gpl.

Dado que la toma de muestras en la cota superior se realizó sólo si hubo rebalse al momento de la extracción, la Figura 94 indica el tiempo final de rebalse. Esta información sumada a la obtenida de la Tabla 37 permiten estimar el rebalse por condición de trabajo, lo cual se presenta en la Tabla 38.

Tabla 38: Detalle de rebalse por condición de trabajo¹⁴.

Condición de trabajo a 0.4 [bar]	Tiempo inicial de rebalse [s]	Tiempo final de rebalse [s]	Pérdidas promedio de agua en rebalse [L]	Caudal promedio [L/s]
Inyector Fino – 0.1 gpl	32.89	210	13.65	0.077
Inyector Fino – 0.3 gpl	31.22	270	13.65	0.057
Inyector Grueso – 0.1 gpl	14.22	150	13.65	0.100
Inyector Grueso – 0.3 gpl	14.44	270	13.65	0.053

¹³Este ajuste consideró la concentración inicial agregada en la parte superior de la columna, la cual no se muestra en los gráficos.

¹⁴Estos datos son análogos para cada experimento.

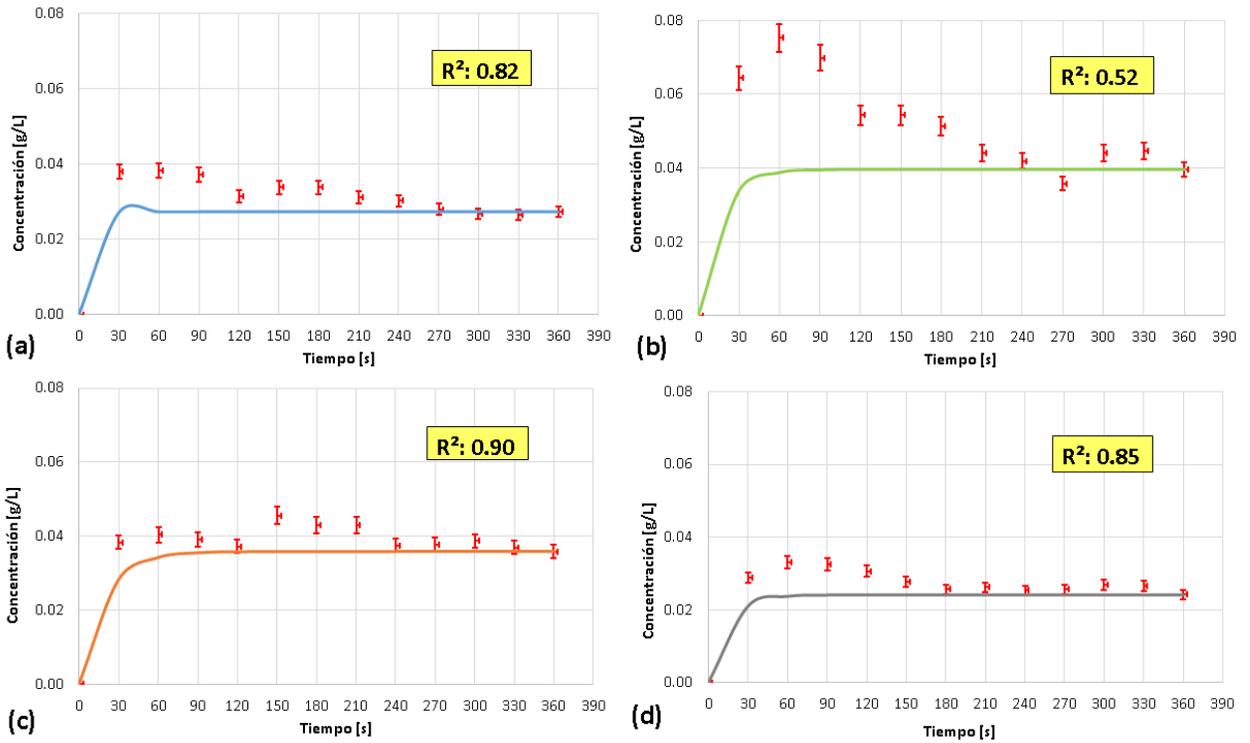


Figura 95: Curva ajustada de concentración de espumante vs. tiempo en cota media: (a) Inyector Fino - 0.1 gpl (b) Inyector Fino - 0.3 gpl (c) Inyector Grueso - 0.1 gpl (d) Inyector Grueso - 0.3 gpl.

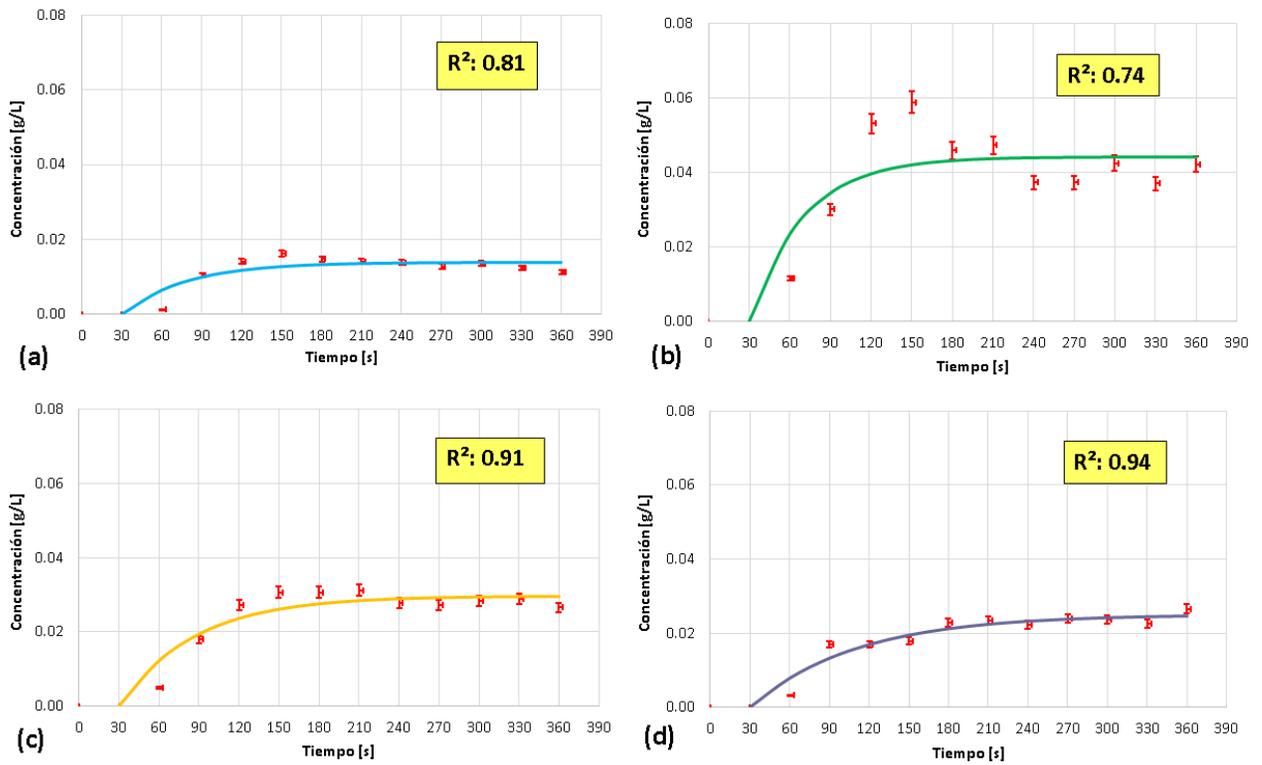


Figura 96: Curva ajustada de concentración de espumante vs. tiempo en cota inferior: (a) Inyector Fino - 0.1 gpl (b) Inyector Fino - 0.3 gpl (c) Inyector Grueso - 0.1 gpl (d) Inyector Grueso - 0.3 gpl.

6.3.2.2 Resultados modelo de tiempo de mezcla

La Tabla 39 muestra el detalle del ajuste realizado con el modelo de tiempo de mezcla.

Tabla 39: Detalle de ajuste de modelo de tiempo de mezcla.

Condición de trabajo a 0.4 [bar]	$J_g \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$	Cota	Profundidad (H) [cm]	$t_{\text{mezcla}} \text{ experimental [s]}$	$t_{\text{mezcla}} \text{ modelo [s]}$
Inyector Grueso 0.3 gpl	4.38	Alta	0	67	90
		Media	164	34	51
		Baja	320	214	178
Inyector Fino 0.3 gpl	1.25	Alta	0	91	66
		Media	164	36	27
		Baja	320	121	153
Inyector Fino 0.1 gpl	0.65	Alta	0	56	61
		Media	164	14	22
		Baja	320	140	149
Inyector Grueso 0.1 gpl	1.51	Alta	0	71	68
		Media	164	45	29
		Baja	320	160	155

6.3.3 Experimento N°3: Corrección de tamaños de burbuja

El software ImageJ® reconoce cambios en la escala de colores de la fotografía para reconocer partículas y asignarles un área determinada. Esto se realiza identificando el espesor de cada burbuja. Suponiendo que las burbujas son circulares, es posible determinar el diámetro de estas.

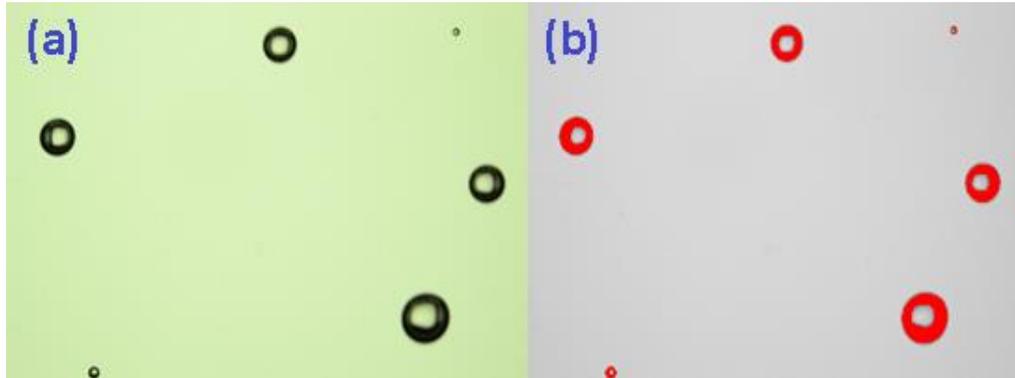


Figura 97: Identificación de burbujas mediante software ImageJ®: (a) Fotografía inicial (b) Fotografía analizada.

Sin embargo existe un sesgo debido a que el software permite identificar partículas hasta un cierto tamaño mínimo. Burbujas bajo dicho tamaño generan una alta proporción de finos en los histogramas lo cual se ve en las Figuras 98-101.

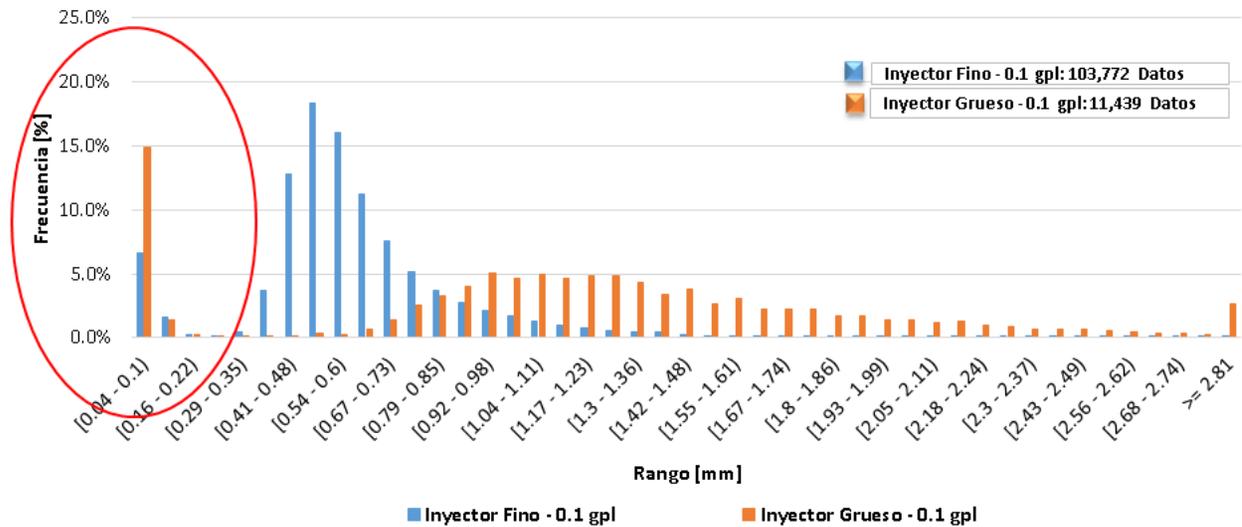


Figura 98: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (incluye datos sesgados).

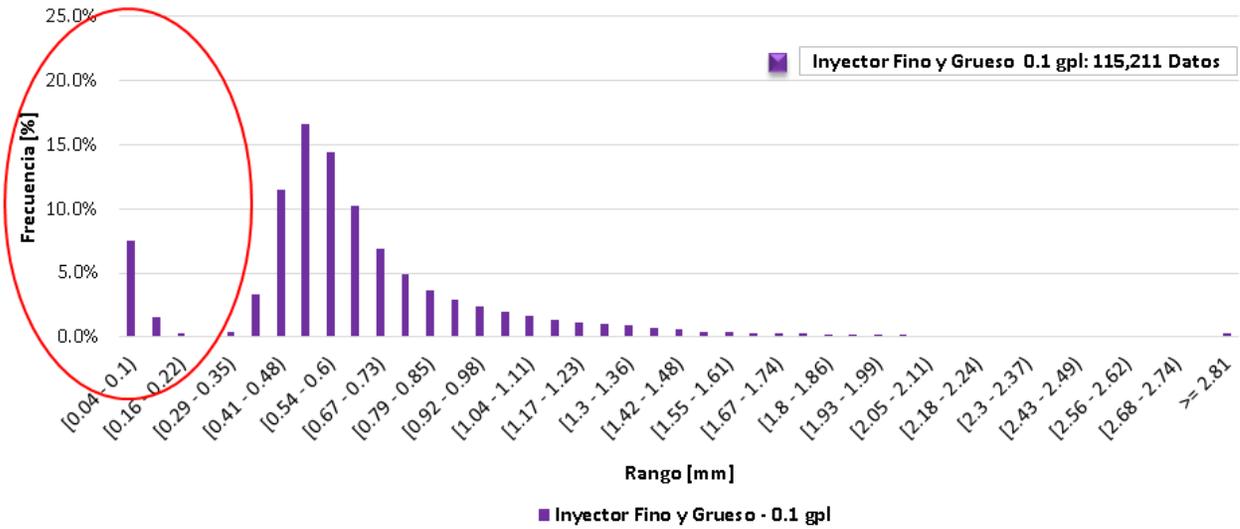


Figura 99: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (total de datos). Incluye datos sesgados.

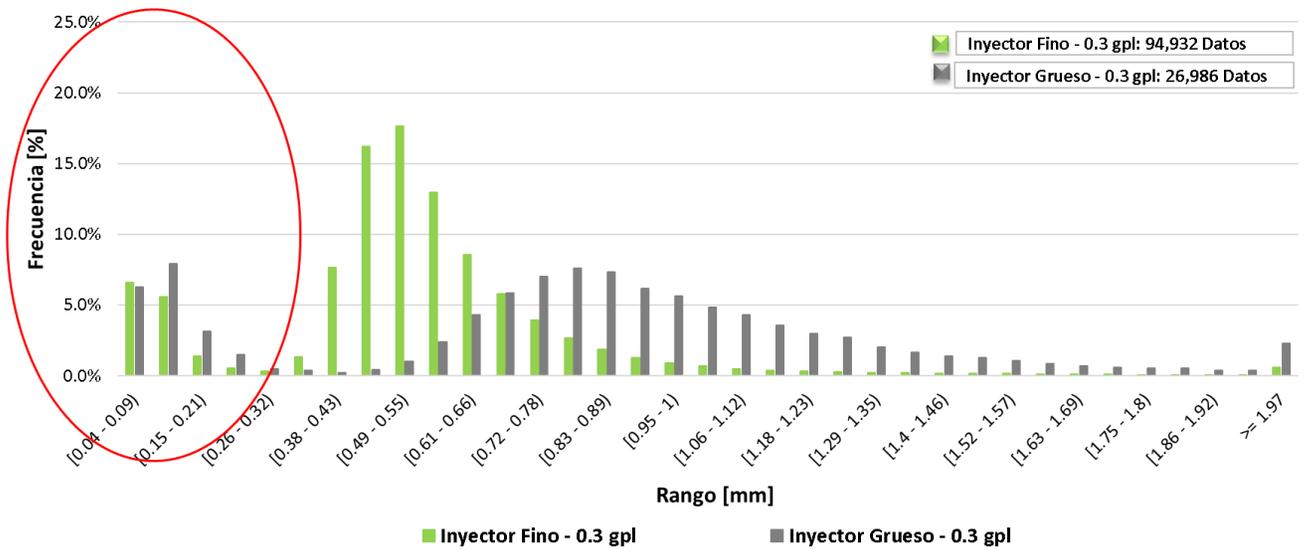


Figura 100: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.3 gpl (incluye datos sesgados).

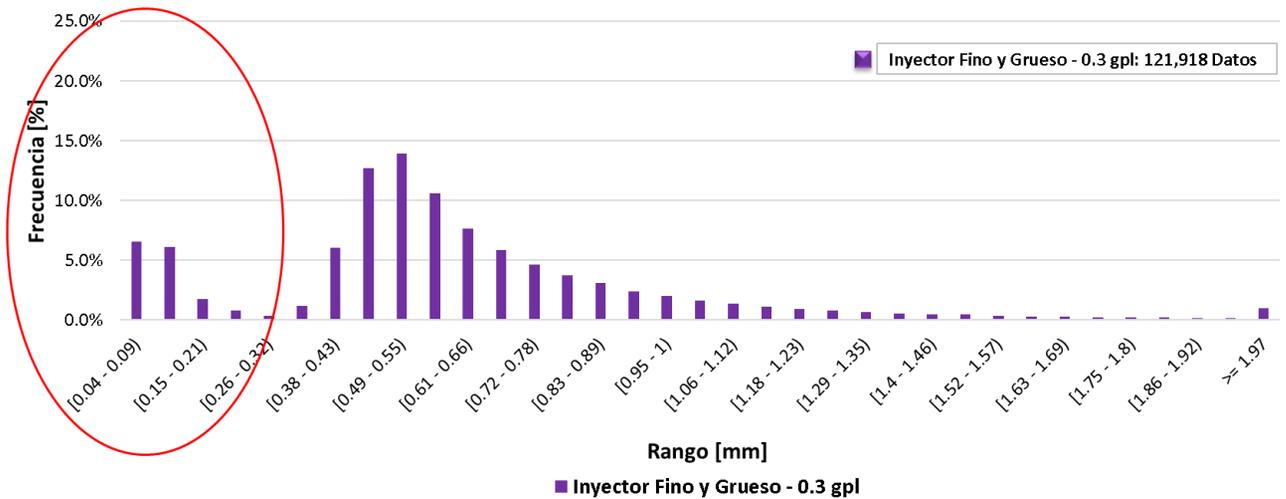


Figura 101: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (total de datos). Incluye datos sesgados.

Para establecer el tamaño mínimo de burbujas que logra identificar el software se define un diámetro mínimo el cual depende del espesor característico de burbuja (\bar{e}) el cual se calcula de la siguiente forma,

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N e_i \quad (38)$$

Es decir, se analizó una muestra representativa de burbujas y se calculó su espesor promedio de acuerdo a la Ecuación (38). Luego el tamaño mínimo se determina con la siguiente expresión (Figura 102),

$$d_{\text{mín}} = 3 \cdot \bar{e} \quad (39)$$

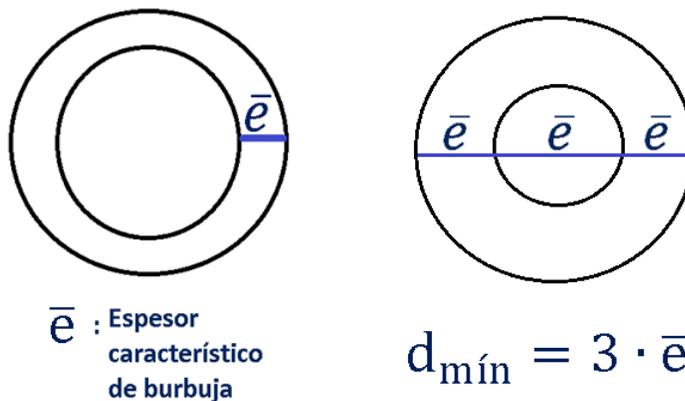


Figura 102: Espesor característico y cálculo de diámetro mínimo de burbuja.

La Figura 103 muestra la distribución de espesores obtenida.

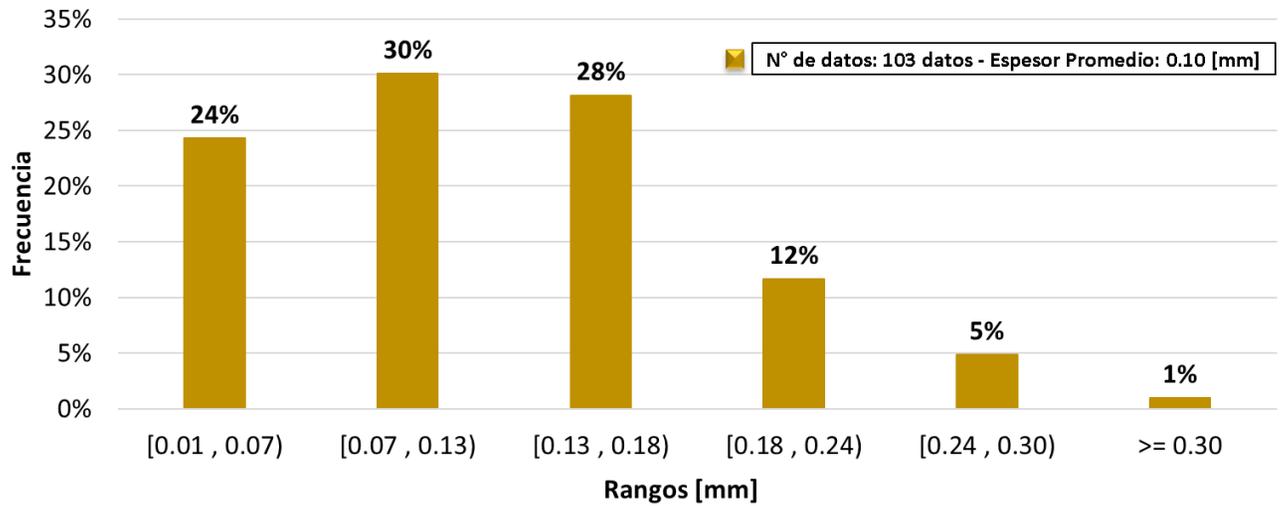


Figura 103: Distribución de espesores de burbujas (fotografías analizadas en condición inyector Grueso - 0.1 gpl).

De acuerdo a los resultados obtenidos de la Figura 103 se filtraron los datos de las Figuras 98-101 por un diámetro mínimo de 0.29 [mm].

6.4 Curvas de calibración de reactivos en agua potable

En este trabajo se utilizó un espectrofotómetro, el cual es un instrumento usado en el análisis químico que sirve para realizar medidas de proporciones de longitud de onda absorbida, en un determinado rango de trabajo, lo cual se mide en unidades de absorbancia.



Figura 104: Espectrofotómetro.

Para realizar las curvas de calibración primero se registraron los valores de absorbancias (desde 190 hasta 900 nm) para diversas concentraciones conocidas tanto del sulfato pentahidratado de cobre (desde 1 gpl hasta 5 gpl) como del espumante Aerofroth 70 Plus (desde 0.05 hasta 0.5 gpl). Con el fin de minimizar el error de medición se realizaron diversas repeticiones de este procedimiento para cada reactivo (2 para el sulfato y 5 para el espumante) y se utilizó el valor promedio de las absorbancias (para cada concentración y longitud de onda), de este modo se procede a determinar la mejor correlación entre los datos lo cual se muestra en la sección 6.5 y 6.6.

Al existir más de una solución factible para determinar la curva de calibración (dadas por el alto valor del coeficiente de correlación lineal R^2 para más de una longitud de onda), se procede a determinar la solución óptima mediante el Coeficiente de Variación el cual se define de la siguiente forma,

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (40)$$

Donde σ y \bar{X} son desviación estándar y la media de todas la mediciones realizadas, luego el criterio a utilizar será elegir la longitud de onda que tenga asociado el mayor coeficiente de correlación lineal R^2 y que a la vez que el Coeficiente de Variación asociado a cada concentración no supere el valor de 20%. Es decir para una longitud de onda dada se debe cumplir la siguiente condición,

$$CV_i \leq 20\% \quad (41)$$

Siendo i el valor de cada concentración conocida.

6.4.1 Sulfato pentahidratado de cobre

De la Tabla 42 y Tabla 43 (Anexo 6.5) se tiene que la solución óptima viene dada por la longitud de onda de 810 [nm], luego la curva de calibración a utilizar viene dada por la relación,

$$C = 11.769 \cdot A - 0.5409 \quad (42)$$

Siendo A la absorbancia para la longitud de onda de 810 [nm] y C la concentración de espumante en [gpl], la Figura 105 muestra de forma gráfica la curva obtenida.

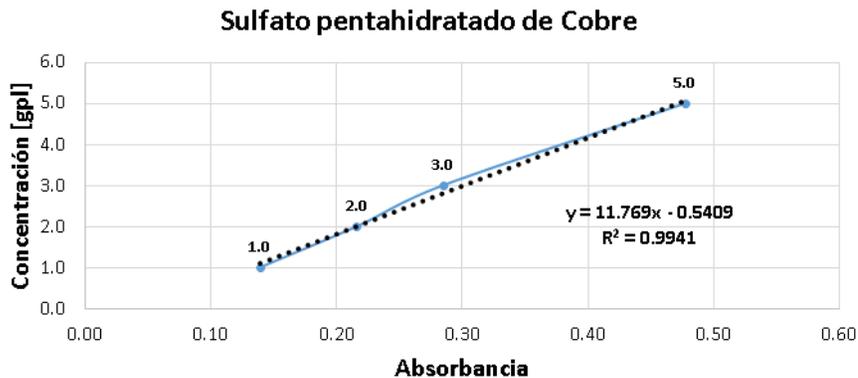


Figura 105: Curva de calibración de sulfato pentahidratado de cobre para una longitud de onda de 810 [nm].

6.4.2 Espumante Aerofroth 70 Plus

De la Tabla 49 y Tabla 50 (Anexo 6.6) se tiene que la solución óptima viene dada por la longitud de onda de 232 nm, luego la curva de calibración a utilizar viene dada por la relación,

$$C = 0.2883 \cdot A - 0.0063 \quad (43)$$

Siendo A la absorbancia para la longitud de onda de 232 nm y C la concentración de espumante en [gpl], la Figura 106 muestra de forma gráfica la curva obtenida.

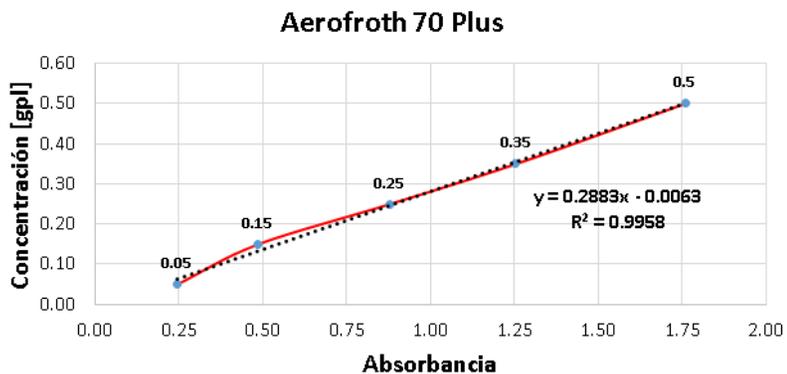


Figura 106: Curva de calibración para una longitud de onda de 232 [nm].

6.5 Valores de absorbancia para sulfato pentahidratado de cobre

En esta sección se presentan los resultados de cada medición realizada con el espectrofotómetro¹⁵.

Tabla 40: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (primera medición).

Longitud de onda λ [nm]	Valores de Absorbancia (primera medición)			
	Concentración [gpl]			
	1.0	2.0	3.0	5.0
550	0.128	0.159	0.152	0.271
560	0.127	0.155	0.151	0.27
570	0.127	0.154	0.152	0.269
580	0.126	0.152	0.153	0.27
590	0.126	0.151	0.153	0.27
600	0.127	0.15	0.154	0.272
610	0.127	0.151	0.157	0.275
620	0.127	0.15	0.16	0.28
630	0.128	0.152	0.165	0.286
640	0.13	0.154	0.17	0.294
650	0.131	0.155	0.174	0.302
660	0.133	0.158	0.182	0.315
670	0.136	0.163	0.189	0.327
680	0.137	0.165	0.196	0.339
690	0.139	0.171	0.205	0.354
700	0.14	0.176	0.214	0.367
710	0.144	0.18	0.222	0.381
720	0.146	0.184	0.23	0.397
730	0.148	0.187	0.237	0.407
740	0.15	0.192	0.246	0.422
750	0.151	0.195	0.253	0.433
760	0.153	0.199	0.257	0.443
770	0.152	0.201	0.263	0.448
780	0.154	0.204	0.268	0.454
790	0.155	0.201	0.268	0.458
800	0.155	0.203	0.272	0.459
810	0.155	0.201	0.272	0.458
820	0.155	0.199	0.27	0.455
830	0.155	0.199	0.27	0.451
840	0.155	0.195	0.269	0.449
850	0.156	0.196	0.27	0.45
860	0.156	0.194	0.263	0.441
870	0.154	0.19	0.26	0.436
880	0.153	0.183	0.25	0.423
890	0.15	0.184	0.255	0.419
900	0.147	0.182	0.251	0.413

¹⁵ Las absorbancias se midieron en el rango de 190 a 900 nm, sin embargo en esta sección se muestran los datos obtenidos desde la longitud de onda de 550 hasta la de 900 nm respectivamente.

Tabla 41: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (segunda medición).

Longitud de onda λ [nm]	Valores de Absorbancia (segunda medición)			
	Concentración [gpl]			
	1.0	2.0	3.0	5.0
550	0.117	0.195	0.181	0.308
560	0.115	0.19	0.18	0.308
570	0.112	0.186	0.18	0.308
580	0.112	0.185	0.181	0.308
590	0.11	0.182	0.181	0.308
600	0.109	0.182	0.183	0.31
610	0.109	0.181	0.186	0.314
620	0.108	0.181	0.187	0.317
630	0.108	0.182	0.191	0.324
640	0.108	0.185	0.196	0.331
650	0.109	0.186	0.2	0.34
660	0.11	0.19	0.207	0.351
670	0.112	0.194	0.214	0.364
680	0.114	0.197	0.221	0.377
690	0.116	0.202	0.229	0.392
700	0.118	0.207	0.239	0.405
710	0.119	0.21	0.245	0.421
720	0.121	0.215	0.255	0.436
730	0.122	0.219	0.263	0.448
740	0.124	0.222	0.269	0.46
750	0.125	0.226	0.276	0.471
760	0.125	0.228	0.282	0.484
770	0.124	0.23	0.286	0.487
780	0.124	0.233	0.289	0.494
790	0.124	0.23	0.292	0.5
800	0.126	0.232	0.295	0.5
810	0.124	0.232	0.298	0.497
820	0.123	0.229	0.293	0.496
830	0.12	0.228	0.292	0.489
840	0.12	0.224	0.291	0.488
850	0.119	0.225	0.29	0.489
860	0.12	0.225	0.288	0.484
870	0.116	0.219	0.285	0.478
880	0.113	0.213	0.277	0.469
890	0.112	0.21	0.274	0.457
900	0.11	0.208	0.272	0.45

Tabla 42: Valor promedio de absorbancia para concentraciones conocidas (ambas mediciones).

Longitud de onda λ [nm]	Valor promedio de absorbancia \bar{X}				Coeficiente de correlación lineal R^2
	Concentración [gpl]				
	1.0	2.0	3.0	5.0	
550	0.123	0.177	0.167	0.290	0.901
560	0.121	0.173	0.166	0.289	0.910
570	0.120	0.170	0.166	0.289	0.919
580	0.119	0.169	0.167	0.289	0.926
590	0.118	0.167	0.167	0.289	0.931
600	0.118	0.166	0.169	0.291	0.935
610	0.118	0.166	0.172	0.295	0.943
620	0.118	0.166	0.174	0.299	0.948
630	0.118	0.167	0.178	0.305	0.954
640	0.119	0.170	0.183	0.313	0.959
650	0.120	0.171	0.187	0.321	0.962
660	0.122	0.174	0.195	0.333	0.968
670	0.124	0.179	0.202	0.346	0.970
680	0.126	0.181	0.209	0.358	0.973
690	0.128	0.187	0.217	0.373	0.976
700	0.129	0.192	0.227	0.386	0.981
710	0.132	0.195	0.234	0.401	0.981
720	0.134	0.200	0.243	0.417	0.983
730	0.135	0.203	0.250	0.428	0.986
740	0.137	0.207	0.258	0.441	0.987
750	0.138	0.211	0.265	0.452	0.988
760	0.139	0.214	0.270	0.464	0.988
770	0.138	0.216	0.275	0.468	0.991
780	0.139	0.219	0.279	0.474	0.991
790	0.140	0.216	0.280	0.479	0.991
800	0.141	0.218	0.284	0.480	0.993
810	0.140	0.217	0.285	0.478	0.994
820	0.139	0.214	0.282	0.476	0.993
830	0.138	0.214	0.281	0.470	0.994
840	0.138	0.210	0.280	0.469	0.994
850	0.138	0.211	0.280	0.470	0.994
860	0.138	0.210	0.276	0.463	0.993
870	0.135	0.205	0.273	0.457	0.993
880	0.133	0.198	0.264	0.446	0.991
890	0.131	0.197	0.265	0.438	0.995
900	0.129	0.195	0.262	0.432	0.995

Tabla 43: Análisis estadístico de valores de absorbancia (ambas mediciones).

Long. de onda λ [nm]	Desviación estándar de absorbancia σ				Coeficiente de variación CV [%]				
	Concentración [gpl]				Concentración [gpl]				Prom.
	1.0	2.0	3.0	5.0	1.0	2.0	3.0	5.0	
550	0.008	0.025	0.021	0.026	6%	14%	12%	9%	10.5%
560	0.008	0.025	0.021	0.027	7%	14%	12%	9%	10.8%
570	0.011	0.023	0.020	0.028	9%	13%	12%	10%	10.9%
580	0.010	0.023	0.020	0.027	8%	14%	12%	9%	10.8%
590	0.011	0.022	0.020	0.027	10%	13%	12%	9%	11.0%
600	0.013	0.023	0.021	0.027	11%	14%	12%	9%	11.5%
610	0.013	0.021	0.021	0.028	11%	13%	12%	9%	11.2%
620	0.013	0.022	0.019	0.026	11%	13%	11%	9%	11.1%
630	0.014	0.021	0.018	0.027	12%	13%	10%	9%	11.0%
640	0.016	0.022	0.018	0.026	13%	13%	10%	8%	11.1%
650	0.016	0.022	0.018	0.027	13%	13%	10%	8%	11.0%
660	0.016	0.023	0.018	0.025	13%	13%	9%	8%	10.8%
670	0.017	0.022	0.018	0.026	14%	12%	9%	8%	10.6%
680	0.016	0.023	0.018	0.027	13%	13%	8%	8%	10.4%
690	0.016	0.022	0.017	0.027	13%	12%	8%	7%	9.9%
700	0.016	0.022	0.018	0.027	12%	11%	8%	7%	9.6%
710	0.018	0.021	0.016	0.028	13%	11%	7%	7%	9.6%
720	0.018	0.022	0.018	0.028	13%	11%	7%	7%	9.5%
730	0.018	0.023	0.018	0.029	14%	11%	7%	7%	9.7%
740	0.018	0.021	0.016	0.027	13%	10%	6%	6%	9.0%
750	0.018	0.022	0.016	0.027	13%	10%	6%	6%	9.0%
760	0.020	0.021	0.018	0.029	14%	10%	7%	6%	9.2%
770	0.020	0.021	0.016	0.028	14%	10%	6%	6%	8.9%
780	0.021	0.021	0.015	0.028	15%	9%	5%	6%	9.0%
790	0.022	0.021	0.017	0.030	16%	10%	6%	6%	9.4%
800	0.021	0.021	0.016	0.029	15%	9%	6%	6%	9.0%
810	0.022	0.022	0.018	0.028	16%	10%	6%	6%	9.5%
820	0.023	0.021	0.016	0.029	16%	10%	6%	6%	9.5%
830	0.025	0.021	0.016	0.027	18%	10%	6%	6%	9.7%
840	0.025	0.021	0.016	0.028	18%	10%	6%	6%	9.8%
850	0.026	0.021	0.014	0.028	19%	10%	5%	6%	9.9%
860	0.025	0.022	0.018	0.030	18%	10%	6%	7%	10.5%
870	0.027	0.021	0.018	0.030	20%	10%	6%	6%	10.7%
880	0.028	0.021	0.019	0.033	21%	11%	7%	7%	11.6%
890	0.027	0.018	0.013	0.027	21%	9%	5%	6%	10.3%
900	0.026	0.018	0.015	0.026	20%	9%	6%	6%	10.4%

La Figura 107 muestra la curva de absorbancia – longitud de onda en el rango de 190 hasta 900 nm (usando los valores registrados de la Tabla 42).

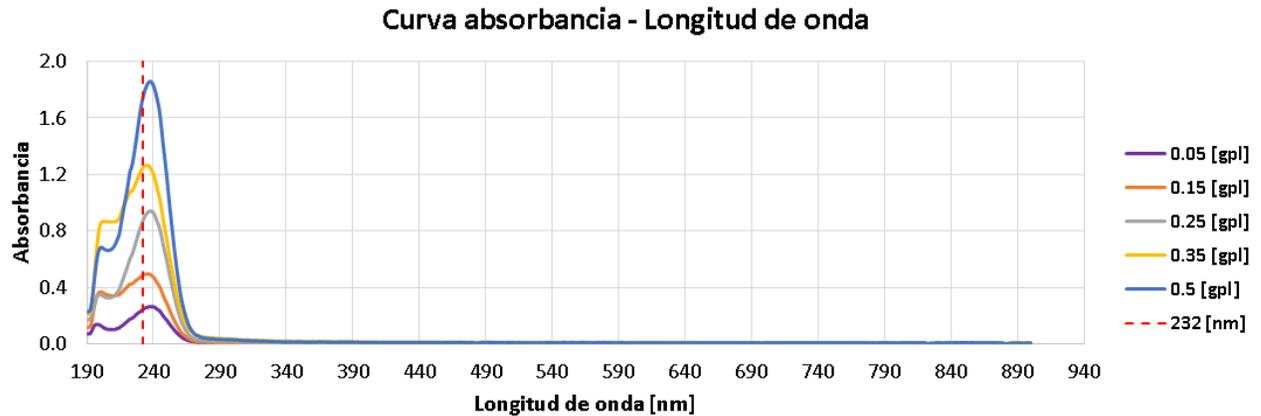


Figura 107: Curva de absorbancia – longitud de onda en el rango de 190 – 900 nm.

La Figura 108 presenta el coeficiente de correlación y el promedio del coeficiente de variación en el rango de 190 hasta 900 [nm] (usando los valores de la Tabla 42 y Tabla 43 respectivamente). Se observa que si bien existen soluciones factibles en el rango de 290 a 340 nm, en este la muestra se encuentra saturada debido a los mismos valores de absorbancias a distintas concentraciones, como se muestra en la Figura 107, razón por la cual se decide tomar la solución en la longitud de onda de 810 [nm].

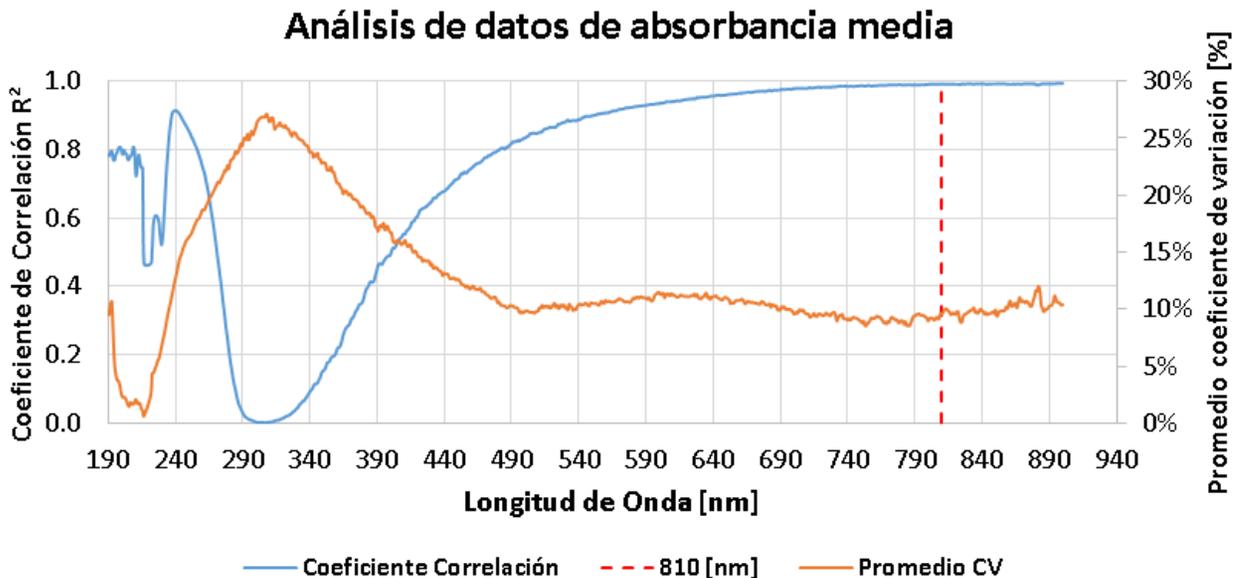


Figura 108: Coeficiente de correlación y promedio del coeficiente de variación en el rango de 190 hasta 900 nm.

6.6 Valores de absorbancia para espumante Aerofroth 70 Plus

En esta sección se presentan los resultados de cada medición realizada con el espectrofotómetro¹⁶.

Tabla 44: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (primera medición).

Longitud de onda λ [nm]	Valores de Absorbancia (primera medición)				
	Concentración [gpl]				
	0.05	0.15	0.25	0.35	0.5
190	0.060	0.125	0.159	0.207	0.216
192	0.062	0.132	0.166	0.222	0.225
194	0.089	0.218	0.230	0.349	0.345
196	0.108	0.335	0.295	0.586	0.510
198	0.100	0.393	0.317	0.784	0.607
200	0.089	0.405	0.317	0.883	0.635
202	0.077	0.393	0.306	0.892	0.630
204	0.072	0.378	0.299	0.892	0.624
206	0.072	0.373	0.299	0.891	0.625
208	0.072	0.368	0.303	0.889	0.637
210	0.074	0.367	0.318	0.888	0.662
212	0.083	0.368	0.338	0.894	0.705
214	0.091	0.372	0.367	0.909	0.757
216	0.105	0.387	0.418	0.968	0.866
218	0.118	0.406	0.472	1.015	0.976
220	0.134	0.421	0.525	1.056	1.088
222	0.155	0.445	0.581	1.102	1.207
224	0.168	0.449	0.627	1.111	1.280
226	0.187	0.464	0.692	1.151	1.398
228	0.207	0.478	0.758	1.198	1.534
230	0.217	0.494	0.820	1.245	1.665
232	0.236	0.512	0.866	1.274	1.758
234	0.246	0.516	0.903	1.282	1.821
236	0.255	0.515	0.925	1.280	1.857
238	0.258	0.505	0.928	1.254	1.864
240	0.256	0.486	0.912	1.208	1.828
242	0.250	0.460	0.870	1.134	1.762
244	0.235	0.429	0.819	1.058	1.667
246	0.206	0.384	0.738	0.951	1.508
248	0.185	0.335	0.649	0.835	1.333
250	0.160	0.299	0.566	0.730	1.157
252	0.128	0.250	0.469	0.608	0.961
254	0.108	0.210	0.383	0.506	0.785
256	0.084	0.168	0.300	0.404	0.616
258	0.065	0.134	0.227	0.317	0.469
260	0.050	0.102	0.164	0.240	0.343
262	0.033	0.086	0.119	0.189	0.253

¹⁶ Las absorbancias se midieron en el rango de 190 a 900 nm, sin embargo en esta sección se muestran los datos obtenidos hasta la longitud de onda de 262 nm respectivamente.

Tabla 45: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (segunda medición).

Longitud de onda λ [nm]	Valores de Absorbancia (segunda medición)				
	Concentración [gpl]				
	0.05	0.15	0.25	0.35	0.5
190	0.074	0.121	0.164	0.209	0.228
192	0.077	0.130	0.168	0.228	0.239
194	0.127	0.201	0.234	0.350	0.358
196	0.172	0.295	0.310	0.572	0.533
198	0.178	0.346	0.347	0.751	0.652
200	0.168	0.360	0.353	0.845	0.692
202	0.152	0.354	0.343	0.855	0.681
204	0.139	0.346	0.329	0.855	0.667
206	0.132	0.337	0.328	0.853	0.664
208	0.129	0.336	0.332	0.852	0.672
210	0.126	0.336	0.342	0.851	0.689
212	0.128	0.339	0.361	0.860	0.729
214	0.132	0.344	0.387	0.876	0.780
216	0.144	0.363	0.441	0.936	0.897
218	0.157	0.381	0.493	0.983	1.004
220	0.172	0.400	0.547	1.025	1.113
222	0.186	0.419	0.606	1.070	1.233
224	0.196	0.423	0.644	1.078	1.292
226	0.211	0.440	0.704	1.120	1.408
228	0.227	0.455	0.767	1.167	1.540
230	0.241	0.470	0.817	1.208	1.670
232	0.256	0.488	0.877	1.243	1.766
234	0.264	0.493	0.915	1.255	1.828
236	0.270	0.493	0.938	1.254	1.865
238	0.271	0.488	0.943	1.231	1.866
240	0.267	0.468	0.921	1.185	1.830
242	0.253	0.438	0.873	1.113	1.756
244	0.247	0.416	0.827	1.040	1.669
246	0.222	0.371	0.747	0.934	1.507
248	0.196	0.326	0.653	0.821	1.330
250	0.173	0.288	0.575	0.721	1.159
252	0.146	0.241	0.481	0.604	0.967
254	0.122	0.200	0.396	0.502	0.791
256	0.103	0.164	0.312	0.405	0.626
258	0.080	0.128	0.236	0.317	0.476
260	0.064	0.097	0.175	0.241	0.352
262	0.049	0.079	0.132	0.189	0.265

Tabla 46: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (tercera medición).

Longitud de onda λ [nm]	Valores de Absorbancia (tercera medición)				
	Concentración [gpl]				
	0.05	0.15	0.25	0.35	0.5
190	0.073	0.120	0.178	0.228	0.238
192	0.078	0.128	0.187	0.245	0.246
194	0.115	0.206	0.249	0.370	0.368
196	0.142	0.300	0.323	0.598	0.554
198	0.143	0.342	0.358	0.789	0.681
200	0.136	0.350	0.360	0.882	0.723
202	0.120	0.337	0.348	0.891	0.707
204	0.104	0.324	0.335	0.886	0.690
206	0.099	0.320	0.331	0.880	0.685
208	0.099	0.317	0.336	0.878	0.690
210	0.099	0.317	0.345	0.876	0.706
212	0.106	0.320	0.362	0.883	0.745
214	0.111	0.325	0.388	0.895	0.793
216	0.127	0.345	0.442	0.958	0.906
218	0.145	0.364	0.493	1.001	1.015
220	0.159	0.383	0.547	1.045	1.121
222	0.177	0.402	0.606	1.091	1.240
224	0.183	0.408	0.645	1.096	1.298
226	0.198	0.424	0.704	1.135	1.412
228	0.213	0.439	0.767	1.180	1.543
230	0.229	0.455	0.827	1.224	1.672
232	0.246	0.467	0.880	1.256	1.767
234	0.257	0.477	0.916	1.267	1.827
236	0.262	0.478	0.937	1.266	1.863
238	0.263	0.470	0.941	1.240	1.865
240	0.259	0.452	0.921	1.195	1.828
242	0.238	0.421	0.874	1.121	1.756
244	0.230	0.401	0.825	1.049	1.666
246	0.209	0.356	0.746	0.946	1.509
248	0.185	0.312	0.659	0.827	1.332
250	0.168	0.274	0.575	0.728	1.165
252	0.137	0.226	0.480	0.613	0.971
254	0.115	0.187	0.396	0.511	0.798
256	0.091	0.150	0.313	0.414	0.631
258	0.073	0.113	0.239	0.325	0.484
260	0.054	0.081	0.177	0.252	0.360
262	0.043	0.064	0.135	0.200	0.273

Tabla 47: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (cuarta medición).

Longitud de onda λ [nm]	Valores de Absorbancia (cuarta medición)				
	Concentración [gpl]				
	0.05	0.15	0.25	0.35	0.5
190	0.067	0.112	0.165	0.211	0.225
192	0.067	0.117	0.167	0.219	0.237
194	0.089	0.188	0.222	0.338	0.349
196	0.108	0.279	0.292	0.556	0.522
198	0.112	0.330	0.330	0.743	0.650
200	0.111	0.341	0.340	0.838	0.699
202	0.104	0.338	0.329	0.848	0.693
204	0.095	0.331	0.324	0.855	0.687
206	0.093	0.325	0.323	0.855	0.683
208	0.093	0.323	0.326	0.855	0.690
210	0.095	0.323	0.338	0.856	0.708
212	0.102	0.328	0.358	0.866	0.744
214	0.108	0.332	0.385	0.881	0.794
216	0.122	0.349	0.439	0.939	0.904
218	0.138	0.370	0.493	0.989	1.008
220	0.158	0.393	0.549	1.032	1.116
222	0.173	0.408	0.604	1.075	1.235
224	0.181	0.414	0.644	1.084	1.298
226	0.197	0.432	0.704	1.127	1.412
228	0.217	0.451	0.770	1.178	1.546
230	0.223	0.459	0.828	1.211	1.672
232	0.241	0.472	0.874	1.241	1.759
234	0.254	0.481	0.911	1.256	1.817
236	0.259	0.481	0.934	1.256	1.856
238	0.260	0.470	0.936	1.232	1.858
240	0.257	0.455	0.917	1.188	1.824
242	0.246	0.424	0.873	1.122	1.756
244	0.232	0.397	0.818	1.042	1.659
246	0.206	0.352	0.740	0.938	1.501
248	0.176	0.306	0.652	0.821	1.328
250	0.158	0.266	0.562	0.717	1.153
252	0.131	0.224	0.470	0.605	0.962
254	0.105	0.182	0.380	0.496	0.783
256	0.082	0.143	0.300	0.401	0.621
258	0.065	0.111	0.228	0.317	0.476
260	0.043	0.080	0.161	0.237	0.354
262	0.032	0.059	0.117	0.183	0.259

Tabla 48: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (quinta medición).

Longitud de onda λ [nm]	Valores de Absorbancia (quinta medición)				
	Concentración [gpl]				
	0.05	0.15	0.25	0.35	0.5
190	0.071	0.115	0.167	0.213	0.218
192	0.073	0.118	0.176	0.219	0.235
194	0.113	0.199	0.234	0.343	0.338
196	0.144	0.301	0.308	0.570	0.504
198	0.148	0.366	0.344	0.753	0.621
200	0.138	0.385	0.353	0.850	0.665
202	0.121	0.378	0.342	0.857	0.661
204	0.114	0.370	0.335	0.860	0.654
206	0.107	0.364	0.332	0.861	0.652
208	0.107	0.360	0.334	0.861	0.660
210	0.107	0.359	0.342	0.862	0.686
212	0.113	0.361	0.364	0.869	0.722
214	0.122	0.365	0.391	0.885	0.773
216	0.134	0.379	0.443	0.947	0.879
218	0.150	0.396	0.494	0.989	0.980
220	0.167	0.418	0.548	1.031	1.085
222	0.183	0.433	0.607	1.077	1.200
224	0.188	0.437	0.651	1.090	1.273
226	0.206	0.453	0.711	1.132	1.388
228	0.222	0.469	0.774	1.180	1.518
230	0.234	0.480	0.835	1.220	1.650
232	0.244	0.486	0.886	1.256	1.742
234	0.255	0.491	0.922	1.268	1.802
236	0.263	0.494	0.937	1.262	1.833
238	0.263	0.484	0.943	1.241	1.839
240	0.262	0.469	0.926	1.197	1.805
242	0.249	0.440	0.880	1.123	1.736
244	0.232	0.408	0.831	1.051	1.643
246	0.209	0.366	0.752	0.949	1.487
248	0.180	0.317	0.663	0.830	1.312
250	0.157	0.277	0.579	0.727	1.143
252	0.139	0.236	0.482	0.611	0.951
254	0.111	0.192	0.395	0.508	0.780
256	0.088	0.155	0.315	0.410	0.616
258	0.068	0.124	0.237	0.319	0.468
260	0.052	0.095	0.177	0.242	0.345
262	0.032	0.067	0.136	0.196	0.261

Tabla 49: Valor promedio de absorbancia para concentraciones conocidas (cinco mediciones).

Longitud de onda λ [nm]	Valor promedio de absorbancia \bar{X}					Coeficiente de correlación lineal R^2
	Concentración [gpl]					
	0.05	0.15	0.25	0.35	0.5	
190	0.069	0.119	0.167	0.214	0.225	0.928
192	0.071	0.125	0.173	0.227	0.236	0.924
194	0.107	0.202	0.234	0.350	0.352	0.896
196	0.135	0.302	0.306	0.576	0.525	0.804
198	0.136	0.355	0.339	0.764	0.642	0.740
200	0.128	0.368	0.345	0.860	0.683	0.700
202	0.115	0.360	0.334	0.869	0.674	0.686
204	0.105	0.350	0.324	0.870	0.664	0.678
206	0.101	0.344	0.323	0.868	0.662	0.679
208	0.100	0.341	0.326	0.867	0.670	0.692
210	0.100	0.340	0.337	0.867	0.690	0.719
212	0.106	0.343	0.357	0.874	0.729	0.757
214	0.113	0.348	0.384	0.889	0.779	0.798
216	0.126	0.365	0.437	0.950	0.890	0.850
218	0.142	0.383	0.489	0.995	0.997	0.893
220	0.158	0.403	0.543	1.038	1.105	0.927
222	0.175	0.421	0.601	1.083	1.223	0.954
224	0.183	0.426	0.642	1.092	1.288	0.971
226	0.200	0.443	0.703	1.133	1.404	0.984
228	0.217	0.458	0.767	1.181	1.536	0.992
230	0.229	0.472	0.825	1.222	1.666	0.995
232	0.245	0.485	0.877	1.254	1.758	0.996
234	0.255	0.492	0.913	1.266	1.819	0.995
236	0.262	0.492	0.934	1.264	1.855	0.994
238	0.263	0.483	0.938	1.240	1.858	0.992
240	0.260	0.466	0.919	1.195	1.823	0.989
242	0.247	0.437	0.874	1.123	1.753	0.986
244	0.235	0.410	0.824	1.048	1.661	0.984
246	0.210	0.366	0.745	0.944	1.502	0.983
248	0.184	0.319	0.655	0.827	1.327	0.982
250	0.163	0.281	0.571	0.725	1.155	0.983
252	0.136	0.235	0.476	0.608	0.962	0.984
254	0.112	0.194	0.390	0.505	0.787	0.986
256	0.090	0.156	0.308	0.407	0.622	0.988
258	0.070	0.122	0.233	0.319	0.475	0.991
260	0.053	0.091	0.171	0.242	0.351	0.991
262	0.038	0.071	0.128	0.191	0.262	0.993

Tabla 50: Análisis estadístico de valores de absorbancia (cinco mediciones).

Long. de onda λ [nm]	Desviación estándar de absorbancia σ					Coeficiente de variación CV [%]					Prom.
	Concentración [gpl]					Concentración [gpl]					
	0.05	0.15	0.25	0.35	0.5	0.05	0.15	0.25	0.35	0.5	
190	0.006	0.005	0.007	0.008	0.009	8%	4%	4%	4%	4%	5%
192	0.007	0.007	0.009	0.011	0.008	10%	6%	5%	5%	3%	6%
194	0.017	0.011	0.010	0.012	0.012	16%	5%	4%	3%	3%	6%
196	0.027	0.020	0.013	0.016	0.020	20%	7%	4%	3%	4%	8%
198	0.031	0.025	0.016	0.021	0.029	23%	7%	5%	3%	5%	8%
200	0.030	0.026	0.017	0.021	0.034	23%	7%	5%	2%	5%	9%
202	0.027	0.025	0.017	0.021	0.030	24%	7%	5%	2%	4%	9%
204	0.025	0.024	0.015	0.018	0.027	24%	7%	5%	2%	4%	8%
206	0.022	0.024	0.014	0.017	0.025	22%	7%	4%	2%	4%	8%
208	0.021	0.022	0.013	0.016	0.022	21%	7%	4%	2%	3%	7%
210	0.019	0.022	0.011	0.015	0.019	19%	6%	3%	2%	3%	7%
212	0.016	0.021	0.011	0.014	0.017	15%	6%	3%	2%	2%	6%
214	0.015	0.020	0.010	0.013	0.015	14%	6%	2%	1%	2%	5%
216	0.015	0.018	0.011	0.013	0.017	12%	5%	2%	1%	2%	4%
218	0.015	0.018	0.010	0.013	0.017	11%	5%	2%	1%	2%	4%
220	0.015	0.016	0.010	0.013	0.017	9%	4%	2%	1%	2%	4%
222	0.012	0.018	0.011	0.013	0.018	7%	4%	2%	1%	1%	3%
224	0.010	0.017	0.009	0.013	0.011	6%	4%	1%	1%	1%	3%
226	0.009	0.016	0.007	0.012	0.010	5%	4%	1%	1%	1%	2%
228	0.008	0.015	0.006	0.011	0.011	4%	3%	1%	1%	1%	2%
230	0.009	0.016	0.007	0.015	0.009	4%	3%	1%	1%	1%	2%
232	0.007	0.018	0.007	0.013	0.010	3%	4%	1%	1%	1%	2%
234	0.006	0.015	0.007	0.011	0.011	3%	3%	1%	1%	1%	2%
236	0.006	0.015	0.005	0.010	0.013	2%	3%	1%	1%	1%	1%
238	0.005	0.015	0.006	0.009	0.011	2%	3%	1%	1%	1%	1%
240	0.004	0.014	0.005	0.009	0.010	2%	3%	1%	1%	1%	1%
242	0.006	0.016	0.004	0.008	0.010	2%	4%	0%	1%	1%	2%
244	0.007	0.013	0.005	0.007	0.011	3%	3%	1%	1%	1%	2%
246	0.007	0.013	0.006	0.007	0.009	3%	3%	1%	1%	1%	2%
248	0.008	0.011	0.006	0.006	0.009	4%	4%	1%	1%	1%	2%
250	0.007	0.013	0.007	0.005	0.008	4%	5%	1%	1%	1%	2%
252	0.007	0.011	0.006	0.004	0.008	5%	5%	1%	1%	1%	2%
254	0.007	0.011	0.008	0.006	0.007	6%	6%	2%	1%	1%	3%
256	0.008	0.010	0.007	0.005	0.007	9%	7%	2%	1%	1%	4%
258	0.006	0.010	0.006	0.003	0.006	9%	8%	2%	1%	1%	4%
260	0.008	0.010	0.008	0.006	0.007	14%	11%	5%	2%	2%	7%
262	0.008	0.011	0.009	0.007	0.007	21%	16%	7%	3%	3%	10%

La Figura 109 muestra la curva de absorbancia – longitud de onda en el rango de 190 hasta 900 nm (utilizando los valores registrados de la Tabla 49).

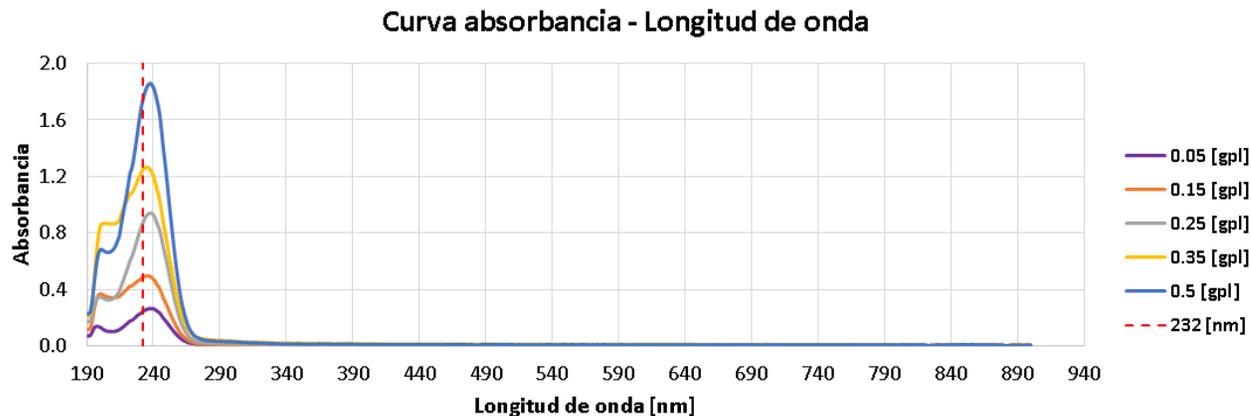


Figura 109: Curva de absorbancia - longitud de onda en el rango de 190 – 900 nm.

La Figura 110 presenta el coeficiente de correlación y el promedio del coeficiente de variación en el rango de 190 hasta 900 nm (utilizando los valores de la Tabla 49 y Tabla 50 respectivamente).

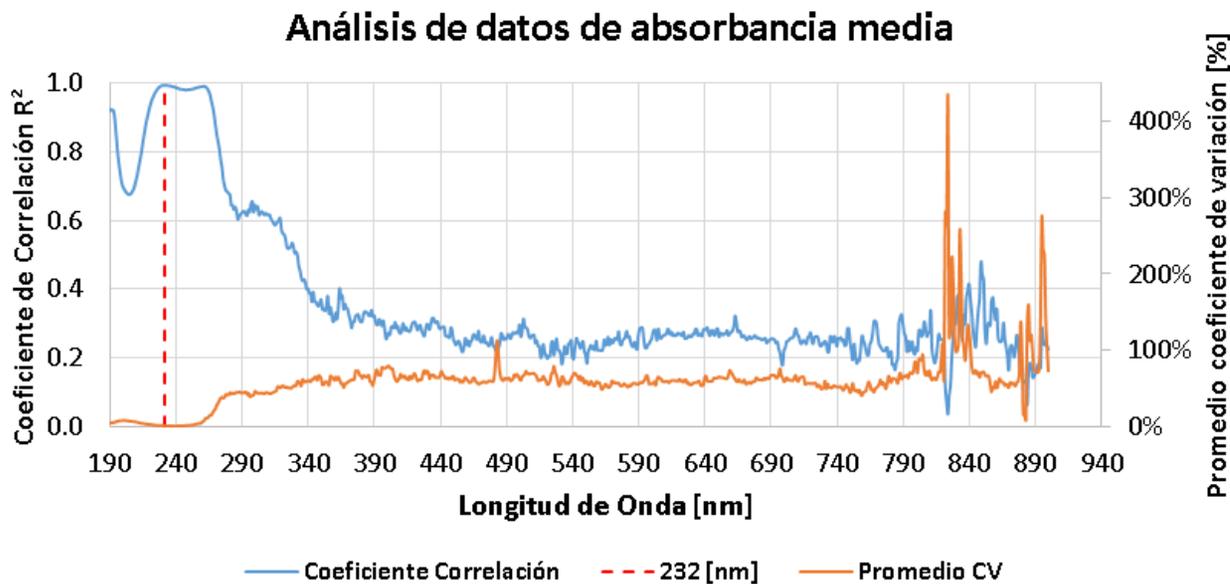


Figura 110: Coeficiente de correlación y promedio del coeficiente de variación en el rango de 190 hasta 900 nm.

6.7 Ficha técnica: Espumante Aerofroth 70 Plus

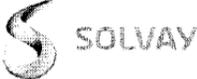
	SDS: 0015145 Fecha de preparación: 28-dic-2016
FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	
1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA COMPAÑÍA	
Nombre del producto:	AEROFROTH® 70 Plus Frother
Descripción del Producto:	Agent moussant
Uso Indicado/Recomendado	El hacer espuma
<p>Cytec Industries Inc., Five Garret Mountain Plaza, Woodland Park, New Jersey 07424, USA. Para información de productos y todo lo que no sea una emergencia llamar al 1-800/652-6013. Fuera de USA y Canada llamar al +1-973/357-3193 o a su punto local de contacto de Cytec. E-mail: custinfo@cytec.com</p>	
Información Local De Contacto:	
Cytec de México S.A. de C.V., Km 40 Carretera Guadalajara-La Barca, Atequiza, Jalisco, México C.P. 45860 Teléfono: +52-376-737-4100	
Cytec Comércio de Materiais Compostos e Produtos Químicos do Brasil LTDA, Avenida Doutor Cardoso de Melo, 1460, Suites 61/62, CJ 61 E 62 - 04548-005 Vila Olímpia, São Paulo - SP, Brazil, CNPJ: 17.558.326/0001-31; Teléfono: 55 11 5033-2828	
Cytec Chile Limitada - Las Dalias 2718, Macul, Santiago, Chile Teléfono: 56-2-25607900 Telefax 56-2-2560 7902 PLANTA. Iquique 5830. Barrio Industrial Antofagasta, Chile Teléfono: +56-55-2687811	
Cyquim de Colombia S.A., Carrera 13 No. 29-21 Of. 221 Parque Central Bavaria, Colombia Teléfono: 571-3793580	
TELEFONO DE EMERGENCIA (24 Hrs) - En emergencias que solo involucren derrame, fuga, fuego, exposición o un accidente, llame al:	
Asia Pacífico:	
Australia - +61-3-9663-2130 ó 1800-033-111 (IXOM)	
China (Rep. Pop.) - +86 0532 83889090 (NRCC)	
Nueva Guinea - +61-3-9663-2130 ó 1800-033-111	
Nueva Zelanda - +61-3-9663-2130 ó 0800-734-607 (IXOM)	
India, Japón, Corea, Malasia, Tailandia - +65 3158 1074 (Carechem24 Singapur)	
India (solo hablado Hindi) - +65 3158 1198 ó 000800 100 7479 (Carechem24 Singapur)	
Canadá: +1-905-356-8310 (planta Cytec de Welland, Canadá)	
Europa/África/Oriente Medio (Carechem24 UK):	
Europa, Oriente Medio, África, Israel - +44 (0) 1235 239 670	
(países de habla árabe) - +44 (0) 1235 239 671	
América Latina:	
Brasil - 0800 7077 022 (SUATRANS)	
Chile - +56-2-2-247-3600 (CITUC QUIMICO)	
Todos los demás - +52-376-73 74122 (planta Cytec de Atequiza, México)	
EE UU: +1-703-527-3887 ó 1-800-424-9300 (CHEMTREC #CCN6083)	
<p>El símbolo ® indica una marca registrada en los Estados Unidos y el ™ indica una marca comercial en los Estados Unidos La marca también puede estar registrada, pendiente de una solicitud para su registro o ser una marca comercial en otros países.</p>	

Figura 111: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 1).

2. COMPOSICION/INFORMACION SOBRE LOS COMPONENTES

INGREDIENTES PELIGROSOS

COMPONENTE / No. CAS	%	Símbolos	Riesgo frases
Metil isobutil carbinol 108-11-2	30-60	Xi	R:10-36/37/38
Mexcla de alcohol alifático -	10-30	Xi	R:36/38-52/53
Alcoholes, aldehídos y éteres mezclados -	10 - 20	N	R:51/53
Hexanol 111-27-3	10-18	Xn	R:22
2-Etilhexanol 104-76-7	5-10	Xn	R:20-36/37/38-52
Éteres de poliglicol -	5-10	Xn	R: 22
2-Etilhexanal 123-05-7	1-5	Repr. Cat. 3; N	R:63-10-43-52
Acroleína sustituida -	1-4	Xi	R:43-38-52/53
Éteres de glicol mixtos -	1 - 5	Xi	R:36/38
Butanol 71-36-3	1-2	Xn	R:10-22-37/38-41-67
Alquil alcohol n.º 2 -	1-2	Xn	R:22-41
Dioles -	1-2	Xi	R:41
Alcohol n.º 2 -	1 - 2	Xn	R:20-36/37/38

3. IDENTIFICACION DE LOS PELIGROS

RIESGOS HUMANOS Y AMBIENTALES

inflamable.

Posibilidad de sensibilización en contacto con la piel.

Posible riesgo durante el embarazo de efectos adversos para el feto.

Irrita los ojos, la piel y las vías respiratorias.

Nocivo para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

4. PRIMEROS AUXILIOS

Figura 112: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 2).

4. PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación:

Retirar la víctima al aire libre. Si la respiración es difícil, dar oxígeno. Consultar a un médico si los síntomas perduran.

Contacto con la piel:

Lavarse inmediatamente con abundante agua y jabón. Eliminar la ropa y zapatos contaminados sin demora. Consulte al médico. No volver a usar la ropa contaminada sin limpiar. Destruir o limpiar los zapatos minuciosamente antes de volver a utilizarlos.

Contacto con los ojos:

Enjuagar inmediatamente con abundancia de agua por lo menos durante 15 minutos. Consultar a un médico si los síntomas perduran.

Ingestión:

Llamar a un médico inmediatamente si se traga. Sólo inducir vómitos bajo dirección médica. Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente.

SÍNTOMAS Y EFECTOS MÁS IMPORTANTES, TANTO AGUDOS COMO RETARDADOS

No se conocen

Notas para el médico:

No se han identificado medidas específicas.

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

Medios de extinción adecuados:

Para extinguir incendios, usar rocío de agua, espuma para alcohol, dióxido de carbono o polvo químico. Es posible que el agua en chorro sea ineficaz.

Medios de extinción a evitar:

Chorro de agua

EQUIPAMIENTO PROTECTOR

Los bomberos y otras personas que pudieran estar expuestas deben usar aparatos respiratorios autónomos. Usar vestimenta protectora contra incendios completa. Ver la Sección 8 (Controles de exposición/Protección personal).

PELIGROS ESPECIALES

Refrigerar los recipientes que estuvieran expuestos al fuego, rociando agua sobre los mismos.

6. MEDIDAS QUE DEBEN TOMARSE EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

Precauciones individuales:

Donde el nivel de exposición es conocido, use el respirador apropiado al nivel de exposición. Donde el nivel de exposición es desconocido, use equipo de aire autónomo. Adicionalmente a la ropa/equipo protector definido en la Sección 8, (Protección Personal/Control de Exposición), use botas impermeables.

Métodos de limpieza:

Retirar las fuentes de ignición. Cubrir los derrames con material absorbente inerte; recoja y limpie área, deposite el material contaminado en un contenedor para desechos. Enjuagar con agua el área del derrame.

PRECAUCIONES AMBIENTALES:

No se sabe de ninguno

Medidas preventivas para impedir la aparición de peligros secundarios;

En el caso de desastres secundarios, eliminan todas las fuentes de ignición, impiden que los derrames entren en las alcantarillas.

7. MANIPULACION Y ALMACENAMIENTO

Figura 113: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 3).

7. MANIPULACION Y ALMACENAMIENTO

Manipulación

Precauciones: Mantener lejos de calor/chispas/llamas al descubierto. - No fumar Manténgase el recipiente bien cerrado Toma de tierra/enlace equipotencial del contenedor y del material de recepción Toda ventilación, iluminación o aparato eléctrico deberán ser a prueba de explosiones. No utilizar herramientas que produzcan chispas Tomar medidas de precaución contra las descargas electrostáticas Lavarse las manos cuidadosamente después de la manipulación La ropa de trabajo contaminada no puede sacarse del lugar de trabajo No depositar en el medio ambiente Usar sólo al aire libre o en lugar bien ventilado Recabar instrucciones especiales antes de su uso No manipular antes de haber leído y comprendido todas las precauciones de seguridad Usar guantes /indumentaria protectora/equipo de protección para los ojos/la cara Evitar respirar los vapores o pulverizados.

Declaración de Manipulación especial:

Este material contiene un líquido o vapor inflamable o combustible Los recipientes deben estar unidos y aterrizados al verter o transferir el material.

Almacenamiento

Las áreas que contengan éste material deberán contar con prácticas contra incendio seguras y equipamiento eléctrico de acuerdo con las regulaciones aplicables. Los estándares esta basados principalmente en el Punto de Flasheo de los materiales, sin embargo podrán tomarse en cuenta otras propiedades tales como su miscibilidad en agua o toxicidad. Todas las regulaciones locales o nacionales deberán ser aplicadas. En los Estados Unidos de América el estándar 30 de la Asociación Nacional para la Protección contra el Fuego (NFPA por sus siglas en inglés), es conocido como Código de Líquidos Combustibles e Inflamables el cual es ampliamente usado. El NFPA 30 establece condiciones de almacenamiento para las siguientes clases de almacenamiento: Clase I Líquidos Inflamables, Punto de Flasheo < 37.8 C Clase II Líquidos Combustibles, Punto de Flasheo entre 37.9 C y 60 C Clase IIIa Líquidos Combustibles, Punto de Flasheo entre 61 C y 93 C Clase IIIb Líquidos Combustibles, Punto de Flasheo > 93 C Mantener el producto lejos de fuentes de ignición. No fumar. Tomar medidas contra las cargas electrostáticas. (Toma de tierra en el proceso de trasiego). Tener en cuenta las normas generales de protección preventiva contra incendios en instalaciones industriales.

Temperatura de almacenamiento: Temperatura ambiente

Razon: Seguridad.

Clase de almacenamiento (TRGS 510): 3

8. CONTROLES DE EXPOSICION Y PROTECCION PERSONAL

PARAMETROS DE CONTROL - Limites

2-Etilhexanol 104-76-7

Argentina OEL:	50 ppm (TWA - CMP)
	(skin)
Colombia OEL:	50 ppm (TWA)
ACGIH (TLV)	(skin)
	50 ppm (TWA)

Metil isobutil carbinol 108-11-2

OEL Mexicano:	25 ppm (TWA)
	100 mg/m ³ (TWA)
	40 ppm (STEL)
	165 mg/m ³ (STEL)
	(skin)
OEL Brasileño:	20 ppm (TWA)
	78 mg/m ³ (TWA)
	(skin)
Argentina OEL:	25 ppm (TWA - CMP)
	40 ppm (STEL - CMP-CPT)
	(skin)

Figura 114: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 4).

2-Etilhexanol 104-76-7

Colombia OEL:	25 ppm (TWA)
	40 ppm (STEL)
ACGIH (TLV)	40 ppm (STEL)
	(skin)
	25 ppm (TWA)
OSHA (PEL):	25 ppm (TWA)
	100 mg/m ³ (TWA)
	(skin)

Butanol 71-36-3

OEL Mexicano:	50 ppm (Ceiling)
	150 mg/m ³ (Ceiling)
	(skin)
OEL Brasileño:	40 ppm (TWA)
	115 mg/m ³ (TWA)
	40 ppm (Ceiling)
	115 mg/m ³ (Ceiling)
	(skin)
OEL Chileno:	50 ppm (Ceiling)
	152 mg/m ³ (Ceiling)
	(skin)
Argentina OEL:	(skin)
	50 ppm (Ceiling - CMP-C)
Colombia OEL:	20 ppm (TWA)
ACGIH (TLV)	20 ppm (TWA)
OSHA (PEL):	100 ppm (TWA)
	300 mg/m ³ (TWA)

Disposiciones de ingeniería:

Cuando este material no se usa en un sistema cerrado, se deberá proveer buen aislamiento y ventilación local al exterior para limitar exposición cuando se pulveriza o se cura a alta temperatura.

Protección respiratoria:

Donde las exposiciones son menores al límite de exposición establecido, no se requiere protección respiratoria. Donde las exposiciones exceden el límite de exposición establecido, usar la protección respiratoria recomendada para el material y al nivel de exposición. Un respirador con careta completa también provee protección ocular y facial. El corte, molido o lijado de las partes fabricadas después de la curación puede crear partículas de polvo respirables. Puede hacer falta protección respiratoria apropiada. Referirse a los componentes mencionados arriba para los posibles componentes peligrosos en el polvo.

Protección de los ojos:

Usar protección ocular/facial, gafas para productos químicos y máscara. Se deberá proveer equipo para lavaje ocular y una ducha de seguridad en las zonas de posible exposición.

Protección de la piel:

Evitar contacto con la piel. Usar guantes impermeables y ropa protectora adecuada. Se puede usar cremas bloqueadoras junto con los guantes para proveer protección dérmica adicional.

Consejos adicionales:

No se deberá llevar, almacenar o ingerir alimentos, bebidas y productos de tabaco donde este material esté em. Antes de comer, beber o fumar, lavarse la cara y las manos minuciosamente con jabón y agua. Se recomienda ducharse después de completar el turno de trabajo, especialmente si ha habido un contacto importante. Después se deberá limpiar la ropa de trabajo antes de volver a usarla. Guardar la ropa para salir aparte de la ropa de trabajo y el equipo de protección. No se debe llevar la ropa de trabajo ni los zapatos a la casa.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Figura 115: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 5).

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS**INFORMACIÓN SOBRE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS BÁSICAS**

Color:	ámbar entre ligero y medio
Aspecto:	líquido
Olor:	alcoholes mezclados y ésteres de glicol
Umbral de olor:	Ver la sección 8 para consultar los límites de exposición
pH:	No disponible
Temperatura de fusión:	No disponible
Temperatura de ebullición/rango	No disponible
Punto de inflamación:	>=39 °C Copa cerrada Tag(valor de solvente)
Índice de evaporación:	No disponible
Inflamabilidad (sólido, gas):	No disponible
LIMITES DE INFLAMABILIDAD (% No disponible Por Vol):	
Presión de vapor:	No disponible
Densidad de vapor:	No disponible
Gravedad Específicas:	0.849 - 0.868@ 25°C
SOLUBILIDAD EN EL AGUA:	ligero
Coefficiente de reparto (n-octanol/agua):	No aplicable
Temperatura de ignición automática (auto):	No disponible
Temperatura de descomposición:	no disponible
Viscosidad (cinemática):	No aplicable
Viscosidad (dinámica):	No disponible

OTRA INFORMACIÓN

Liposolubilidad (disolvente):	No disponible
% VOLATIL (Por peso):	No disponible
Contenido en sólidos:	No disponible
Saturación en Aire (% en Vol.):	No disponible
Índice de acidez (mg KOH/g):	No disponible
Índice de hidróxido (mg KOH/g):	No disponible
Contenido de Orgánicos Volátiles (1999/13/EC):	No disponible
Constante de disociación:	No disponible
Propiedades de explosión:	Ninguno.
Propiedades oxidantes:	No disponible
Granulometría (tamaño de partículas):	No disponible

INFORMACIÓN DE PELIGRO DE POLVO

Tamaño de partículas (micrones)	No aplicable
Kst (bar-m/seg)	No aplicable
Presión de explosión máxima (Pmáx)	No aplicable
Clase de polvo	No aplicable
Energía mínima de ignición (EMI) (mJ)	No aplicable
Temperatura mínima de ignición (TIM) (°C)	No aplicable
Concentración mínima de explosión (CME) (g/m³)	No aplicable
Concentración de oxígeno limitante (COL) (%)	No aplicable

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Reactividad:	Sin información disponible
Estabilidad:	Estable
Polimerización:	No ocurrirá

Figura 116: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 6).

Materias a evitar: Agentes oxidantes fuertes, ácidos fuertes y álcalis.

Productos de descomposición peligrosos: dióxido de carbono
Monóxido de carbono

11. INFORMACION TOXICOLOGICA

Efectos potenciales sobre la salud

Posibilidad de sensibilización en contacto con la piel.
Posible riesgo durante el embarazo de efectos adversos para el feto.
Irrita los ojos, la piel y las vías respiratorias.

DATOS SOBRE LA TOXICIDAD DEL PRODUCTO

Toxicidad aguda

oral (cebadura)	rata	DL50 Aguda	>2000 mg/kg
dermal	conejo	DL50 Aguda	>2000 mg/kg
Inhalación	rata	CL50 Aguda 4 hr	>5 mg/l(Polvo/Suspensión)

EFECTOS LOCALES EN PIEL Y OJOS

Irritación Aguda	Piel	irritante
Irritación Aguda	ojo	corrosivo

SENSITIZACION ALERGICA

Sensibilización	Piel	Sensibilizante
Sensibilización	respiratorio	No hay datos

GENOTOXICIDAD

Ensayos para Mutaciones Genéticas

Prueba Salmonella Ensayo No hay datos

Otra información

La información sobre la toxicidad del producto mencionada arriba es estimada.

DATOS SOBRE LA TOXICIDAD DE LOS INGREDIENTES PELIGROSOS

4-metilpentan-2-ol presenta valores de toxicidad oral (ratas) y dérmica (conejos) DL50 de 2,6 g/kg y 2,88 g/kg, respectivamente. Este material tiene un valor CL50 agudo por inhalación durante 4 horas (rata) >16000 mg/m³ (>16 mg/L). Una sobreexposición aguda al vapor 4-metilpentan-2-ol causa una irritación en la membrana mucosa y una irritación ocular de moderada a severa. El contacto directo con este material causa una irritación moderada en la piel. No se espera que una exposición dérmica prolongada o repetida produzca una sensibilización dérmica. En base a un conjunto de estudios in vitro no se espera que esta sustancia sea mutagénica, genotóxica o clastogénica.

El contacto directo con una mezcla de alcohol alifático puede provocar irritación ocular y cutánea moderada a grave. La sobreexposición a sus vapores puede provocar irritación de nariz, garganta y tracto respiratorio superior, así como efectos en el sistema nervioso central.

Las propiedades químicas, físicas y toxicológicas de esta sustancia no han sido investigadas completamente. Los alcoholes, aldehídos y éteres mezclados tienen unos valores DL50 de toxicidad aguda oral (rata) y dérmica (rata) de >5000 mg/kg y >2000 mg/kg, respectivamente. El contacto directo con esta sustancia puede causar irritación leve en la piel e irritación ocular. No se prevé que los alcoholes, aldehídos y éteres mezclados sean sensibilizadores dérmicos.

Figura 117: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 7).

La sobreexposición aguda a vapores de hexanol puede provocar irritación del tracto respiratorio. El hexanol líquido es moderada a gravemente irritante para los ojos y puede provocar lesiones irreversibles. La exposición aguda de la piel puede provocar irritación leve. El valor DL50 oral en ratas es de 720 mg/kg y el DL50 dérmico DL50 en conejos es de 3,1 g/kg.

El 2-Etilhexanol (CAS n.º 104-76-7): presenta valores DL50 de toxicidad oral aguda (ratas) y dérmica (conejos) de 2040 mg/kg y >2000 mg/kg. El valor CL50 (ratas) por inhalación durante 4 horas es > 0,89 pero ≤ 5,3 mg/l (vapor y aerosol mezclados). 2-Etilhexanol es un irritante de ojos de moderado a severo y un irritante moderado de la piel. Una exposición repetida de la piel puede causar una piel seca o agrietada. Una sobreexposición de inhalación a 2-etilhexanol puede producir dolor de cabeza, mareos, depresión del sistema nervioso central dando lugar posiblemente a un estado de inconciencia y a la irritación de los ojos y del tracto respiratorio. 2-Etilhexanol es un peligro por aspiración. Una sobreexposición crónica a 2-etilhexanol puede causar daños en el hígado, edema pulmonar o daños renales con glucosuria. En un estudio de teratología en ratas 3 ml/kg aplicado a la piel durante la parte más crítica de la gestación produjo pruebas de toxicidad maternal, pero no evidencias de lesiones en las crías. En un estudio separado se observaron una toxicidad fetal y un aumento de incidencia de defectos de nacimiento cuando se administró a ratas preñadas 2 ml/kg por un tubo del estómago durante la gestación. Ritter, y al (1987) han documentado efectos teratológicos en ratas tras la administración de 2-etilhexanol en el día 12 de gestación. Astill, y al (1996) han encontrado que el 2-Etilhexanol no fue oncogénico en ratas, e informaron de una débil asociación con incidencia de carcinoma hepatocelular en ratones con una dosis crónica de 750 mg/kg. Divencenzo, y al (1985) no vieron evidencia de sustancias mutagénicas excretadas en la urina de ratas con dosis de 2-Etilhexanol. Agarwal, y al (1985) informaron que el 2-Etilhexanol no presentó mutagenicidad en las cepas de Salmonella typhimurium TA98, 100, 1535, 1537, 1538, y 2637, con o sin activación S9. 2-Etilhexanol mostró un efecto citotóxico moderado en la mayor parte de los cultivos. El 2-Etilhexanol ha causado efectos tóxicos en la próstata y en los sistemas inmunes de los animales de laboratorio.

Los ésteres de poliglicol presentan valores de toxicidad oral (ratas) y dérmica (ratones) DL50 de > 300-2000 mg/kg y 2000 mg/kg, respectivamente. La exposición por inhalación a los vapores puede causar sopor y dolores de cabeza. El contacto directo con esta sustancia se espera que cause una irritación ligera en la piel y moderada en los ojos. La sobreexposición por inhalación puede causar irritación de los ojos y del tracto respiratorio.

2-Etilhexanal tiene valores DL50 agudos oral (rata) y dérmico (rata) de 3700 mg/kg y >16 g/kg, respectivamente. El valor de inhalación aguda (aerosol) CL50 (rata, 4 horas) es >6,83 mg/l. El contacto directo con esta sustancia puede causar irritación moderada en la piel y mínima en los ojos. En base a las pruebas de un material de estructura similar, 2-etilhexanal se espera que produzca sensibilización dérmica. La exposición de las ratas a 2-etilhexanal a concentraciones de 25,5, 102,2 y 250,7 ppm durante 6 hr/día y 28 días produjeron solo efectos pequeños en el peso del hígado relativo a 25,5 ppm, y en los marcadores de proliferación de peroxisoma hepático medido, esta dosis se puede usar como Nivel de Efecto No Observado (NOAEL) para proliferación de peroxisoma. Por tanto se concluyó que 2-etilhexanal es solo un proliferador de peroxisoma muy débil en la rata con el Nivel de Efecto Adverso No Observado (NOAEL) para una toxicidad global de efectos/sistémica establecida a 102,2 ppm. Esta sustancia no resultó mutagénica en el ensayo Ames o clastogénica en el Ensayo de micronúcleos en ratones in vivo. 2-Etilhexanal fue administrado mediante sonda oral diaria a ratas desde el día 6 al 19 de su embarazo, a dosis de hasta 797,6 mg/kg pc/día. No había toxicidad maternal adversa obvia a 100,0 o 300,9 mg/kg pc/día. Como contraste, a 797,6 mg/kg pc/día había una evidencia clara de toxicidad maternal. La supervivencia embriofetal no estuvo afectada por tratamiento con 2-Etilhexanal A 300,9 mg/kg pc/día, los pesos fetales eran más bajos y hubo una osificación retrasada. Aunque la relación de estos hallazgos al tratamiento es incierta, se consideran transitorios por naturaleza, en vez de representar cambios estructurales permanentes. A 797,6 mg/kg pc/día los pesos fetales y placentarios se redujeron y se se observaron anomalías placentarios en algunas crías. La patología fetal reveló anomalías viscerales y esqueléticas a 797,6 mg/kg pc/día. Se observó una inmadurez fetal universalmente a 797,6 mg/kg pc/día y en menor medida a 300,9 mg/kg pc/día. Según estos resultados, el NOAEL para la toxicidad maternal y la toxicidad de desarrollo se considera que es 300,9 mg/kg pc/día.

Las propiedades químicas físicas y toxicológicas de este material no han sido investigadas completamente. Se ha documentado que el valor DL50 agudo oral (rata) es 4675 mg/kg. El valor CL50 de 8 horas (rata, vapor saturado) es > 3,98 mg/L. Se espera que el contacto directo sea de moderadamente a gravemente irritante para la piel, pero solo minimamente irritante para los ojos. Este material ha producido sensibilización dérmica en cobayas. La acroleína sustituida no fue mutagénica en el ensayo Ames.

Figura 118: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 8).

Las propiedades químicas, físicas y toxicológicas de éteres de glicol mixtos no han sido investigadas completamente. El contacto directo con esta sustancia puede causar irritación moderada en la piel y en los ojos.

El butanol tiene unos valores de concentración aguda LD50 de 0,790 g/kg por vía oral (rata) y 3,4 g/kg por vía dérmica (conejo). El valor LC50 tras 4 horas de exposición por inhalación (rata) es de 8.000 ppm (24,24 mg/l). La sobreexposición aguda a los vapores del butanol puede provocar dolor de cabeza, mareos, vértigos, visión borrosa y sensación de ardor en los ojos. La sobreexposición a los vapores del butanol puede producir dolor de cabeza y depresión del sistema nervioso central. La ingestión aguda de butanol ha causado pérdidas de consciencia y coma. El contacto directo con el butanol puede producir irritación ocular grave e irritación moderada de la piel. El butanol ha provocado efectos en el desarrollo embrionario/feto en condiciones de toxicidad material.

Alquil alcohol n.º2 tiene valores DL50 de toxicidad oral aguda (ratas) y dérmica aguda (conejos) de 1.410 mg/kg y >3.560 mg/kg, respectivamente. Alquil alcohol n.º2 es un irritante severo de los ojos y suave de la piel.

Los dioles tienen unos valores DL50 oral (rata) y dérmico (conejo) agudos de > 2000 mg/kg respectivamente. El contacto directo con este material puede causar una irritación moderada en la piel. Los dioles causan daños graves en los ojos y se espera que puedan irritar otras membranas mucosas. En un estudio de sondas de toxicidad de desarrollo, se les administró a grupos de 8 ratas preñadas dioles mediante sonda nasogástrica y diariamente durante los días de gestación del 6 al 15 en dosis de 500, 1000, 2000 o 4000 mg/kg. Se observó toxicidad materna (signos clínicos, patología y muerte) con 2000 y 4000 mg/kg. Se presentaron efectos teratogénicos con estas dosis maternalmente tóxicas pero no con dosis más pequeñas. El Nivel de Efecto Adverso no Observado fue establecido en 1000 mg/kg pc/d. En un segundo estudio de toxicidad de desarrollo con componentes de fertilidad, se aplicaron dioles no diluidos de forma no oclusiva, diariamente durante 6 horas, durante los días de gestación del 6 al 15 en dosis de 1,0, 2,0 y 4,0 ml/kg; correspondiendo a dosis de masas de aproximadamente 942, 1884 y 3768 mg/kg. Los resultados indican una toxicidad materna menor pero ningún efecto en el rendimiento reproductivo o fertilidad de hembras. El valor NOEL es > 4,0 ml/kg pc/día o 3768 mg/kg pc/día. Se encontró que el nivel de dosis más bajo (1,0 ml/kg; equivalente a 942 mg/kg) no causa efectos en el desarrollo y por tanto se estableció como NOAEL para efectos de teratogenicidad. Los dioles no fueron mutagénicos en la prueba Ames, una prueba adelantada de mutación de genes o una prueba de intercambio de cromátidas hermanas en células CHO.

Las propiedades químicas, físicas y toxicológicas de esta sustancia no han sido investigadas completamente. El alcohol n.º 2 tiene unos valores DL50 de toxicidad aguda oral (ratas) y dérmica (ratas) de >2000 mg/kg y >2000 mg/kg, respectivamente. El valor CL50 estimado de toxicidad aguda (inhalación) durante 4 horas (rata - polvo/neblina) es de > 1-5 mg/l. El contacto directo con esta sustancia puede causar irritación moderada en la piel y en los ojos. La exposición por inhalación puede causar una irritación del aparato respiratorio.

12. INFORMACIONES ECOLOGICAS

Nocivo para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático. La información ecológica de este material tiene como base una evaluación de sus componentes.

Ecotoxicidad
No disponible

POTENCIAL DE BIOACUMULACIÓN
No disponible

PERSISTENCIA Y DEGRADABILIDAD
No disponible

Figura 119: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 9).

FRACCIONAMIENTO EN SUELOS

No disponible

OTROS EFECTOS ADVERSOS**PELIGRO PARA LA CAPA DE OZONO**

No disponible

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACION

The Company está a favor del reciclaje, recuperación y reuso de materiales siempre que sea posible. Si es necesario disponer algún material, The Company recomienda que los materiales orgánicos, especialmente cuando estos estén clasificados como residuos peligrosos sean destruidos por tratamiento térmico ó incineración en plantas autorizadas. Deben observarse todas las reglamentaciones locales y nacionales.

14. INFORMACIÓN PARA TRANSPORTE

Esta sección proporciona la información de clasificación de envío básica. Refiérase a las regulaciones de transporte apropiadas para los requisitos específicos.

SCT/IMO

Material Peligroso? X

Nombre correcto de expedición:	Líquido inflamable, n.e.p.
Clase de Peligro:	3
NUMERO DE LA ONU:	UN1993
Grupo de embalaje:	III
ROTULO DE TRANSPORTE EXIGIDO:	Líquido inflamable
NOMBRE TECNICO (N.E.O.M.):	Contiene carbinol isobutilico metilico y la mezcla compleja de oxygenate/hydrocarbon

ICAO / IATA

Material Peligroso? X

Nombre correcto de expedición:	Líquido inflamable, n.e.p.
Clase de Peligro:	3
Grupo de embalaje:	III
NUMERO DE LA ONU:	UN1993
ROTULO DE TRANSPORTE EXIGIDO:	Líquido inflamable
NOMBRE TECNICO (N.E.O.M.):	Contiene carbinol isobutilico metilico y la mezcla compleja de oxygenate/hydrocarbon

15. INFORMACION REGLAMENTARIA**MARCADO Y ROTULACION**

Símbolo(s):	Xn - Nocivo
--------------------	-------------

Figura 120: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 10).

FRASES DE RIESGO:

R10 - Inflamable.

R43 - Posibilidad de sensibilización en contacto con la piel.

R63 - Posible riesgo durante el embarazo de efectos adversos para el feto.

R36/37/38 - Irrita los ojos, la piel y las vías respiratorias.

R52/53 - Nocivo para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

FRASES DE SEGURIDAD:

S26 - En caso de contacto con los ojos, lávense inmediata y abundantemente con agua y acúdase a un médico.

S36/37 - Usense indumentaria y guantes de protección adecuados.

INFORMACION DE INVENTARIO

Australia: Todos los componentes de este producto todavía no se han incluido en el inventario australiano de las sustancias químicas (AICS) ni han sido determinados por Worksafe Australia.

Área económica europea (incluyendo la UE): Cuando se compra en una entidad legal Cytec con sede en la AEMA (UE o Noruega), este producto es conforme con el registro de la normativa REACH (CE) N° 1907/2006 ya que todos sus componentes están excluidos, exentos, preregistrados o registrados.

Estados Unidos (los E.E.U.U.): Todos los componentes de este producto están incluidos en el Inventario Químico de la TSCA de E.U. o no se a requerido que estén listadas en el Invenatrio Químico de la TSCA.

Canada: Uno o varios componentes de este producto NO están incluidos en la Lista de Sustancias Domésticas (DSL) de Canadá. Estos componentes están incluidos en la Lista de Sustancias No Domésticas (NDSL) de Canadá.

China: Uno o varios componentes de este producto NO están incluidos en el inventario chino IECSC.

Japón: Uno o varios componentes de este producto NO están incluidos en el inventario japonés ENCS.

Corea: Uno o varios componentes de este producto NO están incluidos en el inventario coreano ECL.

Filipinas: Uno o varios componentes de este producto NO están incluidos en el inventario filipino PICCS.

16. OTRAS INFORMACIONES**Classificación**

Inflamabilidad: 2 - Sustancias que deben ser precalentadas moderadamente o expuestas a temperaturas ambiente relativamente altas, antes de que pueda ocurrir la ignición.

Salud: 2 - Moderadamente peligroso. Puede ocasionar una lesión temporal o menor.

Inestabilidad: 0 - Sustancias que por sí mismas son estables normalmente, aun bajo condiciones de fuego.

RAZON DE LA EMISION: Sección 3 modificada

Fecha de preparación: 28-dic-2016

Fecha de la última revisión significativa 06-dic-2016

Preparado Por: Legal & Compliance Services; E-mail: custinfo@cytec.com

Esta información es dada sin garantía o representación alguna. No asumimos ninguna responsabilidad legal por la misma, ni tampoco damos permiso, inducimiento, o recomendación alguna para practicar cualquier invento patentado sin una licencia. Esta información le es proporcionada solamente para su consideración, investigación, y verificación. Antes de usar cualquier producto, lea su etiqueta.

Figura 121: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 11).

7 Bibliografía

- J. B. Joshi, V.S. Vitankar, A. A. Kulkarni, M. T. Dhotre & K. Ekambara (2002), Coherent flow structures in bubble column reactors, página 3176 (Tzeng, Chen & Fan, 1993).
- Alonso M. & Finn E. J. (1967), Fundamental University Physics II Fields and waves, p. 933-941.
- Chen R. C., Reese J., & Fan L. S. (1994), Flow structure in a three-dimensional bubble column and three-phase fluidized bed.
- Clift R., Grace J. R. & Webber M. R. (1978) Bubbles, Drops and particles. Editorial Academic Press, U.S.A.
- Finch J. A. & Dobby G. S. (1990), Column flotation, p. 1-4, 13, 18, 20, 21, 162.
- Flint I. M., MacPhail P. & Dobby G. S. (1988), Aerosol frother addition in column flotation, C. I. M. Bulletin, 81(913), p. 81-84.
- Fuerstenau M. C., Jameson G. J. & Yoon R-H. (2007), Froth Flotation. A Century of Innovation, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME) Inc. USA, p. 869.
- Gómez C. O. (2011), Comunicación personal.
- Gorain B. K., Franzidis J. P., Manlapig E. V. (1996), Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 3: Effect on superficial gas velocity.
- Gorain B.K. (1998), The effect of bubble surface area flux of the kinetic of flotation and its relevance to scale up. PhD.degree Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) University of Queensland, p. 363.
- Heiskanen, K. (2002), On the relationships between flotation rate and bubble surface area flux, Minerals Engineering, volumen 13, número 2, p. 141-149.
- Johnson N. W. (1972), The flotation behaviour of some chalcopyrite ores, v1 PhD.degree Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) University of Queensland, p. 299.
- Kamp A. M., Chesters A. K., Colin C. & Fabre J. (2001), Bubble coalescence in turbulent flows: mechanistic model for turbulence-induced coalescence applied to microgravity bubbly pipe flow. International Journal of Multiphase Flow, Volumen 27 (número 8) , p. 1363-1396.
- Kelly E.G. & Spottiswood D. J. (1982), Introduction to Mineral Processing, primera edición, John Wiley & Sons Inc., p. 516.
- King R. P. (2001), Modelling and Simulation of Mineral Processing Systems, Ed. Butterworth-Heinemann, p. 405.

- Leja J. (1982), Surface chemistry of froth flotation, springer plenum press, p. 339.
- Lynch A., Harbort G. & Nelson M. (2010), History of flotation, primera edición, AusIMM, p. 364.
- Nicklin D. J. (1962), Two-phase bubble flow.
- Nguyen A. V. & Schulze H. J. (2003), Colloidal science of flotation (surfactant science), primera edición, No. 118, CRC press, p. 840.
- Rahman R. M., Ata S. & Jameson G. J. (2014), Study of froth recovery and froth dropback behaviour in a controlled plant environment, XXVII Internacional Mineral Processing Congress (IMPC 2014), 20-24 de octubre de 2014 Santiago Chile.
- Sauter J. (1927), Determining the efficiency of atomization by its fineness and uniformity, p. 1-13.
- Savassi O. N. (1999), Direct estimation of the degree of entrainment and the froth recovery of attached particles in industrial flotation cells, PhD.degree Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) University of Queensland, p. 509.
- Seader J. D. & Henley E. J. (1998), Separation Process Principles, p.119-120.
- Tan S. Y., Ata S. & Wanless E. J. (2013), High speed video observations of the stability and coalescence dynamics of two individual particle-stabilized bubble, p. 10.
- Tzeng J. W., Chen R. C. & Fan L. S. (1993), Visualization of flow characteristics in a 2-D Bubble Column and three-phase fluidized bed.
- Vera M. A. (2002), A touch of froth: How bubble – particle aggregate take the strain, PhD.degree Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) University of Queensland, p. 220.
- Wills B. A. & Napier-Munn T. J. (2006), Wills' Mineral processing technology, séptima edición , p. 267.
- Yianatos J. B., Finch J. A. & Laplante A. R. (1986), Holdup profile and bubble size distribution of flotation column froths, Volumen 25 (número 1) p. 2329.
- Yianatos J., Contreras F., Díaz F., Villanueva A. (2008), Direct measurement of entrainment in large flotation cells.