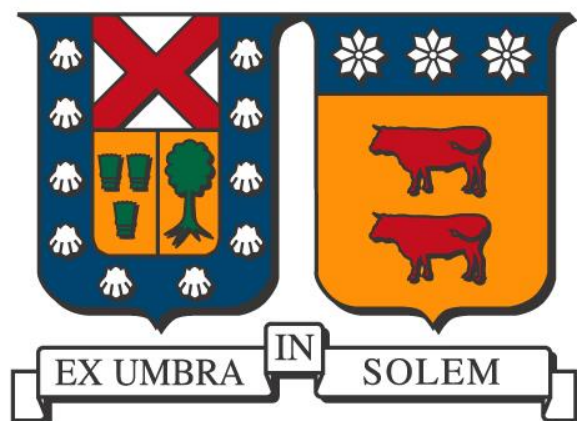


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAISO – CHILE



“EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE TRANSPORTE DE ESPUMA EN CELDAS DE FLOTACIÓN”

Constanza Matamoros Lagos

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

Profesor Guía: Dr. Juan Yianatos Bernardino

Profesor Correferente: M. Sc. Paulina Vallejos Aravena

Valparaíso, Marzo 2018

Agradecimientos

A mis padres Patricia Lagos Padilla y Eduardo Matamoros Madariaga quienes me han inculcado la responsabilidad, la perseverancia y la honestidad, herramientas que me han servido para desarrollarme como persona y como profesional. Además, por el apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida y aquellos consejos que me sirvieron para continuar con mi carrera y nunca bajar los brazos, a pesar de las innumerables pruebas que me ha puesto la vida.

A mi pololo Ignacio que apareció en un momento preciso de mi vida, donde necesitaba cariño y un amigo con quien llorar. Él me ha enseñado a madurar y me ha entregado su apoyo en las buenas y en las malas.

A mis amigos Mario, Tomás y Daniela, con quienes comencé este proceso de estudio, donde vivimos muchas noches sin dormir, alegrías y también decepciones por no conseguir lo que tanto nos habíamos esforzado. Ellos son mis grandes amigos de la vida y sé que puedo contar con ellos para lo que necesite, muchas gracias por todo lo que me han entregado.

Al profesor Juan Yianatos por tener la confianza en mí y ser como un padre en mi proceso universitario. Siempre con una palabra de aliento, un consejo y tener mucha paciencia conmigo.

Al proyecto Fondecyt 1160547 por el financiamiento para realizar mi memoria.

Resumen

Los principales desafíos que enfrenta la industria minera hoy en día, están asociados a la necesidad de mantener la recuperación y la calidad de los concentrados, pese a la disminución de las leyes de alimentación, la mayor complejidad de los minerales y la mayor dificultad de operación. A esto se debe sumar las restricciones de agua y de energía, que actualmente han impulsado nuevos proyectos para la optimización de recursos.

En el presente estudio, se analizó el comportamiento de los minerales en espumas de baja estabilidad, que se observan en las últimas celdas de los bancos de flotación industrial, donde se conecta una baja cantidad de sólido flotable. Esto implica que la ley (calidad) del concentrado sea menor hacia al final del banco.

Las pruebas experimentales se realizaron en una celda bidimensional, a escala piloto, ubicada en el laboratorio de procesos de la Universidad Técnica Federico Santa María, donde se simuló un proceso de dos fases: aire y agua. El prototipo representa una sección radial de una celda de flotación industrial de 130 m³, operada en estado estacionario.

Las pruebas, consistieron en la inyección de un trazador líquido en distintos puntos de la espuma para evaluar el transporte de líquido en la espuma, según la distancia de inyección del trazador respecto al labio de descarga (5 a 98 cm). Además, se cuantificó el drenaje de líquido desde la espuma hacia la zona de colección y se comparó la velocidad de espuma con la velocidad del líquido (trazador) en la zona de limpieza. Las pruebas se realizaron inyectando el trazador en dos niveles: (a) En la superficie de la espuma o (b) Sobre la interfaz pulpa-espuma.

Durante las pruebas realizadas, se mantuvo ciertas condiciones de operación constantes, como el flujo de aire, la profundidad de espuma y el flujo de descarga de espuma. Por el contrario, las siguientes variables fueron modificadas: (i) ángulo *frothcrowder* y (ii) punto de inyección del trazador líquido radiactivo, I¹³¹ (NaI en solución). En cada experimento se inyectaron 0.02 mL de trazador, a distancias de 5, 21, 36 y 98 cm del labio de descarga. Lo anterior incluye los puntos de inyección en el tope de la espuma y cerca de la interfase pulpa/espuma.

Para cada una de las pruebas, la velocidad superficial del gas se mantuvo en 1.52 cm/s, la concentración de espumante Orepreg 507 fue de 10 ppm y la profundidad de espuma medida resultó de 4 cm (debajo del nivel del labio de descarga).

Cuando la inyección del trazador fue realizada en la superficie de la espuma y a una distancia menor a 36 cm, el trazador se transporta casi por completo en la corriente de concentrado, fuera de la celda de flotación. Por lo tanto, los sensores ubicados en la zona de colección no registraron una señal significativa que indique drenaje de líquido hacia esta zona del sistema. Por el contrario, cuando la inyección se realiza a distancias mayores a 36 cm y cercanas a la interfase, la cantidad de trazador que drena hacia la zona de colección es prácticamente completa. De esta forma, se obtuvieron

concentraciones superiores en esta zona, en comparación a las pruebas donde la inyección se realizó en la superficie.

En una celda de flotación piloto, la distancia respecto al labio de descarga necesaria para que el drenaje de líquido predomine hacia la zona de colección es superior a los 20 cm. Cuando se inyecta el trazador en la espuma, a una distancia de 98 cm respecto al rebalse, existe un 50% de drenaje de líquido hacia la zona de colección. Sin embargo, al realizar la inyección del trazador cerca de la interfase pulpa/espuma, a una distancia del labio de descarga de 20 cm, el drenaje de líquido es un 100%.

A partir de los resultados obtenidos, se observó que el trazador se acumula en la zona de colección, debido al largo tiempo medio de residencia que existe en esta zona (mayor a 1 hora).

El tiempo de mezclado en la zona de colección de la celda piloto (prototipo), resultó de aproximadamente 80 – 100 segundos; comparable con el tiempo observado en celdas de flotación a escala industrial, de 100 s.

Se realizó una comparación entre la velocidad de espuma entregada por el sistema *Visiofroth* y la velocidad de espuma estimada a partir de las señales registradas por cada sensor (peak) y la distancia recorrida por el trazador. A partir de este análisis se obtuvo un error de aproximadamente 7% entre ambas velocidades, lo cual avala la posibilidad de utilizar esta metodología en un proceso de flotación a escala industrial. Además, el efecto de variar el ángulo del *frothcrowder* de 40° a 50°, aumenta el flujo de descarga de 2.8 a 3.8 L/min y la velocidad de descarga de espuma se incrementa en 1.5 cm/s.

Índice General

Agradecimientos.....	2
Resumen	3
Índice General	5
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas	9
Nomenclatura	10
Objetivos y Alcances.....	11
Capitulo 1 : El proceso de flotación y el uso de trazadores radioactivos en la industria minera.....	12
1.1 Características del proceso de flotación	12
1.1.1 Cinética del proceso	13
1.1.2 Hidrodinámica del proceso.....	14
1.1.3 Reactivos de Flotación	15
1.2 Zona de Colección	16
1.2.1 Tiempo de Residencia	17
1.2.2 Mezclado en zona de colección.....	17
1.2.3 Dispersión del Gas	18
1.3 Zona de Espuma (separación).....	21
1.3.1 Efecto de variables en la espuma	21
1.3.2 Estudios previos	23
1.4 Equipos de Flotación	27
1.5 Trazadores Radioactivos.....	28
1.5.1 Régimen de Mezcla.....	29
1.5.2 Tiempo medio de residencia del líquido y sólido en la espuma.....	30
1.5.3 Arrastre.....	32
Capitulo 2 Procedimiento Experimental	34
2.1 Descripción de la Celda de Flotación Bi-dimensional	34
2.2 Descripción de los Equipos	35
2.2.1 Cámara Visiofroth	35
2.2.2 Bombas Peristálticas	36

2.2.3	Sensores.....	36
Capitulo 3	Capítulo 3: Diseño Experimental	38
3.1	Tratamiento de señales	39
3.2	Tratamiento de Datos Cámara Visiofroth.....	41
3.3	Procedimiento Experimental	41
Capitulo 4	Resultados, Análisis y Discusión de Resultados.....	43
4.1	Sensores en Zona de Espuma	43
4.1.1	Inyección en la superficie de la espuma.....	43
4.1.2	Inyección en la interfase pulpa/espuma	45
4.1.3	Efecto de Ángulo <i>Frothcrowder</i>	47
4.2	Sensores en Zona de Colección	48
4.2.1	Inyección en la superficie de la espuma.....	48
4.2.2	Inyección en la interfase pulpa/espuma	51
4.2.3	Efecto de frothcrowder.....	54
4.3	Detección de Fondos Finales en Estado Pseudoestacionario	55
4.4	Velocidad del líquido en la descarga de la espuma	58
4.4.1	Efecto del ángulo <i>frothcrowder</i> en la velocidad de Espuma.....	66
4.5	Efecto de drenaje de líquido según distancia a rebalse	68
Capitulo 5	Conclusiones	71
Capitulo 6	Recomendaciones.....	72
	Referencias	73
Anexo A:	Calibración Bomba Peristáltica 1.	76
Anexo B:	Método de Cálculo de Drenaje de líquido	77
Anexo C:	Datos Originales de Experiencias 1 a 9	78
Anexo D:	Datos Filtrados de Experiencias 1 a 9	78
Anexo E:	Datos Originales Cámara Visiofroth.....	78
Anexo F:	Tratamiento de Datos Cámara Visiofroth	79
Anexo G:	Velocidad de descarga de Espuma	79
Anexo H:	Detección de Fondo Final.....	79

Índice de Figuras

Figura 1.1: Esquema del Proceso de Colección	12
Figura 1.2: Diseño conceptual del proceso de flotación	13
Figura 1.3: Transporte de masa entre zona de colección y zona de limpieza.	13
Figura 1.4: Adhesión del colector a la superficie del mineral.....	15
Figura 1.5: Concentración de salida de trazador en celdas de flotación mecánica (a) trazador líquido, celda de 100 m ³ , (b) trazador sólido grueso, celda de 300 m ³	17
Figura 1.6: Relación entre el D ₃₂ y el Jg en celdas mecánicas (autoaspirante, AA; aire forzado, AF)	20
Figura 1.7: Zona de interfase distintiva, sin límites de transporte y con espuma estable	21
Figura 1.8: Función de Distribución acumulativa de la velocidad de descarga de espuma con sistema Visiofroth	22
Figura 1.9: Velocidad superficial de espuma en función de la profundidad de espuma.....	24
Figura 1.10: Velocidad de Descarga de las burbujas en función de la altura sobre el labio de descarga.....	24
Figura 1.11: Probabilidad de descarga de burbuja versus distancia horizontal a la pared de rebalse.....	25
Figura 1.12: Campo de velocidades del gas dentro de la espuma: (a) Jg=2,2 cm/s, α=50° y (b) Jg=2,5 cm/s, α=60°	26
Figura 1.13: Velocidad de burbujas en la zona de espuma: (a) Jg=1,2 cm/s, hd=4 cm; (b) Jg=1,8 cm/s, hd=2 cm.....	27
Figura 1.14: Celda Wemco 1+1	28
Figura 1.15: Celda Mecánica de 600 m ³	28
Figura 1.16: DTR de sólidos finos no flotables en la primera celda de un banco rougher	30
Figura 1.17: Comparación de DTR del líquido en celdas mecánicas de aire forzado de 160 y 300 m ³	30
Figura 1.18: Corte y vista superior del transporte de espuma en una celda de flotación de gran tamaño	31
Figura 1.19: Ubicación de los sensores en celda de flotación de 130 m ³	31
Figura 1.20: Señal de entrada y salida de la espuma para sólidos no flotables.....	32
Figura 2.1: Celda Bidimensional en línea segmentada, en celda industrial autoaspirante de 130 m ³	34
Figura 2.2: Instalación de la celda de flotación bidimensional prototipo.	35
Figura 2.3: Ubicación de sensores en celda bi-dimensional.	37
Figura 3.1: Señal original detectada por sensores 1, 2, 3 y 8.	39
Figura 3.2: Señal detectada por sensores 1, 2, 3 y 8 después del primer filtro.	40
Figura 3.3: Señal detectada por sensores 1, 2, 3 y 8 con ambos filtros.....	40
Figura 4.1: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 1	43
Figura 4.2: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 2.	44

Figura 4.3: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 3.	44
Figura 4.4: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 4.	45
Figura 4.5: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 5.	45
Figura 4.6: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 6.	46
Figura 4.7: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 7.	46
Figura 4.8: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 8.	47
Figura 4.9: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 9.	48
Figura 4.10: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 1.	49
Figura 4.11: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 2.	50
Figura 4.12: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 3.	50
Figura 4.13: Señal detectada por sensores ubicados en la zona de colección en Experiencia 4. ...	51
Figura 4.14: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección, para Experiencia 5. ...	52
Figura 4.15: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 6.	52
Figura 4.16: Señal detectada por sensor 7 en Experiencia 6.	53
Figura 4.17: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 7.	53
Figura 4.18: Señal registrada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 8.	54
Figura 4.19: Señal detectada por sensores de fondo en Experiencia 9.	55
Figura 4.20: Señal del estado pseudo estacionario detectada por los sensores 1 a 9 en los últimos 100 s de cada experiencia.	57
Figura 4.21: Aumento de Fondo Final pseudo estado estacionario de sensores 4, 5, 6 y 7.	57
Figura 4.22: Señal detectada por sensores 3, 2 y 1.	58
Figura 4.23: Imágenes de depósito de descarga en experiencia 1.	59
Figura 4.24: Distancia desde punto de inyección a rebalse.	62
Figura 4.25: Imagen de depósito en Experiencia 5.	63
Figura 4.26: Velocidad del líquido estimada v/s Velocidad Visiofroth.	66
Figura 4.27: Velocidad de Espuma v/s Ángulo frothcrowder para experiencia 3 y 8 (inyección tope). :	67
Figura 4.28: Velocidad de Espuma v/s Ángulo frothcrowder para experiencia 7 y 9 (inyección interfase).	68
Figura 4.29: Intensidad Promedio en Zona de Colección v/s Distancia de Inyección.	69
Figura 4.30: Radiación en Zona de Espuma para inyección en interfase.	69
Figura 4.31: Radiación promedio en Zona de espuma para inyección en superficie.	70
Figura 4.32: Drenaje de líquido de la zona de espuma para experiencias 1 a 9.	70
Figura A-1 Bomba Peristáltica 1.	76
Figura A-2: Bomba Peristáltica 2.	76
Figura A-3: Contrastación bomba peristáltica 1.	76

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Diseño factorial del estudio realizado por Leiva (2012).	23
Tabla 1.2:Diseño factorial del estudio realizado por Rojas (2013).	23
Tabla 3.1: Condiciones de Operación para las nueve experiencias	38
Tabla 3.2:Diseño de Experimento.	39
Tabla 3.3:Condiciones de Operación.	41
Tabla 3.4:Condiciones de Operación de cada experiencia.	42
Tabla 4.1:Tiempos de Mezcla de las 9 Experiencias.	55
Tabla 4.2: Detección de Fondos Finales en cuentas por segundo, cps.	56
Tabla 4.3: Tiempos de detección máxima para sensores 1, 2 y 3.	58
Tabla 4.4: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 2.	61
Tabla 4.5: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 3.	61
Tabla 4.6:Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 4.	62
Tabla 4.7: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 6.	64
Tabla 4.8:Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 7.	64
Tabla 4.9: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 8.	65
Tabla 4.10: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 9.	65
Tabla 4.11: Porcentaje de Error entre Velocidad de espuma estimada y velocidad de espuma registrada con cámara Visiofroth.	66
Tabla 4.12: Velocidad Visiofroth y Velocidad Estimada para experiencias 3, 7, 8 y 9.	67
Tabla B-1: Fondo Final de las 9 Experiencias.	77
Tabla B-2: Drenaje de Líquido de cada Experiencia.	78

Nomenclatura

g	Aceleración de gravedad.
h_c	Altura en la zona de colección.
α	Ángulo Frothcrowder.
A_c	Área de sección transversal del equipo.
Q_G	Caudal de Gas.
ε_G	Concentración de gas (holdup).
ρ_{pulpa}	Densidad de la pulpa
ΔP	Diferencia de Presión.
L	Distancia entre medidores de presión.
Q_F	Flujo volumétrico de pulpa en la alimentación.
h_E	Profundidad de Espuma.
τ_p	Tiempo de residencia de la pulpa
J_G	Velocidad Superficial de gas.
V_{eff}	Volumen efectivo de la zona de colección.

Objetivos y Alcances

El objetivo general de este estudio es evaluar el transporte de líquido y drenaje en la espuma de una celda de flotación a escala piloto. Para ello, se utilizará la técnica de trazado radiactivo, lo cual permite caracterizar la zona de limpieza, sin una intervención invasiva en el proceso. Este método tiene como finalidad analizar las siguientes variables del proceso de flotación: tiempo de residencia del líquido, régimen de mezcla, velocidad del líquido en la espuma, tiempo de mezcla en la zona de colección y por último, el efecto del drenaje de líquido hacia la pulpa. Estas variables son fundamentales para evaluar y analizar la estabilidad de la espuma. Esta última, es una condición necesaria en las últimas celdas rougher para mantener la calidad del concentrado, pese a la disminución de la ley de mineral entrante.

En el presente trabajo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Medir la velocidad de espuma mediante el sistema Visiofroth y determinar la velocidad del líquido a través de la espuma, utilizando la técnica de trazado radiactivo (líquido); para comparar la velocidad del líquido y del gas en la espuma, y así, determinar una similitud entre ambas variables.
- Estimar el drenaje de líquido desde la espuma, según la distancia al rebalse.
- Estimar el tiempo de mezcla de la zona de colección en una celda de flotación piloto y contrastarlo con el tiempo de mezcla en una celda de flotación industrial.

Capítulo 1 : El proceso de flotación y el uso de trazadores radioactivos en la industria minera

La flotación de minerales es un proceso de separación físico-químico, aplicado al procesamiento de minerales como método de concentración, donde se involucra las fases: sólida (mineral), líquida (agua) y gaseosa (aire).

El principio fundamental del proceso de flotación se basa en la interacción que existe entre las burbujas y las partículas finas de sólido suspendidas en el agua, las que se adhieren de forma selectiva formando el agregado partícula-burbuja (colección). Este agregado se forma en la zona de pulpa y asciende hacia la zona de espuma, logrando la recuperación del mineral valioso o útil.

La flotación se produce debido a la diferencia en las propiedades superficiales de las partículas, las que se clasifican como hidrófobas, que son repelentes al agua e hidrófilas, las cuales poseen una mayor afinidad por el agua (Figura 1.1). Con la ayuda de reactivos, estas diferencias se acentúan, permitiendo la colección y transporte selectivo de las partículas hidrófobas. (Yianatos & Vinnett, 2015).



Figura 1.1: Esquema del Proceso de Colección

1.1 Características del proceso de flotación

El proceso de flotación se puede interpretar como una secuencia de dos etapas: reacción y separación (Figura 1.2). En la etapa de reacción se alimenta pulpa, reactivos químicos, aire y energía y es donde ocurre la colección de las partículas de mineral valioso (formación del agregado partícula-burbuja). Por otra parte, la etapa de separación ocurre en la zona de espuma, donde se produce un rechazo de la ganga arrastrada (drenaje) por gravedad y del material menos liberado, permitiendo mejorar la selectividad de los procesos de flotación. (Yianatos & Vinnett, 2015)

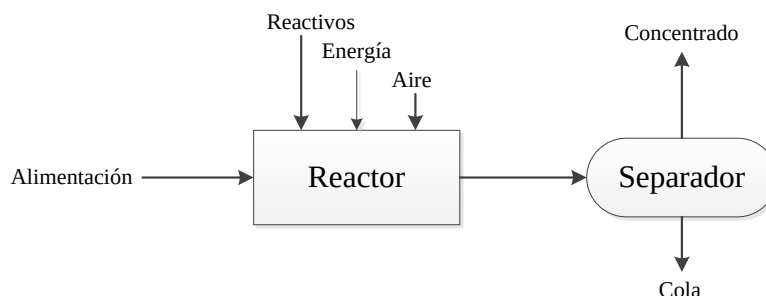


Figura 1.2: Diseño conceptual del proceso de flotación (Yianatos & Vinnett, 2015).

Para el análisis de celdas y columnas industriales de flotación, se consideran dos zonas de diferentes características: la zona de colección (pulpa) y la zona de limpieza (espuma). La Figura 1.3 muestra la interacción entre ambas zonas y aquellas corrientes que se consideran en el proceso de flotación para un análisis operacional (Rojas, 2013).

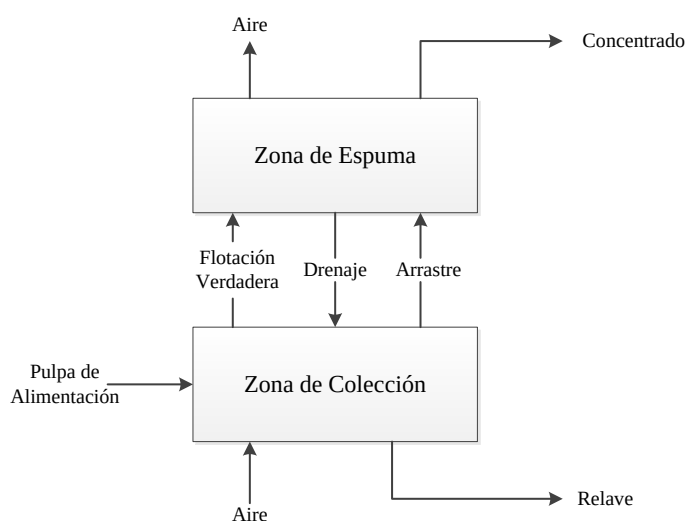


Figura 1.3: Transporte de masa entre zona de colección y zona de limpieza.

1.1.1 Cinética del proceso

Los mecanismos predominantes en la recuperación de minerales son el transporte del agregado partícula-burbuja, el transporte de espuma y el arrastre de partículas finas, suspendidas en el líquido que arrastran las burbujas.

Colección selectiva (true flotation)

La adhesión selectiva de minerales valiosos a las burbujas de gas representa la mayor fracción de partículas recuperadas al concentrado (Wills, 1997). La flotación depende de la probabilidad de unión de la partícula a una burbuja en la celda de flotación, la cual está determinada por la hidrofobicidad de la superficie de la partícula, según la adsorción selectiva del colector.

Principalmente, son los criterios químicos y termodinámicos los que determinan la hidrofobicidad de una partícula y la consecuente capacidad de adhesión a las burbujas. La fracción de material hidrófilo o con menor flotabilidad, que no se adhiere a las burbujas, permanece en la pulpa y constituye la cola o relave.

Arrastre

El arrastre corresponde al transporte de mineral producido por el paso de líquido de alimentación hacia la espuma y es de carácter no selectivo. La zona de espuma es la región encargada de minimizar la recuperación por arrastre de partículas hidrófilas, que llevan a una disminución en la ley de concentrado. Por lo tanto, el flujo neto de partículas arrastradas al concentrado de una celda estará determinado por 2 mecanismos opuestos: (i) Flujo ascendente de sólidos arrastrados a través de la espuma; (ii) Flujo descendente (drenaje) de material hacia la zona de pulpa (Savassi et al, 1998).

1.1.2 Hidrodinámica del proceso

La recuperación y la selectividad de los procesos de flotación dependen también de las condiciones hidrodinámicas de las celdas. Los requerimientos para la adhesión selectiva entre partículas y burbujas son (Yianatos & Vinnett, 2015):

- a. Adecuada suspensión de partículas de tamaño y densidad variable:

En celdas auto-aspirantes, el impulsor es el encargado de producir la agitación, suspensión y circulación de la pulpa; además de la aireación y dispersión de las burbujas. Una baja agitación resulta en la incapacidad de suspender el material grueso y la consecuente segregación de éste. Por otro lado, una agitación demasiado intensa puede producir la ruptura del agregado partícula-burbuja.

- b. Dispersión de aire en pequeñas burbujas:

El flujo de aire y el tamaño de las burbujas generadas son una de las variables más importantes en el control del proceso de flotación. En celdas mecánicas, la dispersión en pequeñas burbujas dependerá de la operación del impulsor. Particularmente, el tamaño medio de las burbujas disminuirá con un incremento en la velocidad de giro del impulsor y la concentración de gas en la zona de pulpa se incrementará (Gorain et al, 1995).

- c. Formación de una interfase pulpa-espuma nítida y estable:

La efectividad de la flotación estará limitada por: (a) pérdida de interfase (*flooding*), (b) baja capacidad de transporte y (c) perturbaciones en la interfase (*boiling*), siendo las tres condiciones fuertemente dependientes del flujo de aire y del tamaño de las burbujas generadas (Yianatos & Henríquez, 2007).

d. Descarga de la espuma después de separar la ganga y las partículas hidrófobas:

Para mejorar la remoción de la espuma, aumentando su velocidad de transporte, se incorporan aceleradores cónicos de espuma ajustables, denominados *frothcrowder*. Con el mismo objetivo, se añaden rebalses internos en las celdas, con el fin de disminuir las distancias de transporte horizontal en la espuma.

1.1.3 Reactivos de Flotación

En el proceso de flotación, se distinguen tres tipos de reactivos: colectores, espumantes y modificadores.

Colectores:

Los colectores son sustancias orgánicas que se utilizan para aumentar la hidrofobicidad de un mineral de manera selectiva y están formados por una cadena hidrocarbonada (sección apolar) y un grupo funcional (sección polar). La parte polar del colector se adsorbe en la superficie del mineral y la parte apolar queda orientada hacia la fase acuosa, dando el carácter hidrófobo al mineral (Figura 1.4) (Yianatos & Vinnett, 2015)

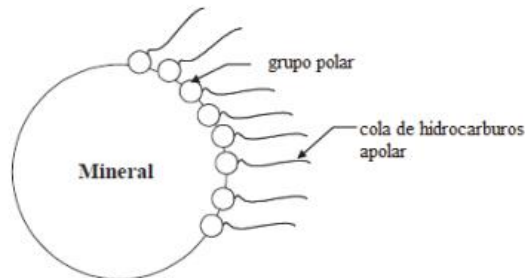


Figura 1.4: Adhesión del colector a la superficie del mineral (Yianatos & Vinnett, 2015).

“La unión química entre el colector y el mineral deberá ser más fuerte que la existente entre el mineral y el agua, de tal manera que el grupo polar del colector no sea atraído por las moléculas de agua. Luego, las partículas de mineral convertidas en hidrófobas por la acción del colector, se adhieren con mayor facilidad a las burbujas de gas que ascienden en la pulpa” (Yianatos & Vinnett, 2015).

Espumantes:

Los espumantes son agentes tenso-activos o surfactantes que poseen una parte polar (hidrófilo) y una parte apolar (hidrófobo). La parte apolar es una cadena hidrocarbonada y la parte polar es típicamente un grupo OH. En la superficie de la burbuja (interfase aire-agua), la cadena hidrocarbonada se orienta hacia la fase gaseosa y el grupo polar hacia el lado del agua (Azgomi et al., 2007).

“El espumante modifica las propiedades superficiales de las burbujas para reducir la coalescencia. Su presencia en la fase líquida aumenta la resistencia de la película que rodea a las burbujas de gas; proporcionando así una mayor estabilidad, menor tamaño y mayor fijación de las partículas” (Yianatos & Vinnett 2015).

Modificadores:

El propósito de estos reactivos es modificar la acción del colector en la superficie de los minerales y mejorar la selectividad de la flotación. En esta categoría se incluyen: activadores, depresores y reguladores pH.

La adición de los reactivos se regula en diferentes puntos del circuito, desde la molienda húmeda a la flotación, en función de los tonelajes de alimentación. Algunos problemas en el acondicionamiento de reactivos (colectores, reguladores) pueden llevar a una disminución en la recuperación o pérdida de selectividad. Adicionalmente, los problemas en la dosificación de espumantes pueden llevar a una disminución en la superficie de contacto total, debido al incremento del tamaño de las burbujas en la zona de colección. Esto provoca una disminución en la capacidad de transporte del material valioso desde la zona de colección a la zona de espuma (Yianatos & Vinnett 2015).

1.2 Zona de Colección

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

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

- Tiempo de residencia y régimen de mezcla.
- Reactivos (tipo y dosificación).
- Tamaño de partículas y liberación.
- Dispersión del gas.
-

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

1.2.1 Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia es uno de los factores que afectan la ley de concentrado y principalmente la recuperación de minerales. El tiempo medio de residencia de la pulpa en la zona de colección (Ecuación 1) puede estimarse mediante la relación entre el volumen efectivo de la zona de colección, V_{eff} , y el flujo volumétrico de pulpa de alimentación, Q_f (Yianatos & Vinnett, 2015).

$$\tau_p = \frac{V_{eff}}{Q_f} = \frac{A_c \cdot h_c \cdot (1 - \varepsilon_G)}{Q_f} \quad (1)$$

El tiempo de residencia de las partículas finas (pequeñas), τ_s , en una celda de flotación mecánica es similar al del líquido, debido a la baja segregación. En cambio, en columnas de flotación, la segregación es mayor, puesto que no existe agitación mecánica (Yianatos & Díaz, 2011).

1.2.2 Mezclado en zona de colección

En diversos estudios, se ha analizado el régimen de mezcla en equipos industriales mediante la caracterización de la distribución del tiempo de residencia (DTR). Estas mediciones se han realizado mediante la técnica de trazado radiactivo. La Figura 1.5 muestra dos ejemplos de regímenes de mezcla en celdas mecánicas de 100 m³ y 300 m³ (Yianatos et al., 2015). En ambos casos, se observa que un porcentaje significativo del mineral permanece al interior de los equipos un tiempo inferior al tiempo medio de residencia (aproximadamente 4 a 5 min, en ambos casos). Esta condición afecta negativamente la recuperación del mineral valioso, debido a que un porcentaje significativo del mineral es transportado a la corriente de relave, en un tiempo inferior al necesario para garantizar el proceso de colección. Por esta razón, se utilizan filas de celdas de flotación.

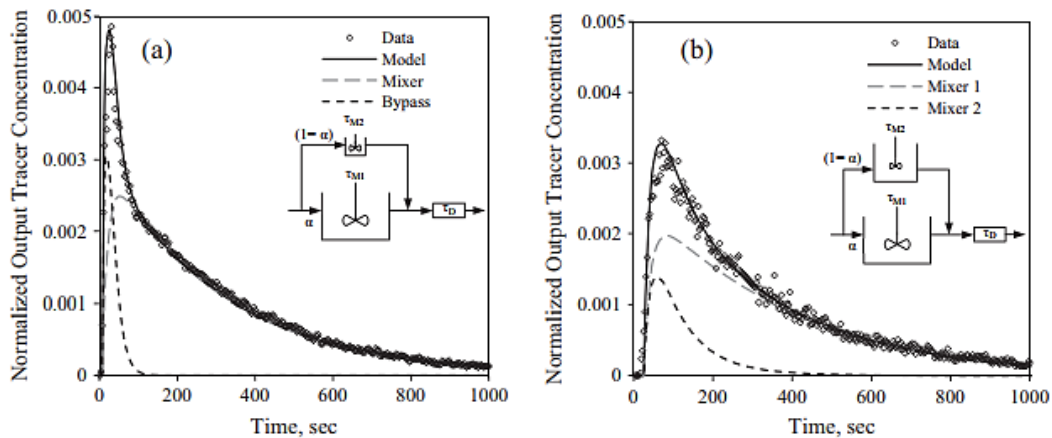


Figura 1.5: Concentración de salida de trazador en celdas de flotación mecánica (a) trazador líquido, celda de 100 m³, (b) trazador sólido grueso, celda de 300 m³ (Yianatos et al., 2015).

1.2.3 Dispersión del Gas

La dispersión del gas se produce con la entrada de aire al medio líquido en una celda de flotación y se caracteriza por ser una variable manipulable del proceso de flotación (Endara, 2006), la cual juega un rol fundamental en la colección de mineral valioso (recuperación) y en el transporte en la zona de espuma (selectividad). Con el fin de evaluar este efecto a escala industrial, se utilizan parámetros como: (a) velocidad superficial de gas, J_G , (b) distribución de tamaño de burbuja, la cual es representada por el diámetro promedio Sauter (D_{32}) (c) concentración o *holdup* de gas, ε_G . Además, se define el flujo superficial de área de burbuja (S_B) como índice para determinar la tasa de generación de superficie de contacto (Yianatos & Vinnett, 2015).

Velocidad Superficial de gas

El flujo de gas es una de las variables más importantes en el control del proceso de flotación, debido a su gran influencia en la recuperación de mineral. El aumento en la recuperación se debe al incremento del área superficial de las burbujas y al aumento en la descarga de espuma al concentrado. Por otra parte, un aumento excesivo del flujo de gas, provoca un incremento de la turbulencia, un crecimiento del tamaño de las burbujas, arrastre de ganga fina al concentrado y pérdida de la interfase pulpa-espuma (Yianatos & Vinnett, 2015).

La velocidad superficial de gas, J_G , se define como la relación entre el caudal de gas, Q_G , y el área de la sección transversal del equipo A_c , según la Ecuación 2. Para condiciones típicas de operación de celdas y columnas, la velocidad superficial de gas varía entre 0.5 y 2.5 cm/s (Vinnett et al., 2015). Este índice permite comparar la operación de equipos de flotación (en términos del flujo de gas) con diferentes áreas de sección transversal y con distintos diseños.

$$J_G = \frac{Q_G}{A_c} \quad (2)$$

La velocidad superficial de gas está limitada por: (a) aumento en el tamaño de burbujas, (b) cambio del tipo de flujo, (c) pérdida de interfase, (d) insuficiencia del sistema de burbujeo y (e) pérdida de bias positivo.

Concentración de Gas (holdup)

La concentración de gas (ε_G) corresponde a la fracción volumétrica de gas contenida en una determinada zona del equipo de flotación.

Normalmente, la concentración de gas se determina en la zona de colección y es un parámetro que depende del tipo de espumante, del valor del flujo de gas, del tamaño de burbujas, de la densidad y viscosidad de la pulpa, de la carga de sólidos en las burbujas y de la velocidad de descenso de la pulpa, en casos de columnas de flotación (Yianatos & Finch, 1990).

La concentración de gas se puede calcular utilizando la Ecuación (3) (Yianatos & Vinnett, 2015):

$$\varepsilon_G = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{pulp} \cdot g \cdot L} \quad (3)$$

Tamaño de burbuja

El tamaño medio de las burbujas y la distribución de tamaño de burbujas son fundamentales en la flotación de minerales, debido al efecto que poseen en la eficiencia de colección y en el transporte de partículas. Las burbujas pequeñas permiten alcanzar una cinética de colección más rápida y un mayor transporte de sólidos por volumen de aire. Sin embargo, las burbujas extremadamente pequeñas presentan una baja velocidad de ascenso, pudiendo ser inferior a la velocidad de descenso de la pulpa. En este caso, las burbujas pueden ser arrastradas por el líquido, lo que genera la pérdida de mineral valioso en el flujo de relave (Yianatos & Puella, 1994). En condiciones extremas, es posible perder la interfase pulpa-espuma, lo que favorece el arrastre de partículas finas al concentrado.

Las burbujas de gran tamaño reducen la eficiencia de colección, aumentan la turbulencia en la zona de colección, favorecen el arrastre de ganga fina al concentrado y desestabilizan la zona de espuma (Yianatos & Vinnett, 2015). Existe un tamaño medio de burbuja ideal en función del tamaño medio de las partículas, el cual puede ser ajustado a través de las variables operacionales del sistema de aireación y la adición de espumantes.

El diámetro y la distribución de tamaño de burbuja, dependen del sistema de generación de burbujas, de su operación y mantenimiento, del flujo de gas y de la adición de reactivo espumante (Lisperguier & Yianatos, 1998). Vinnett et al. (2014) reportaron un amplio rango de tamaño de burbujas en celdas mecánicas auto-aspirantes y de aire forzado con volúmenes en el rango de 10 – 300 m³. Se obtuvieron valores de $D_{32} = 0.9 - 4.3$ mm al modificar la velocidad superficial del gas en un rango entre 0.5 – 2.3 cm/s. La Figura 1.6 muestra la dependencia del diámetro Sauter con la velocidad superficial de gas en celdas mecánicas de distinto tamaño y con diferentes sistemas de aeración (auto-aspirante, AA; aire forzado, AF) (Vinnett et al., 2014).

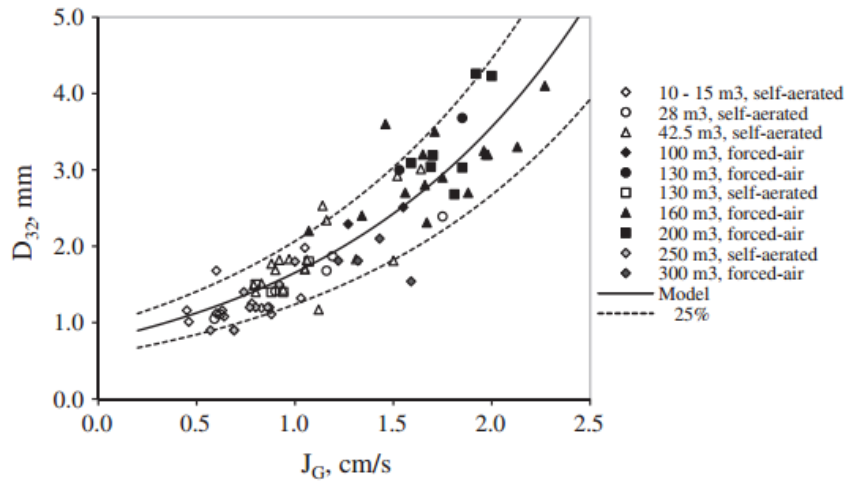


Figura 1.6: Relación entre el D_{32} y el J_G en celdas mecánicas (autoaspirante, AA; aire forzado, AF) (Vinnett et al., 2014).

Formación de la interfase pulpa-espuma (Separación)

Para que se produzca la separación, es fundamental la formación de una interfase pulpa-espuma nítida. La pérdida de interfase o condición de inundación fija el límite para el tamaño de burbuja y la velocidad superficial de gas, es decir, el máximo flujo superficial de área de burbuja, S_B .

“Por otro lado, la máxima capacidad de transporte es otra condición de borde limitante para el transporte de mineral y fija el mínimo flujo superficial de área de burbuja para una cierta operación”. Por lo tanto, existe una relación directa entre el tamaño de burbuja y la velocidad superficial de gas, para crear una interfase pulpa-espuma adecuada y para cumplir el transporte de masa a través de esta interfase (Yianatos & Henríquez, 2007).

La Figura 1.7 muestra los contornos teóricos para la flotación de minerales sulfurados. Los tamaños de burbujas menores a 1.5 mm conforman el contorno superior, correspondiente al máximo flujo de gas teórico al que se puede operar, con el fin de construir una interfase pulpa-espuma distintiva.

Para una velocidad superficial de gas menor que 2.5 cm/s, el contorno inferior corresponde al mínimo flujo superficial de área de burbuja, relacionado principalmente a limitaciones en la capacidad de transporte y a la remoción de espuma a flujos de gas bajos.

Por otra parte, un S_B máximo, aproximadamente entre 130 $\text{m}^2/\text{s}/\text{m}^2$ y 180 $\text{m}^2/\text{s}/\text{m}^2$, ha sido observado antes de la inundación de la celda (pérdida de la interfase) para tamaños de burbuja de 0.8 – 1.2 mm, lo cual implica una velocidad superficial de gas de 2.7 cm/s.

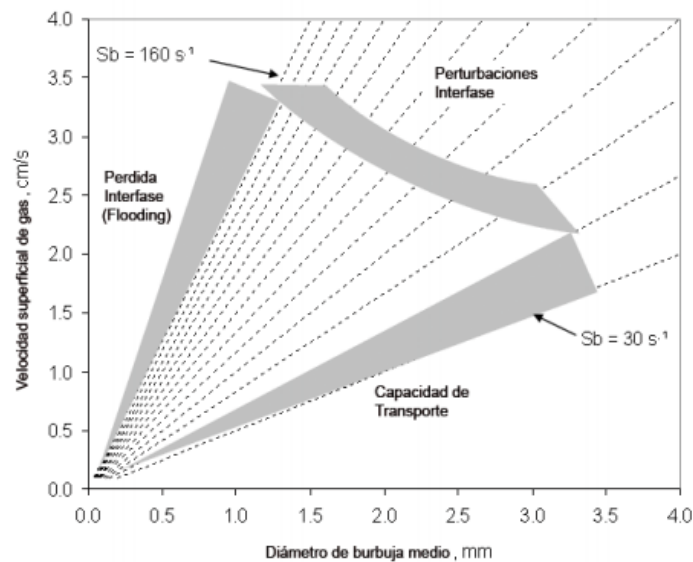


Figura 1.7: Zona de interfase distintiva, sin límites de transporte y con espuma estable (Yianatos & Henríquez, 2007).

1.3 Zona de Espuma (separación)

“El proceso de limpieza corresponde al paso de las burbujas mineralizadas a través del lecho de espuma hasta el rebalse de concentrado. Los fenómenos que ocurren en esta zona son complejos, por lo cual los modelos que relacionan el impacto de las variables operacionales en la recuperación o en la selectividad de la espuma son limitados” (Yianatos & Vinnett, 2015). En general, los modelos cinéticos de flotación consideran los equipos como una sola unidad, y por lo tanto, se derivan parámetros y constantes cinéticas que describen la operación global. Las variables que afectan a la recuperación de espuma son:

- Velocidad superficial de gas
- Altura de espuma
- Agua de lavado (principalmente en columnas).

1.3.1 Efecto de variables en la espuma

Velocidad Superficial de Gas

La velocidad superficial de gas condiciona el transporte de las burbujas cargadas hacia la corriente de concentrado. Por lo tanto, un aumento en la velocidad superficial de gas disminuye el tiempo de residencia de las burbujas en la zona de espuma, aumentando la recuperación de la zona de limpieza (Zheng et al., 2004).

La Figura 1.8 muestra la función de distribución acumulativa de la velocidad de descarga de espuma en una celda de flotación piloto (Rojas et al., 2014). Esta velocidad de descarga se obtuvo a través del sistema Visiofroth, desarrollado por Metso Minerals (Metso Minerals, 2006), en una celda bidimensional ubicada en la Universidad Técnica Federico Santa María.

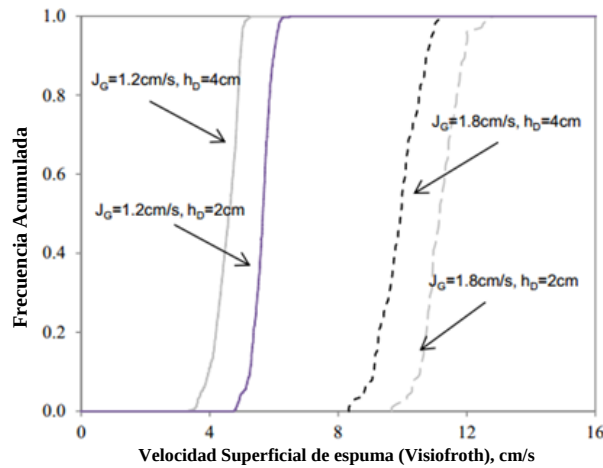


Figura 1.8: Función de Distribución acumulativa de la velocidad de descarga de espuma con sistema Visiofroth (Rojas et al., 2014).

Se observa el efecto de incrementar la velocidad superficial de gas, desde 1.2 cm/s a 1.8 cm/s en la velocidad de descarga de la espuma, manteniendo una profundidad de espuma constante. La velocidad de descarga es una medida indirecta del flujo de concentrado. Por lo tanto, un incremento en la velocidad superficial de gas, resulta en un mayor flujo de líquido descargado en el concentrado. Para regular el J_G se debe considerar una adecuada operación en la zona de colección y un transporte de espuma apropiado. Esto se logra manteniendo la velocidad de descarga en un rango que garantice un adecuado compromiso entre el tiempo de residencia del gas en la zona de espuma y el flujo de agua obtenido en la corriente de concentrado (Yianatos & Vinnett, 2015).

Altura de Espuma

La altura de espuma, h_F , es otra variable importante en la selectividad del proceso de flotación, ya que modifica el transporte de las burbujas cargadas hacia la corriente de concentrado. Una disminución en la altura de espuma, disminuye el tiempo de residencia de las burbujas en esta zona, lo cual aumenta la recuperación de la zona de limpieza (Zheng et al., 2006). En la Figura 1.8 se observa un aumento en la velocidad de descarga de espuma al disminuir h_F , desde 4 cm a 2 cm, manteniendo una velocidad superficial de aire constante y a su vez, resulta en un mayor flujo de líquido en el concentrado.

Las celdas mecánicas industriales, en etapas de flotación rougher, operan típicamente con profundidades de espuma menores a 15 cm. El objetivo de esta operación es maximizar la recuperación del circuito. Por otra parte, una columna de flotación trabaja generalmente con lechos de espuma que varían entre 0.5 a 1.5 m. En escala piloto, estos valores se sitúan entre 0.4 y 1.0 m (Yianatos & Vinnett, 2015). Para el caso de columnas de flotación, el arrastre hidráulico es el principal problema del proceso. Un lecho de espuma relativamente bajo (0.4 – 0.6 m) es suficiente cuando se opera con velocidades de gas moderadas $J_G < 1.5$ cm/s. Si el objetivo es obtener una alta selectividad o si el flujo de gas es elevado, se recomienda trabajar con lechos de espuma mayores (1 – 1.5 m) (Yianatos et al., 1987).

1.3.2 Estudios previos

En trabajos anteriores (Leiva, 2012; Rojas, 2013) se ha caracterizado el transporte de espuma en el proceso de flotación, utilizando una celda bidimensional a escala piloto (prototipo). Se analizaron variables como: velocidad de descarga de espuma, recuperación de gas, tiempo de residencia, probabilidad de descarga al concentrado de las burbujas que alcanzan el nivel de la interfase, tamaño de burbujas a través de la espuma y perfil de velocidad del gas a través de la espuma. Estas variables influyen directamente en la recuperación de mineral en equipos de flotación industrial.

En el estudio realizado por Leiva (2012) se utilizaron dos velocidades superficiales de gas, 2.2 cm/s y 2.5 cm/s, además de un ángulo *frothcrowder* de 50° y 60°; manteniendo constante la profundidad de espuma (h_E). El trabajo se realizó en base a un diseño factorial presentado en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Diseño factorial del estudio realizado por Leiva (2012).

	J_G cm/s	Ángulo <i>Frothcrowder</i>
Condición Alta	2.5	60°
Condición Baja	2.2	50°

En el estudio realizado por Rojas (2013), se utilizó una profundidad de espuma de 2 y 4 cm con una velocidad superficial de gas de 1.2 y 1.8 cm/s; manteniendo constante el ángulo *frothcrowder* en un valor de 45°. El trabajo se desarrolló en base a un diseño factorial de 2x2 presentado en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Diseño factorial del estudio realizado por Rojas (2013).

	J_G cm/s	h_E cm
Condición Alta	1.8	4
Condición Baja	1.2	2

Velocidad superficial de espuma con sistema Visiofroth.

En el estudio de Rojas (2013) la velocidad superficial de espuma, medida a través del sistema Visiofroth, presentó un aumento de 24, al disminuir la profundidad de espuma desde 4 a 2 cm (Figura 1.8). Por otra parte, para un $J_G=1.8$ cm/s, la variación de la profundidad de espuma produjo un aumento porcentual del 13% en la velocidad superficial de espuma.

Adicionalmente, se realizaron dos experiencias que permitieron identificar el efecto de la profundidad de espuma sobre la velocidad superficial en un rango más amplio, es decir, (i) $h_E=1$ cm y (ii) $h_E=6$ cm (Figura 1.9). Se observa que al aumentar la profundidad de espuma hasta $h_E=6$ cm, se produce una significativa reducción en la velocidad superficial para ambos flujos de aire. No obstante, para $J_G=1.8$ cm/s, se genera un *peak* en la velocidad de espuma para $h_E = 2$ cm.

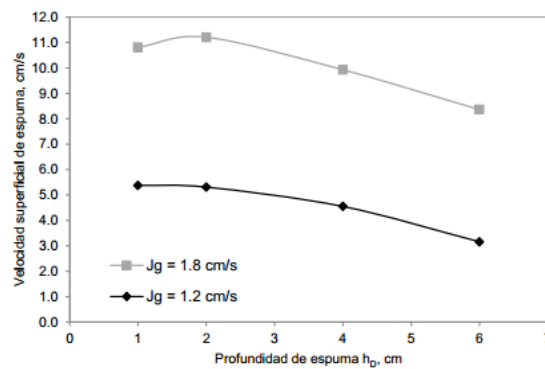


Figura 1.9: Velocidad superficial de espuma en función de la profundidad de espuma (Rojas et al, 2014).

Velocidad de descarga de las burbujas

La Figura 1.10 muestra los resultados de la velocidad de descarga en función de la altura sobre el labio de descarga para las cuatro condiciones del diseño factorial presentadas en la Tabla 1 (Leiva, 2013). Se observa un incremento de la velocidad del gas desde el rebalse al tope de la espuma (desde 0 a 4 cm sobre el labio), lo cual implica que las burbujas que descargan sobre el labio, en posiciones más cercanas a éste, alcanzan velocidades de descarga menores en todos los casos.

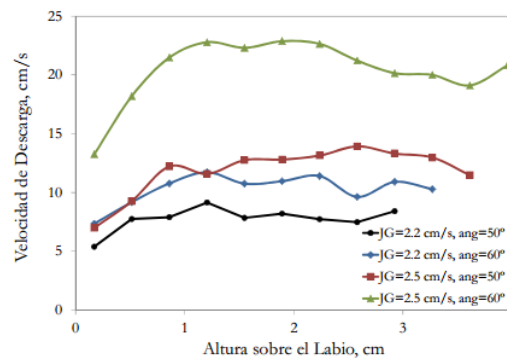


Figura 1.10: Velocidad de Descarga de las burbujas en función de la altura sobre el labio de descarga (Leiva, 2012).

En la Figura 1.10 se observa que al aumentar el valor de J_G de 2.2 a 2.5 cm/s, con un ángulo α constante (50°), se produce un incremento de aproximadamente 4 cm/s en la velocidad de descarga promedio. A su vez, al incrementar la velocidad superficial de gas, pero con un ángulo de 60° , se produce un aumento de 10 cm/s.

Por otra parte, al mantener constante el valor de J_G en 2.2 cm/s, y aumentar el ángulo *frothcrowder* de 50° a 60° , se produce un incremento de 2.5 cm/s en la velocidad de descarga. De la misma manera, una velocidad superficial de gas de 2.5 cm/s, aumenta la velocidad de descarga de 12.1 cm/s a 20.7 cm/s.

Probabilidad de descarga de las burbujas

En los estudios analizados (Leiva, 2012; Rojas, 2013), se realizó una estimación de la probabilidad de descarga de las burbujas que ingresan a la zona de espuma, en función de la distancia a la pared. Esto corresponde a la fracción de burbujas que no colapsó, ya sea en el tope de la espuma o en el trayecto a través de la espuma y que se recuperó en la corriente de concentrado de la celda bidimensional.

En la Figura 1.11 se observa un efecto significativo del J_G en la probabilidad de descarga, al incrementar su valor desde 1.2 a 1.8 cm/s (Rojas, 2013). A una distancia de 21 cm, el 100% de las burbujas son recuperadas, considerando una profundidad de espuma de 4 cm. Sin embargo, para una profundidad de espuma de 2 cm, la distancia a la cual el 100% de las burbujas son recuperadas es de 35 cm. Por otro lado, para un J_G de 1.2 cm/s, se obtuvo una diferencia de 14 cm, al disminuir la profundidad de espuma desde 4 a 2 cm. Por último para un $J_G = 1.8$ cm/s la disminución de la profundidad de espuma no generó cambios significativos.

Cabe destacar que, para todos los casos, la probabilidad de descarga de las burbujas muestra un brusco cambio de 0 a 1 en un rango de 4 cm a 8 cm, debido a la distribución de tamaño de burbujas que ingresa a la espuma, implicando una variabilidad en la trayectoria y velocidad de transporte.

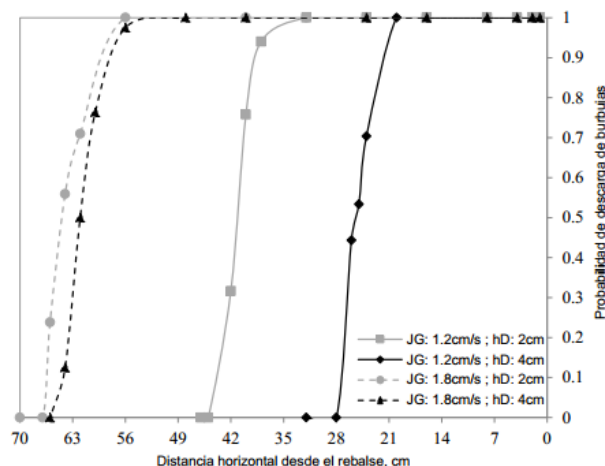


Figura 1.11: Probabilidad de descarga de burbuja versus distancia horizontal a la pared de rebalse (Rojas, 2013).

La Figura 1.11 muestra que al desplazarse la curva de probabilidad hacia la izquierda, aumenta la recuperación de aire, debido al aumento en la sección correspondiente al labio de descarga (Rojas, 2013).

Campo de velocidades del gas dentro de la espuma

En la Figura 1.12 se muestra el campo de velocidad de gas dentro de la espuma, donde cada tramo limitado por una flecha corresponde a la trayectoria promedio, seguida por un conjunto de 20 burbujas (Leiva, 2012). Además, se observa una concentración de las líneas de flujo al aumentar el valor de J_G y el ángulo *frothcrowder*. Este comportamiento se observa en la Figura 1.12b para una velocidad superficial de gas de 2.5 cm/s y un ángulo de 60°. Bajo esta condición, se observa una mayor velocidad de las burbujas a través de la espuma y a su vez, una mayor concentración de las líneas de flujo en la descarga.

Los resultados mostrados en la Figura 1.12a ratifican la presencia de burbujas que colapsa en el tope de la espuma, lo que es consistente con los resultados de probabilidad de descarga mostrados en la Figura 1.11.

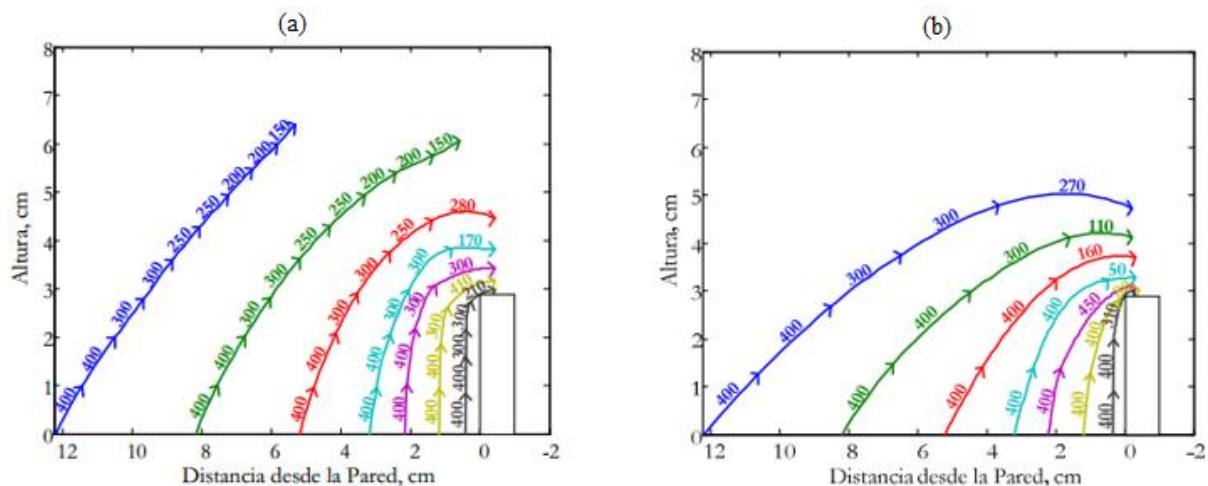


Figura 1.12: Campo de velocidades del gas dentro de la espuma: (a) $J_G=2,2$ cm/s, $\alpha=50^\circ$ y (b) $J_G=2,5$ cm/s, $\alpha=60^\circ$ (Leiva, 2012).

En el trabajo presentado por Rojas (2013) se realiza el procesamiento de 50 burbujas, estas comienzan su movimiento en la posición inicial de las flechas, lo cual representa el campo de velocidad de las burbujas para las condiciones extremas del diseño factorial (Tabla 1.2). En la Figura 1.13a y 1.13b se observa una mayor concentración de las líneas de flujo en las cercanías del rebalse, al incrementar la velocidad superficial del gas y/o disminuir la profundidad de espuma.

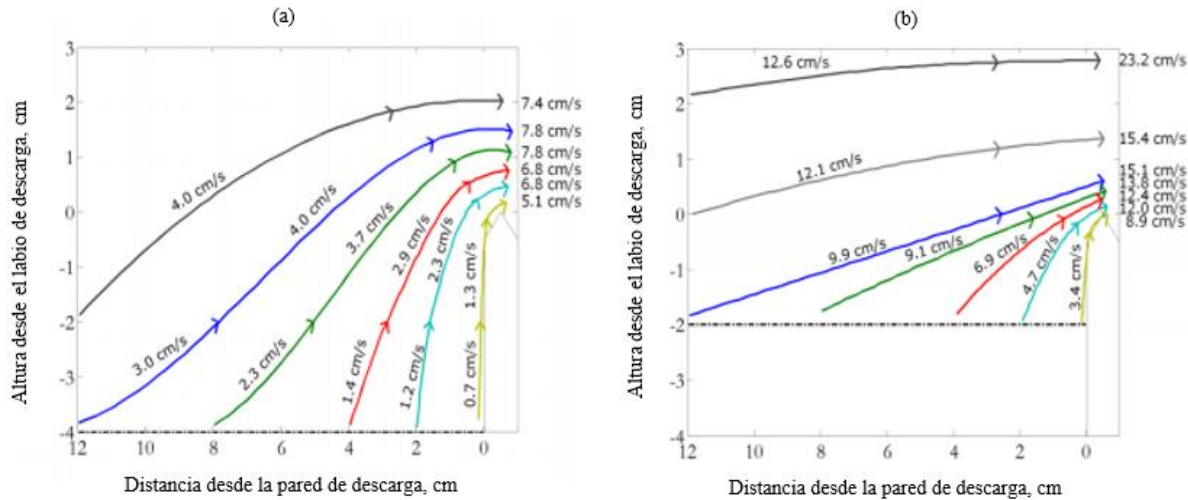


Figura 1.13: Velocidad de burbujas en la zona de espuma: (a) $J_g = 1.2 \text{ cm/s}$, $h_d = 4 \text{ cm}$; (b) $J_g = 1.8 \text{ cm/s}$, $h_d = 2 \text{ cm}$ (Rojas, 2013).

Desde la posición $h_E = 2 \text{ cm}$, las velocidades de descarga obtenidas para $J_G = 1.8 \text{ cm/s}$ fueron aproximadamente el doble que aquellas obtenidas para $J_G = 1.2 \text{ cm/s}$. Existe un incremento significativo en la velocidad en la zona de rebalse al comparar ambas condiciones, donde los flujos de gas efectivamente descargados en la corriente de concentrado fueron aproximadamente $210 \text{ cm}^3/\text{s}$ y $760 \text{ cm}^3/\text{s}$ respectivamente, usando un *holdup* de gas en la espuma de 78% - 82%.

El campo de velocidad sobre el labio de descarga permite la estimación de la recuperación de aire para cada condición experimental, utilizando la metodología de integración del flujo de gas, reportada por (Leiva, 2012).

1.4 Equipos de Flotación

Los equipos de flotación en la industria de la minería cumplen la función de separar materiales heterogéneos, en un sistema multicomponente y multifase, donde destacan las celdas mecánicas y las celdas neumáticas. Para el desarrollo y propósito de este trabajo, sólo se abordarán y analizarán las celdas mecánicas.

Celdas Mecánicas

Las celdas mecánicas se caracterizan por disponer de un medio de agitación que permite mantener el sólido en suspensión, dispersar el gas en pequeñas burbujas y favorecer la formación del agregado partícula-burbuja. Las características de diseño de las celdas mecánicas incluyen la geometría de la celda, la hidrodinámica y la suspensión de sólidos.

Actualmente, las celdas son de forma cilíndrica, lo que permite disponer de condiciones simétricas y estables en todo el equipo, además de reducir la presencia de zonas muertas. Las celdas de gran tamaño (superior a 100 m³) incorporan aceleradores de espuma (*frothcrowders*) y rebalses internos, para asegurar que la distancia de transporte sea lo más corta posible hasta la canaleta recolectora de concentrado (Yianatos & Vinnett, 2015).

En la industria minera, el volumen unitario de las celdas ha ido en aumento a través de los años. En la actualidad, es posible encontrar equipos de hasta 600 m³ (Figuras 1.14 y 1.15), como es el caso de las celdas Outotec y FLSmidth. El gran tamaño de estos equipos permite reemplazar la instalación de un gran número de celdas de menor tamaño en serie, lo cual implica un ahorro de espacio y automatización de estos equipos, además de facilitar labores de mantenimiento.

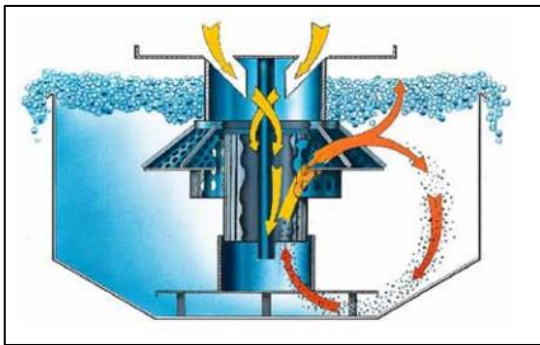


Figura 1.14: Celda Wemco 1+1 (FLSmidth, 2014)

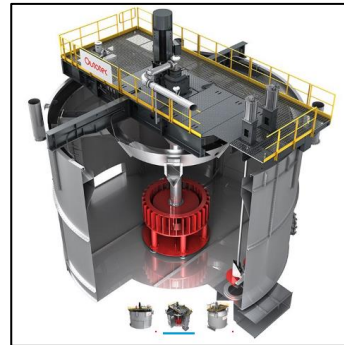


Figura 1.15: Celda Mecánica de 600 m³ (Outotec, 2017).

1.5 Trazadores Radioactivos

Con el propósito de estudiar el comportamiento hidrodinámico de las celdas de flotación de gran tamaño, se ha utilizado la técnica de trazado radiactivo para medir las siguientes variables del proceso de flotación (Yianatos & Díaz, 2011):

- Distribución del tiempo de residencia del líquido, sólido y gas en celdas mecánicas y en celdas neumáticas.
- Régimen de mezcla.
- Tiempo medio de residencia del líquido, de sólidos flotables y no flotables en la espuma.
- Medición directa del arrastre de ganga.
- Estimación del caudal de recirculación en una celda de flotación.
- Tiempo de mezcla y circulación interna de la pulpa en celdas industriales auto-aireadas.
- Distribución de flujo entre líneas de flotación.

En un sistema multifásico (sólido, líquido y gas) con segregación, la estimación del tiempo medio de residencia de cada fase se encuentra relacionado con el volumen efectivo ocupado por cada una de las fases y éste varía según las condiciones de operación del proceso de flotación.

Para evaluar el tiempo de residencia efectivo del líquido y del sólido en celdas de flotación se ha utilizado el método de respuesta impulso, que consiste en introducir una pequeña cantidad de trazador (ingreso instantáneo) en el sistema, donde se registra una respuesta transiente (concentración del trazador). Esta respuesta es útil para la caracterización hidrodinámica del proceso de flotación, como también para estudios de sistemas de control y de modelos dinámicos.

La técnica de trazadores radioactivos permite la detección no invasiva del trazador, además de ser un método adaptable a diferentes tipos de equipos (Goodall & O'Connor, 1991). El procedimiento consiste en seleccionar un trazador líquido o sólido que permita adquirir los datos en línea. La forma en que el trazador es inyectado en la alimentación es crítica para generar una señal de pulso (más cerca del impulso).

Yianatos & Díaz (2011), realizaron mediciones del tiempo de respuesta del trazador radiactivo en línea, utilizando sensores no invasivos, situados en diferentes puntos de la celda o en la descarga de la celda. La actividad (cps) se midió con la ayuda de un sensor de cristal de 1"x1.5", permitiendo la incorporación simultánea de datos de hasta 12 puntos de control, con un periodo mínimo de 50 milisegundos. Se utilizó el Br-82 en solución como trazador líquido y ganga irradiada como trazador sólido, distribuido en tres clases de tamaño (grueso: +150 μm ; intermedio: -150 +45 μm ; fino:-45 μm); con el fin de evaluar el transporte de sólidos y la segregación en celdas mecánicas.

Las mediciones desarrolladas en celdas de flotación de diferentes tamaños han permitido evaluar propiedades como: régimen de mezcla, tiempo de mezcla, tiempo medio de residencia del líquido y sólido en la espuma y el arrastre de mineral.

1.5.1 Régimen de Mezcla

Las características de mezcla de los equipos de flotación industrial pueden evaluarse a partir de la distribución de tiempo de residencia, que se obtiene mediante el uso de la técnica de trazado radiactivo. La Figura 1.16 muestra la distribución de tiempo de residencia (DTR) para sólidos finos (-45 μm), en la primera celda de un banco rougher, compuesto por siete celdas mecánicas en serie de 130 m³ en minera El Teniente, Codelco-Chile. Estos resultados muestran que las celdas de flotación industriales auto-aireadas no operan como un mezclador perfecto. Por lo tanto, las celdas de flotación se disponen en filas de 5 -10 celdas en serie, para compensar el cortocircuito de la pulpa.

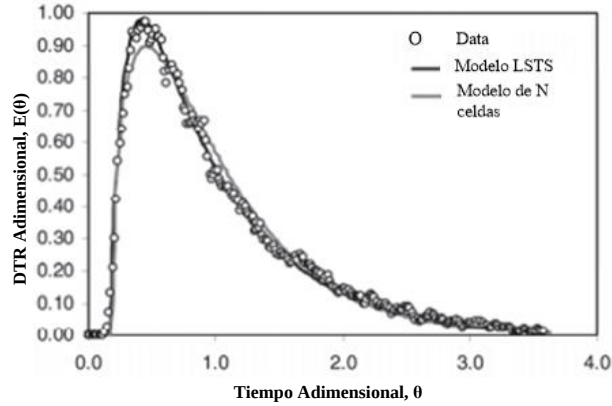


Figura 1.16: DTR de sólidos finos no flotables en la primera celda de un banco rougher (Yianatos et al, 2008b)

En la Figura 1.17 se muestra la DTR del líquido en celdas mecánicas de aire forzado de capacidad de 160 m³ y 300 m³, en función del tiempo adimensional, para una comparación del régimen de mezcla. Se puede observar que, a pesar de la diferencia de tamaño que existe entre ambos equipos, la distribución del tiempo de residencia se comporta de forma similar.

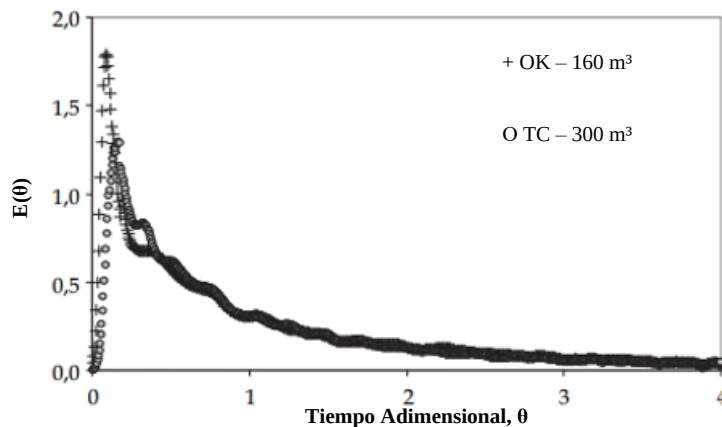


Figura 1.17: Comparación de DTR del líquido en celdas mecánicas de aire forzado de 160 y 300 m³. (Morales et al, 2009).

1.5.2 Tiempo medio de residencia del líquido y sólido en la espuma.

La espuma desempeña un rol fundamental en el proceso de flotación, ya que reduce el arrastre de material no flotable al concentrado. Por lo tanto, permite aumentar la ley de concentrado debido al drenaje de partículas valiosas y no valiosas arrastradas que retornan a la pulpa. Los parámetros que afectan la estabilidad de la espuma son los tiempos medios de residencia de sólido, líquido y gas presentes en la espuma. Las celdas mecánicas de flotación de gran tamaño, mayor a 100 m³, poseen un “*frothcrowder*”, cono invertido concéntrico localizado en la parte superior de la celda, que acelera la descarga del concentrado hacia el rebalse. Además, algunas celdas de flotación poseen rebalses radiales internos (Figura 1.18) que disminuyen la distancia horizontal del transporte de espuma, mejorando la recuperación de aire, como se ha mencionado en el punto 1.3.2.

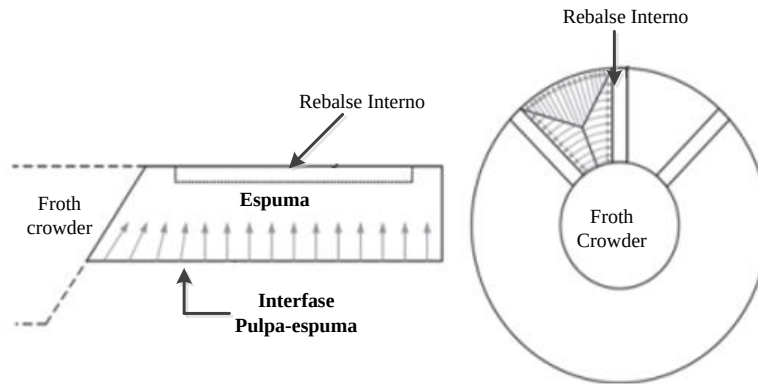


Figura 1.18: Corte y vista superior del transporte de espuma en una celda de flotación de gran tamaño (Yianatos et al, 2008a).

El tiempo medio de residencia del líquido y sólido en la espuma se evaluó a partir de mediciones realizadas en celdas de flotación autoaireadas de 130 m³ (Yianatos et al., 2008). Para este propósito se utilizó trazado líquido y sólido (partículas de mineral flotable y no flotable), los cuales se inyectaron en la alimentación de la celda de flotación mostrada en la Figura 1.19, esto permitió que el trazador circulara primero a través del rotor y se distribuyera sobre el área de sección transversal, antes de ingresar a la espuma (Yianatos & Díaz, 2011). Cada respuesta se midió en línea a 10 cm por debajo de la interfase pulpa-espuma (sensor S2: señal de entrada) y en la descarga del concentrado (sensor S1: señal de salida). Los sensores S3 y S4 se instalaron a 65 y a 120 cm respectivamente, por debajo de la interfase pulpa-espuma, para verificar el transporte axial del trazador a lo largo de la zona inactiva de la espuma. Se observó una condición de mezclado homogéneo debajo de la interfase pulpa-espuma. Por lo tanto, el sensor S2 fue seleccionado para representar la composición de entrada de la espuma.

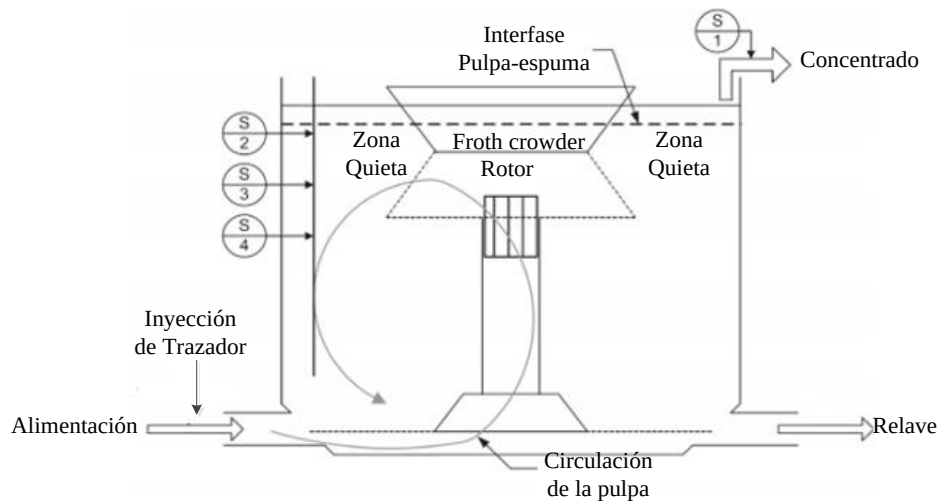


Figura 1.19: Ubicación de los sensores en celda de flotación de 130 m³ (Yianatos et al., 2008a).

La Figura 1.20 ilustra las señales de entrada (sensor S2) y salida (sensor S1) para el sólido no flotable que ingresa a la espuma a nivel de la interfase pulpa-espuma y que es transportado hacia el concentrado. Se realizaron mediciones similares para el líquido y mineral flotable, así como para el mineral no flotable en tres clases de tamaño. Para la flotación rougher, el tiempo medio de residencia del sólido no flotable en la espuma fue entre 9 y 12 s, mientras que los tiempos de residencia del líquido y sólido flotable en la espuma fueron de 21 s y 24 s, respectivamente.

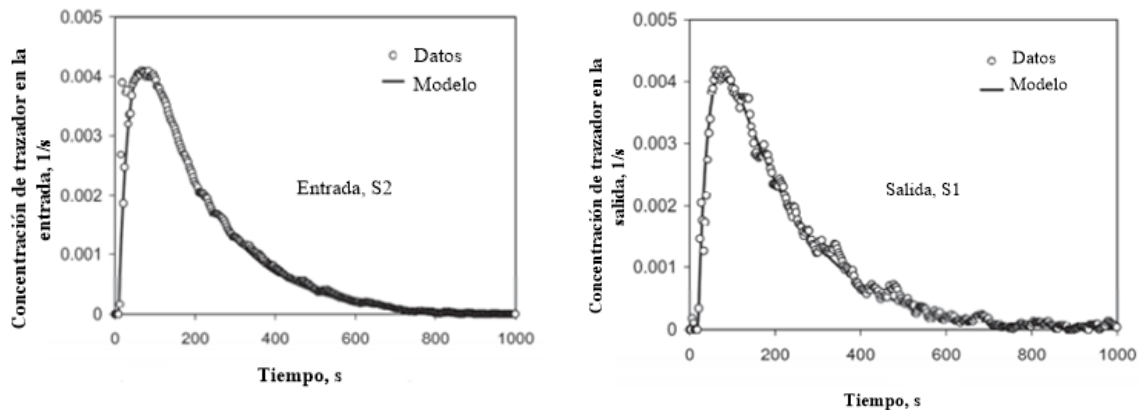


Figura 1.20: Señal de entrada y salida de la espuma para sólidos no flotables (Yianatos et al., 2008a).

Los resultados experimentales mostraron que las partículas de mineral que ingresan a la espuma, ya sea colectadas por las burbujas o arrastradas, tienen un tiempo de residencia mínimo (aproximadamente 10 a 12 s) similar al tiempo medio de transporte del gas en la espuma.

1.5.3 Arrastre

En el trabajo de (Yianatos et al., 2008c), se evaluó la recuperación de líquido y sólido por arrastre, mediante la medición directa de la fracción de líquido y sólido presentes en el concentrado, en una celda de flotación mecánica de 130 m³. El arrastre de líquido y sólido, por clases de tamaño, se midió con la técnica de trazado radiactivo.

Al igual que en los puntos 1.5.1 y 1.5.2, el método de medición desarrollado, consistió en introducir el trazador en la alimentación de la celda de flotación de forma instantánea (como un impulso). La respuesta entregada por los sensores ubicados en el concentrado y descarga de la celda, se midió en línea.

Durante las mediciones se tomaron muestras periódicas de la corriente de concentrado y de relave cada cuatro tiempos de residencia, lo cual permitió la cuantificación de la masa de trazador que circula por ambos flujos.

Los resultados de este trabajo confirmaron que el arrastre de sólidos en la espuma depende directamente del tamaño de partícula y del factor de arrastre ($EF = \text{recuperación de sólido} / \text{recuperación de agua}$), similar al reportado para celdas de flotación de menor tamaño (Zheng et al., 2006).

El uso de radioisótopos ha demostrado ser una herramienta útil para estudiar el comportamiento hidrodinámico de los equipos de flotación de gran tamaño. El tiempo de residencia promedio en las zonas de pulpa y espuma se evaluó a partir de mediciones de DTR, utilizando trazadores radiactivos líquido, sólido y de gaseoso. Los parámetros relevantes como el régimen de mezcla, el tiempo de mezclado, la distribución de flujo en filas de flotación paralelas, la ganga que se transporta hacia el concentrado y el arrastre de gas hacia el relave, además de la segregación de partículas; se han evaluado utilizando sensores no invasivos para la operación del proceso de flotación. Esta información es fundamental para la operación, el control y la optimización de las celdas de flotación de gran tamaño (Yianatos & Díaz, 2011).

Capítulo 2 Procedimiento Experimental

2.1 Descripción de la Celda de Flotación Bi-dimensional

Para el trabajo experimental, se utilizó una celda de flotación bi-dimensional, construida de acrílico transparente, con placas de 140 x 140 cm, con un espesor de 1 cm y un ancho de 15 cm. La celda piloto representa la sección radial superior de una celda de flotación industrial, de 130 m³. Este equipo comprende horizontalmente, desde el acelerador de descarga de espuma (*frothcrowder*) hasta el rebalse (labio de descarga), y de forma vertical, la zona de colección y espuma. La región que representa esta celda con respecto a una celda de flotación industrial se muestra en la Figura 2.1 mediante líneas segmentadas.

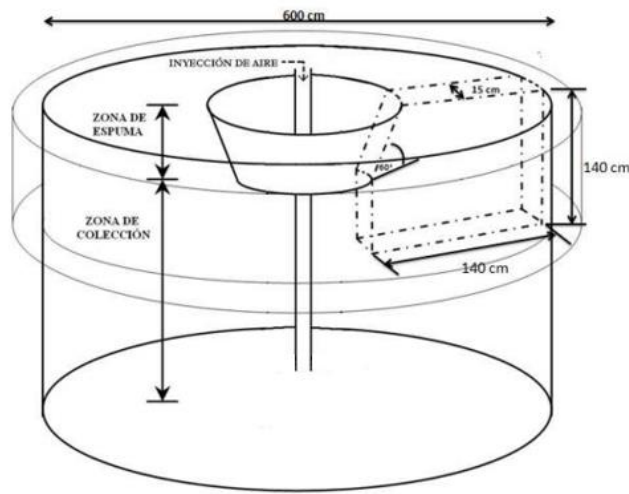


Figura 2.1: Celda Bidimensional en línea segmentada, en celda industrial autoaspirante de 130 m³ (Leiva, 2012).

El criterio para determinar las dimensiones de la celda bi-dimensional fue en base a una celda de tamaño real WEMCO model “Smart Cell 130” de 130 m³.

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de la celda bidimensional, junto con la instalación de la cámara Visiofroth (Metso Minerals, 2006), ubicada en la parte superior del equipo, a 40 cm por encima de la espuma y a 10 cm del borde de descarga, de 10 cm. La instalación incluye dos bombas peristálticas Masterflex y dos estanques, de 50 L y 200 L, los que tienen por objetivo mantener una cantidad relativamente constante de agua en el interior de la celda. De esta forma es posible lograr un estado estacionario en el sistema y operar en circuito semi-batch con compensación del líquido que descarga al concentrado.

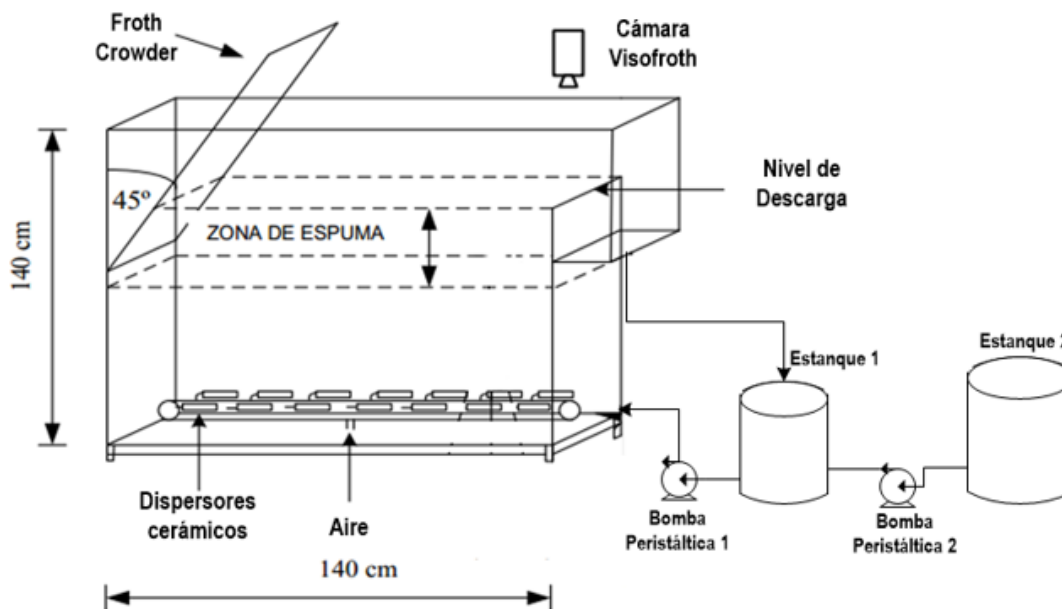


Figura 2.2: Instalación de la celda de flotación bidimensional prototipo.

Adicionalmente, la celda posee un acelerador de descarga de espuma (*frothcrowder*), cuyo ángulo (α) puede ser modificado para observar su efecto sobre la velocidad de descarga de espuma. Además, se cuenta con un manómetro, un regulador de presión y un flujómetro másico, que se utilizaron para regular y medir el flujo de aire que ingresa a la celda de flotación. Las burbujas fueron generadas a través de 24 *spargers* porosos de 50 cm² de área cada uno, distribuidos uniformemente en el fondo del equipo.

Respecto al control del flujo de aire, éste se logra con un flujómetro y una válvula de control, la que recibe una señal del transductor IP y, como valor de *Set Point*, la velocidad superficial de aire (1.52 cm/s), que se necesita para las pruebas.

2.2 Descripción de los Equipos

En base a la instalación mostrada en la Figura 2.2, los equipos utilizados para el desarrollo de esta experiencia fueron:

2.2.1 Cámara Visiofroth

Visiofroth es un sistema de adquisición y análisis de imágenes en tiempo real que permite obtener propiedades de las espumas de flotación (Metso Minerals, 2006) y, normalmente, es instalado sobre la descarga de las celdas de flotación industriales. La versión de Visiofroth, utilizada en este trabajo, posee iluminación LED, lo que permite iluminar la superficie de la espuma, además de la transmisión de las imágenes vía fibra óptica a una unidad de procesamiento (computador).

La central de procesamiento utiliza una secuencia para calcular parámetros específicos de la espuma tales como: velocidad de descarga de la espuma, distribución de tamaño de burbujas en el tope de la espuma, índices de color y brillo y tasa de colapso de las burbujas.

La velocidad de espuma es medida en ambas direcciones, X e Y, además se informa la velocidad resultante sobre una región predefinida en la superficie de la espuma. Para calcular el desplazamiento entre imágenes consecutivas se utiliza la Transformada de Fourier Modificada. El desplazamiento en píxeles entre las imágenes, la tasa de muestreo y las dimensiones del campo de visión permiten obtener una estimación de la velocidad. El resultado entregado es un promedio calculado sobre un ciclo típico de 10 segundos, donde las imágenes se adquieren a una tasa de 30 cuadros por segundo.

2.2.2 Bombas Peristálticas

Ambas bombas mostradas en la Figura 2.2 son peristálticas con motor Masterflex (ColeParmer Instrument, 2017), que operan con una frecuencia que varía entre 45 a 100 rpm, donde el flujo depende de la frecuencia (rpm) del motor y del tipo de cabezal. El rango en el que operan las bombas peristálticas oscila entre 0.3 a 4.3 L/min (Anexo A).

El objetivo de la bomba peristáltica es mantener relativamente constante el nivel al interior del estanque de recirculación, con el fin de regular el nivel de agua en el interior de la celda bidimensional.

2.2.3 Sensores

Para el desarrollo de las experiencias se utilizaron 10 sensores colimados para evaluar la respuesta del trazador en la celda bidimensional, cuatro de ellos se ubicaron en la zona de espuma, cuatro en la zona de colección y dos en la zona de descarga de la celda, tal como muestra la Figura 2.3. Estos sensores permitieron obtener un registro en línea del comportamiento que tiene el trazador al interior de la celda, lo cual permitió, posteriormente, caracterizar la zona de espuma.

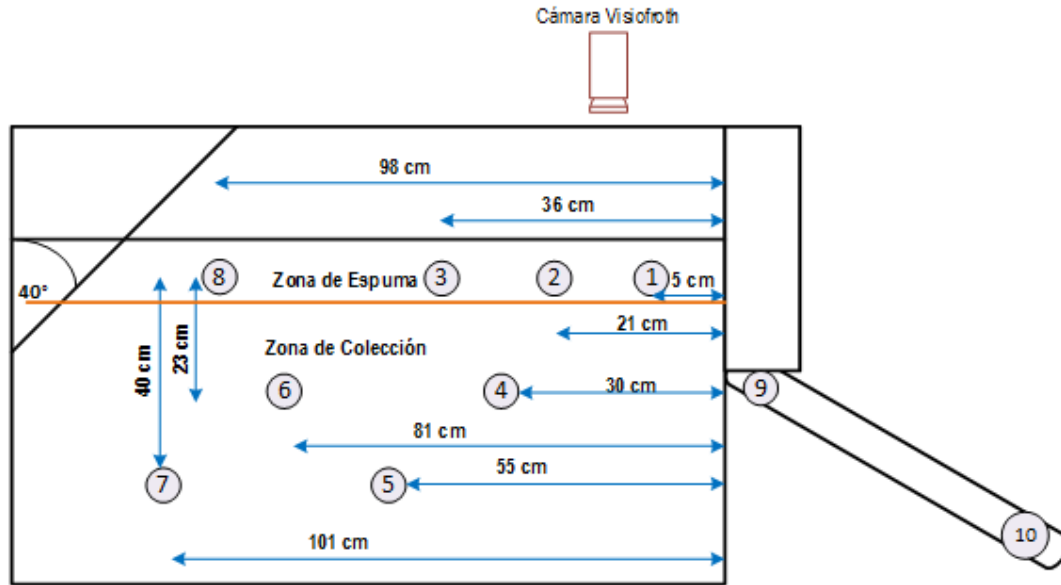


Figura 2.3: Ubicación de sensores en celda bi-dimensional.

Los sensores se colimaron especialmente para estas pruebas de laboratorio, utilizando una ventana vertical estrecha de 2 x 0,2 cm, con un área de 0,4 cm², que representa un 2% del área ocupada habitualmente por la sección circular colimada de 5,08 cm de diámetro y 20,3 cm² de área de cada sensor. Esta disposición permitió la adquisición de datos con una mayor focalización, ya que permite observar una zona específica de la celda, con un menor ángulo, lo que no se logra sin el segundo colimado.

Capítulo 3 Capítulo 3: Diseño Experimental

En este trabajo se estudió y caracterizó el transporte de espuma, utilizando la técnica de trazado radiactivo, además se analizó: el drenaje en la zona de espuma, el tiempo de mezcla en la zona de colección, la velocidad de descarga de espuma y la velocidad del líquido en la zona espuma. Estos parámetros son fundamentales para describir el comportamiento de la zona de espuma y su impacto en el rendimiento de los equipos de flotación.

Para simular las condiciones de baja estabilidad de espuma que presentan las últimas celdas de flotación industrial, se trabajó en un sistema de dos fases (líquido y gas), con espumante y manteniendo un estado pseudoestacionario.

El trabajo experimental se desarrolló en una celda bidimensional, a escala piloto, ubicada en el Laboratorio de Procesos de la UTFSM, acondicionada y preparada para utilizar trazador líquido radiactivo, I^{131} (NaI en solución). Este trazador es detectado por 10 sensores colimados no invasivos e instalados en distintos puntos por fuera de la celda piloto (Figura 2.3) y en la descarga del sistema. Además, se cuenta con un control del flujo de aire, dos bombas peristálticas y dos estanques de 50 y 200 L, que ayudaron a mantener el nivel de líquido constante al interior de la celda (estado estacionario). Adicionalmente, se utilizó una cámara Visiofroth para medir la velocidad de espuma.

El plan de trabajo consistió en nueve experiencias programadas para las condiciones de operación presentadas en la Tabla 3.1, utilizando como base los antecedentes presentados en el Capítulo 1.

Tabla 3.1: Condiciones de Operación para las nueve experiencias

Condiciones de Operación		
Flujo de Aire	L/min	198
Velocidad Superficial de Gas, J_g	cm/s	1.52
Concentración de aire	%	9 - 10
Cantidad de espumante	ppm	10
Profundidad de espuma	cm	4 - 6
Ángulo <i>frothcrowder</i>	°	40 - 50
Flujo de descarga	L/min	2.3 – 3.8

Las pruebas se realizaron inyectando 20 μ L de trazador a 4 distancias diferentes con respecto al labio de descarga (5, 21, 36 y 98 cm) y a dos niveles de profundidad (superficie e interfase). En las últimas dos experiencias (8 y 9), se varió el ángulo *frothcrowder* de 40° a 50°, para determinar el efecto que tiene esta variable en la velocidad del líquido en la espuma. A continuación en la Tabla 3.2 se muestra el diseño experimental utilizado para este estudio.

Tabla 3.2: Diseño de Experimento.

Profundidad de inyección	Distancia de inyección respecto al labio de descarga, cm	Ángulo <i>Frothcrowder</i>
A 5 mm de la superficie de la espuma	5	40°
	21	
A 5 mm de la interfase pulpa-espuma	36	50°
	98	

3.1 Tratamiento de señales

Los datos originales (Anexo C: Excel, USMEsp01Mar17MX_Brute), corresponden a los valores detectados por los sensores cada 0.05 s. Por lo tanto, existe un ruido importante que perturba la observación del comportamiento de las señales para el análisis de los datos, como se muestra en la Figura 3.1. Por esta razón, se filtraron los datos medidos en cada una de las experiencias con la herramienta “Tabla Dinámica de Excel”, lo que permite obtener un promedio (media móvil) de las detecciones entregadas por los sensores a intervalos de un segundo. Con este método se suaviza la curva mostrada en la Figura 3.1, obteniéndose como resultado las curvas mostradas en la Figura 3.2.

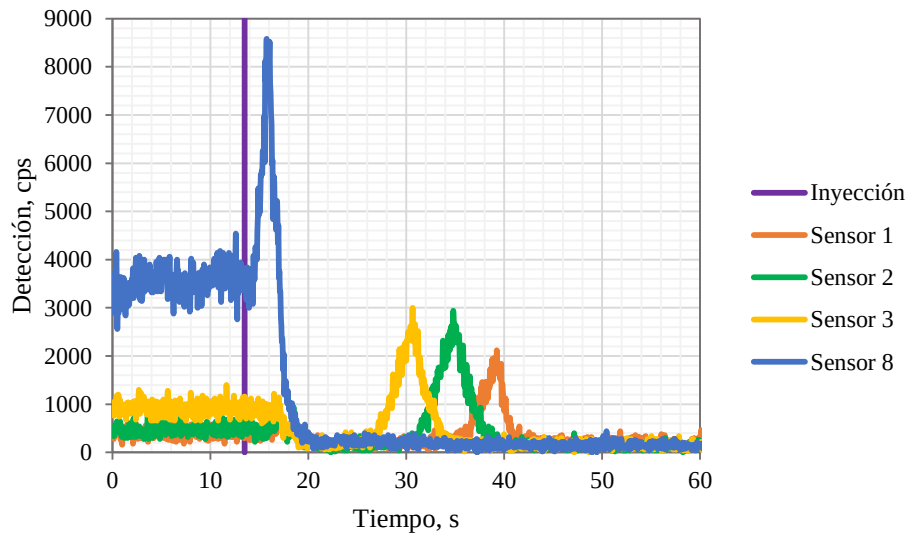


Figura 3.1: Señal original detectada por sensores 1, 2, 3 y 8.

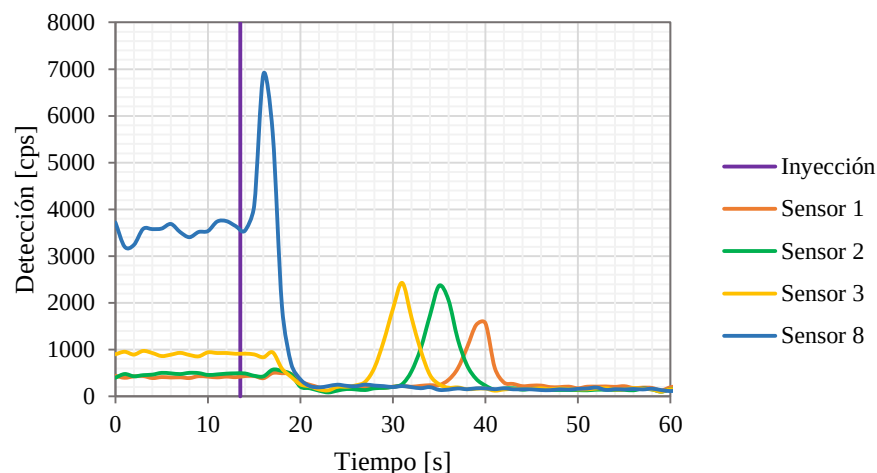


Figura 3.2: Señal detectada por sensores 1, 2, 3 y 8 después del primer filtro.

A continuación, se realizó un segundo filtro (Anexo D: Excel, USMEsp01Mar17MX_CFiltro), que permite eliminar la perturbación que existe antes de cada *peak* y que se aprecia en la Figura 3.2, donde la detección comienza con un valor muy superior a la detección final. Para esto, se tomó como referencia el lado derecho de la curva y se reemplazó en el lado izquierdo (por simetría). Esta metodología se pudo aplicar, ya que la perturbación que se observa antes del *peak* se debe a la presencia del trazador cerca de los sensores, antes de la inyección y no al comportamiento del trazador al interior del equipo. Además, se tomó como referencia el fondo final que se presenta en cada una de las experiencias y fue considerado como la señal de inicio de la siguiente experiencia. En la Figura 3.3 se muestra el resultado final del tratamiento de datos, y que se utilizará para el posterior análisis.

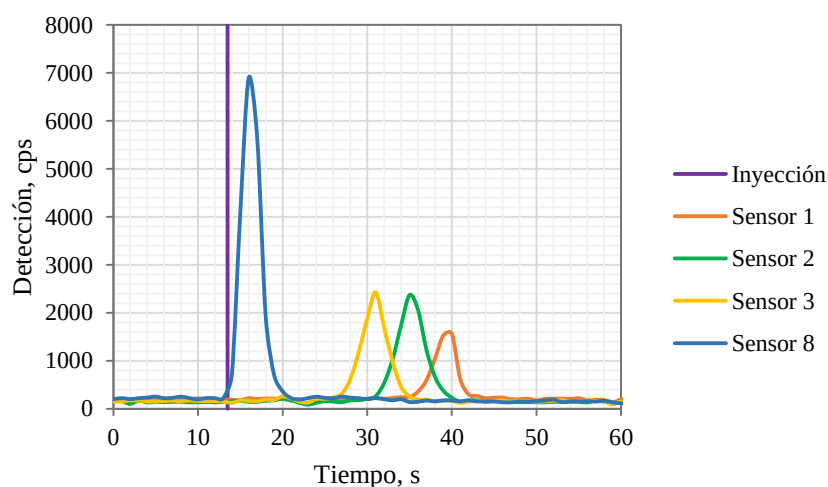


Figura 3.3: Señal detectada por sensores 1, 2, 3 y 8 con ambos filtros.

3.2 Tratamiento de Datos Cámara Visiofroth

Los datos de velocidad de descarga de la espuma (Anexo E: Excel, Datos Originales_Visiofroth), medidos en un período de 3 horas, entregados por la cámara Visiofroth, fueron divididos por experiencia, de acuerdo a la hora exacta en la cual se registraron. Luego, por cada experiencia se realizó un primer filtro, que consistió en verificar la hora de inicio de la prueba y el tiempo que transcurre durante la medición. Todos aquellos puntos que se encuentran fuera de este horario, fueron eliminados, obteniéndose un promedio (media móvil) de los datos restantes, además de la desviación estándar correspondiente. (Anexo F: Excel, Velocidad_Visiofroth)

3.3 Procedimiento Experimental

En este trabajo se establecieron aquellas variables (condiciones de operación) del sistema que permanecieron constante durante las nueve experiencias realizadas en la celda de flotación bi-dimensional, las cuales se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Condiciones de Operación.

Condiciones de Operación		
Velocidad superficial del aire, Jg	cm/s	1.52
Concentración de aire	%	9 - 10
Cantidad de espumante (Oreprep 507)	ppm	10

De acuerdo al diseño de experimento presentado en la Tabla 3.2, el trabajo experimental consistió en nueve pruebas. En las primeras cuatro experiencias, se inyectó el trazador en la superficie de la espuma a distancias de 5, 21, 36 y 98 cm. En las pruebas 5, 6, y 7, se inyectó el trazador en la interfase pulpa/espuma, a tres diferentes distancias respecto al rebalse (5, 21 y 36 cm). Por último, en las pruebas 8 y 9 se modificó el ángulo *frothcrowder* y el trazador líquido se inyectó en la superficie y en la interfase pulpa/espuma, a una misma distancia respecto al rebalse (36 cm).

A continuación en la Tabla 3.4 se presentan las condiciones de operación experimentales para cada una de las nueve pruebas realizadas en la celda de flotación piloto.

Tabla 3.4: Condiciones de Operación de cada experiencia.

Experiencia	Inyección	Distancia respecto al rebalse	Profundidad de espuma	Ángulo Frothcrowder	Velocidad Visiofroth	Flujo de descarga
		cm	cm	°	cm/s	L/min
1	Tope espuma	5	4 ± 1	40	5.17 ± 0.28	2.88 ± 0.59
2	Tope espuma	21	4 ± 1	40	5.52 ± 0.34	3.22 ± 0.1
3	Tope espuma	36	4 ± 1.5	40	5.57 ± 0.27	3.32 ± 0.2
4	Tope espuma	98	4 ± 0.5	40	3.42 ± 0.33	2.35 ± 0.37
5	Interfase	5	4 ± 1.5	40	5.24 ± 0.58	2.98 ± 0.08
6	Interfase	21	4 ± 1	40	3.64 ± 0.25	2.43 ± 0.02
7	Interfase	36	4 ± 1	40	3.83 ± 0.55	2.54 ± 0.03
8	Tope espuma	36	5 ± 1	50	7.12 ± 0.52	3.81 ± 0.23
9	Interfase	36	5 ± 1	50	7.83 ± 0.27	3.90 ± 0.22

Capítulo 4 Resultados, Análisis y Discusión de Resultados

En esta sección se analizaron los resultados de cada experiencia realizada, separando los sensores según su ubicación en la celda bidimensional (Figura 2.3). Al respecto, se consideran dos zonas: Zona de Espuma y Zona de Colección. La primera, está compuesta por los sensores 1, 2, 3 y 8, y la segunda por los sensores 4, 5, 6 y 7.

A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes para cada una de las experiencias, las cuales fueron divididas según la posición de inyección del trazador (superficie o interfase) y de acuerdo al ángulo *frothcrowder* que se escogió.

4.1 Sensores en Zona de Espuma

4.1.1 Inyección en la superficie de la espuma

Experiencia 1

Para la primera experiencia, el trazador se inyectó en la superficie de la espuma, a una distancia de 5 cm con respecto al rebalse (sensor 1), por lo que los sensores 2, 3 y 8, no detectaron *peaks* significativos, dado que el trazador salió por completo del sistema en la corriente de concentrado (Figura 4.1). Cabe mencionar, que la medición de esta experiencia comenzó inmediatamente después de la inyección del trazador, por esta razón, la curva de la Figura 4.1 se inicia a tiempo 0 s.

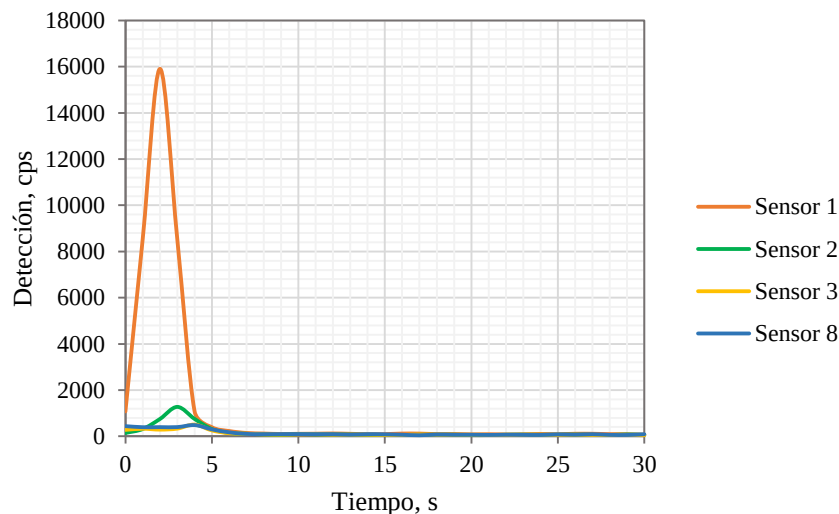


Figura 4.1: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 1

Experiencia 2

En esta experiencia, la inyección se realiza en la superficie de la espuma, a 21 cm del labio de descarga (sensor 2). Por lo tanto, el sensor número 2 es el que presenta el mayor *peak* (13.361 cps), seguido por el sensor 1, que se encuentra a 16 cm de éste (5 cm del labio de descarga). En cambio, los sensores 3 y 8 registran señales no significativas, ya que están ubicados aguas arriba del sensor 2, a 15 cm y 52 cm, respectivamente.

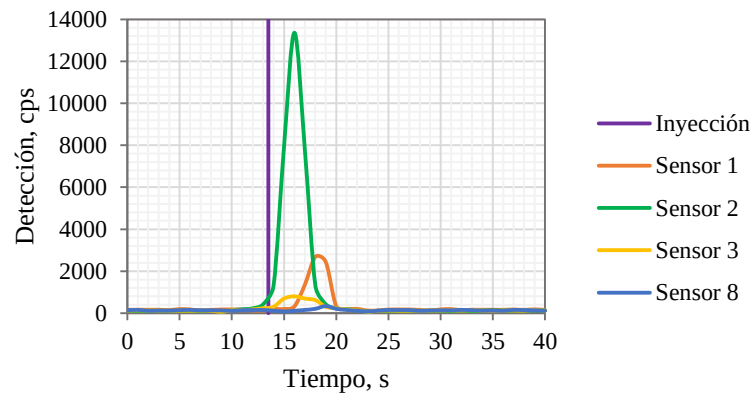


Figura 4.2: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 2.

Experiencia 3

En la Figura 4.3 se presenta la respuesta de los sensores ubicados en la zona de espuma, para la inyección de trazador a 36 cm del labio de descarga (sensor 3). Como se esperaba, el *peak* máximo fue detectado por el sensor 3 y los sensores 2 y 1, ubicados a 15 cm y 31 cm del punto de inyección, respectivamente. Las señales de estos sensores presentaron un retardo consistente con respecto a la señal del sensor 3. Además, los *peaks* registrados por el sensor 1 y 2 fueron menos significativos que para el sensor 3.

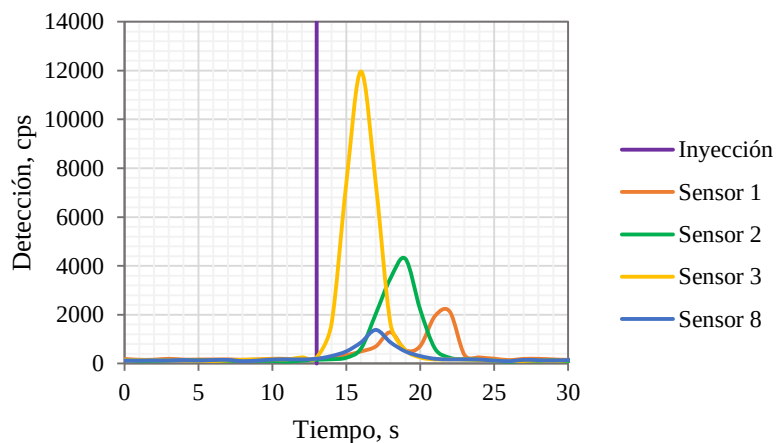


Figura 4.3: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 3.

Experiencia 4

Para esta experiencia, la inyección se realizó en la superficie de espuma, específicamente, en el punto donde se ubica el sensor 8, a 98 cm del rebalse. La Figura 4.4 presenta los *peaks* detectados en la zona de espuma. El sensor 8, presentó el mayor *peak* (6.895 cps), mientras que los otros tres sensores mostraron *peaks* más pequeños y desfasados con respecto al *peak* máximo.

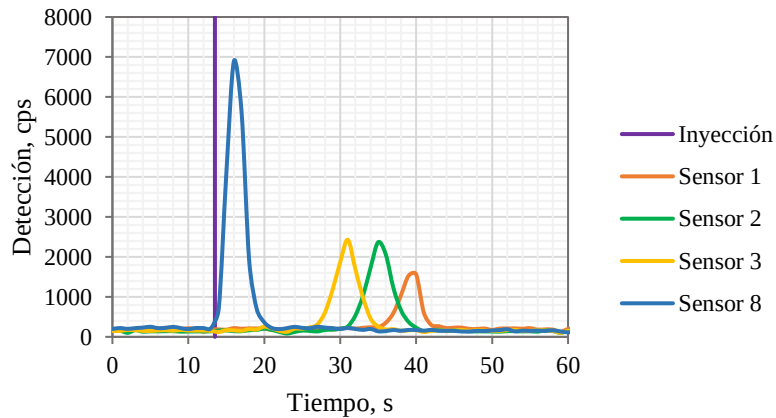


Figura 4.4: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 4.

4.1.2 Inyección en la interfase pulpa/espuma

Experiencia 5

En esta experiencia, la inyección de trazador se realizó en el punto donde se ubica el sensor 1, a 5 cm del rebalse y en la interfase pulpa/espuma. En la Figura 4.5 se muestra que el *peak* registrado por el sensor 1 es significativamente superior al detectado por los otros sensores en la espuma (2, 3 y 8). Por lo tanto, el trazador probablemente fue transportado a la zona de colección por drenaje y otra parte fue transportada a la salida de la corriente de concentrado.

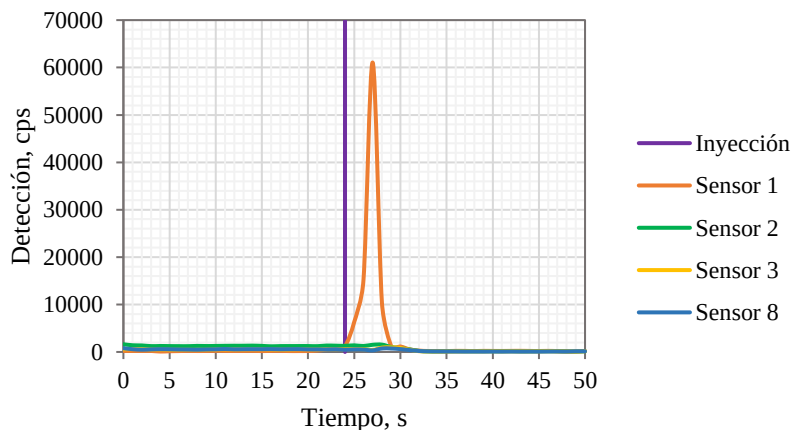


Figura 4.5: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 5.

Experiencia 6

En la experiencia 6, la inyección del trazador se realizó a 21 cm del labio del rebalse (sensor 2), sobre la interfase pulpa/espuma. En la Figura 4.6 se observa que el sensor 2 presenta un *peak* significativamente mayor que los *peaks* registrados por los sensores 1, 3 y 8. Esto confirma un alto drenaje del trazador hacia la zona de colección.

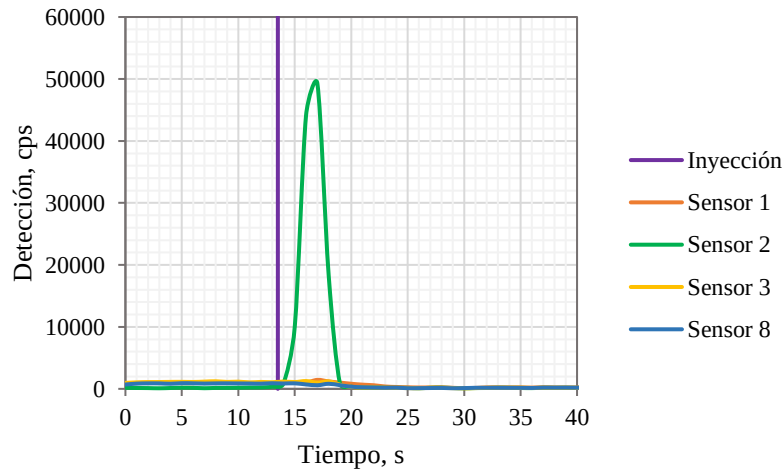


Figura 4.6: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 6.

Experiencia 7

En la experiencia 7, el *peak* registrado por el sensor 3 (punto de inyección en la interfase, a 36 cm del rebalse) fue significativamente mayor (35.812 cps) a los *peaks* detectados por los otros sensores ubicados en la zona de espuma (Figura 4.7). Esto indica un alto drenaje de trazado hacia la zona de colección y en consecuencia, un bajo arrastre hacia la corriente de concentrado.

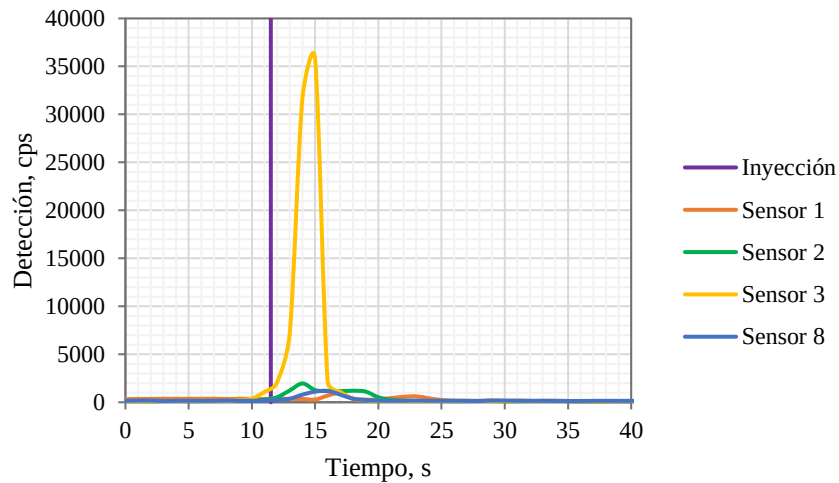


Figura 4.7: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 7.

4.1.3 Efecto de Ángulo Frothcrowder

Experiencia 8

En la Figura 4.8, se muestran las señales detectadas por los cuatro sensores ubicados en la zona de espuma para la inyección de trazador en la superficie de la espuma, a 36 cm del labio de descarga y con un ángulo *frothcrowder* de 50°. El *peak* máximo fue detectado por el sensor 3 (lugar de inyección) y los sensores 2 y 1 ubicados a 15 cm y 16 cm del punto de inyección, presentan un retardo consistente. En cambio la señal detectada por el sensor 8 no presentó un retardo, sino que la respuesta fue al mismo tiempo que la presentada por el sensor 3. Cabe destacar que el ángulo *frothcrowder* utilizado para esta experiencia fue mayor que en las experiencias anteriores (50°). Por lo tanto, existió una disminución en el tiempo de transporte del trazador en la espuma y aumentó la velocidad de descarga de la espuma.

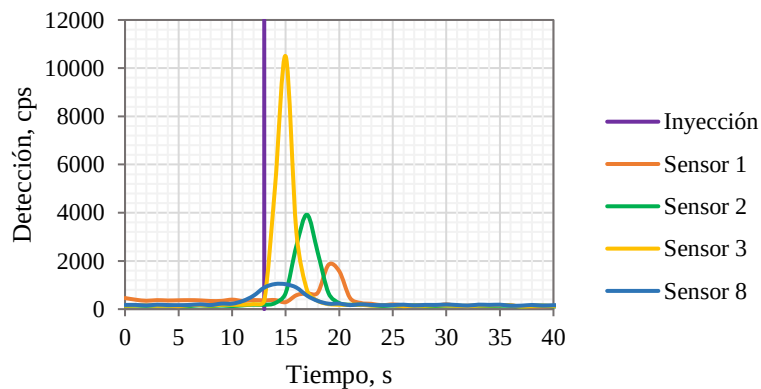


Figura 4.8: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 8.

Experiencia 9

En la experiencia nueve, la inyección también se realizó en el punto donde se ubica el sensor 3, pero en la interfase pulpa/espuma. Como se aprecia en la Figura 4.9, el *peak* presentado por el sensor 3 (37.556 cps) es significativamente mayor al registrado por los sensores 2, 1 y 8, ubicados aguas abajo del punto de inyección y aguas arriba, respectivamente. Por lo tanto, a una distancia de 36 cm del labio de descarga, la mayor cantidad de trazador drena hacia la zona de colección y no permanece en la espuma para ser transportado hacia el concentrado.

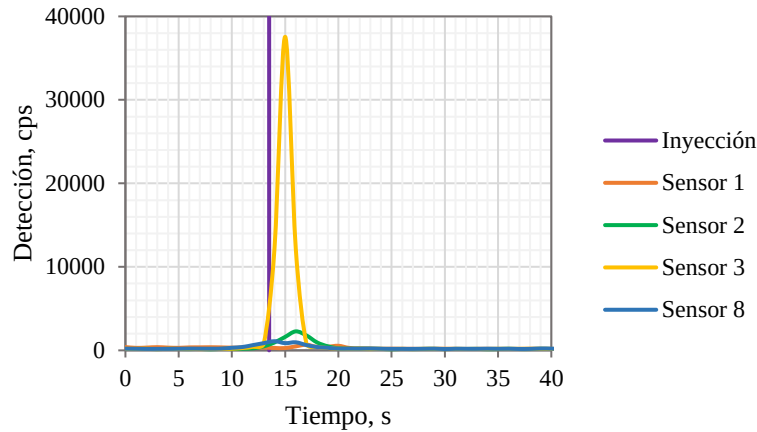


Figura 4.9: Señal detectada por sensores ubicados en zona de espuma en Experiencia 9.

4.2 Sensores en Zona de Colección

En esta sección se analizarán los resultados de las señales entregadas por los sensores 4, 5, 6 y 7, ubicados en la zona de colección. De esta forma, se podrá establecer el drenaje que existe hacia esta zona, cuando la inyección es realizada en la superficie de la espuma y en la interfase pulpa/espuma.

A continuación se presentan las conclusiones más relevantes para cada una de las experiencias.

4.2.1 Inyección en la superficie de la espuma

Experiencia 1

Al observar las señales de los sensores ubicados en la zona de colección (4, 5, 6 y 7), como se muestran en la Figura 4.10, se aprecia que las señales convergen a un mismo valor, después de 10 s de haber inyectado el trazador. Esto demuestra nuevamente, que el trazador inyectado en la superficie de la espuma, a una distancia de 5 cm del labio del rebalse, es transportado hacia la corriente de concentrado. Además, la Figura 4.10 muestra que el sistema se encuentra totalmente mezclado en la zona de colección y que la concentración después de cada inyección, posee una cinética lenta.

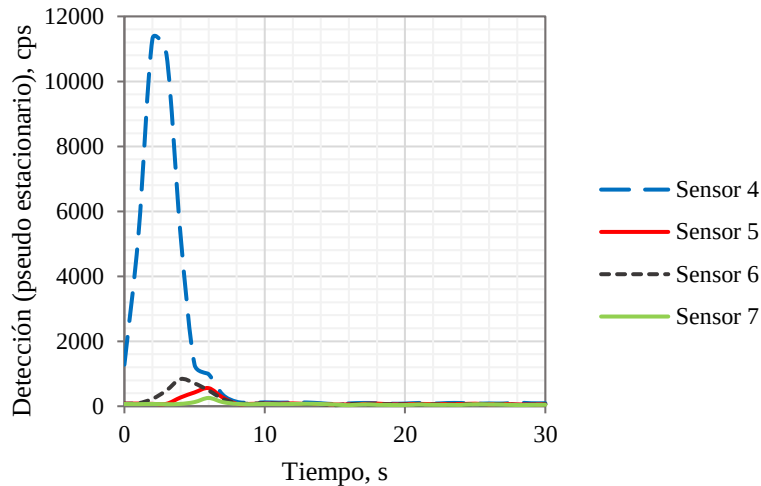


Figura 4.10: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 1.

De la Figura 4.10 se aprecia que los *peaks* registrados por los sensores 5, 6 y 7 no son significativos y rápidamente las señales llegan a un fondo menor a 100 cps. Además se puede observar que todas las señales poseen una tendencia parecida, pero difieren en el tamaño del *peak*, el que tiene relación con la posición en que se encuentran los sensores con respecto a la inyección realizada. Otro aspecto a destacar, es el corto tiempo en que las señales convergen hacia un mismo valor, que en este caso es de 10 s.

Experiencia 2

La Figura 4.11 muestra los sensores 4 a 7, donde se aprecia una diferencia importante entre las señales del sensor cuatro y las señales de los otros tres sensores (5, 6 y 7). Esto posee una directa relación con la ubicación de cada sensor en la celda bidimensional. El hecho de que la inyección se realizó a 21 cm del rebalse, ocasionó que una cantidad de trazador fuese drenado hacia la zona de colección y captado por el sensor 4.

Por otra parte, los sensores 5, 6 y 7 no muestran señales significativas, lo cual demuestra que sólo una pequeña cantidad de trazador es transportado hasta esta zona y que luego es arrastrado hacia la zona de espuma para ser descargado del sistema.

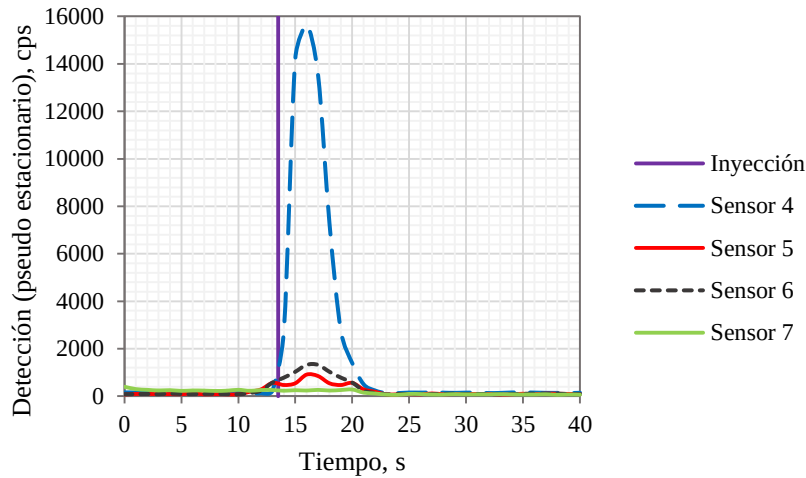


Figura 4.11: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 2.

Experiencia 3

En la Figura 4.12 se presentan las señales detectadas por los sensores ubicados en la zona de colección para la experiencia 3, donde la inyección se realizó a una distancia de 36 cm del rebalse.

Las señales registradas por los sensores son considerablemente mayores a las registradas en las experiencias 1 y 2, confirmando que una cantidad significativa de trazador fue drenado hacia la zona de colección y que fue detectado por aquellos sensores que se encuentran ubicados cerca del punto de inyección.

El sensor 4 presenta una diferencia de 10.000 cps con respecto a la medición anterior, al igual que los sensores 5, 6 y 7, donde el *peak* registrado es 5 veces mayor al presentado en los casos anteriores.

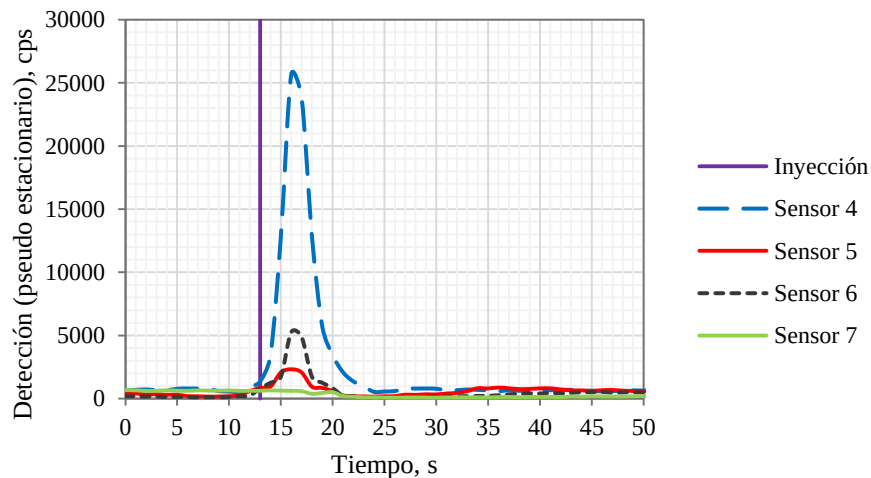


Figura 4.12: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 3.

A diferencia de las experiencias 1 y 2, los sensores 5, 6 y 7 muestran *peaks* de mayor significancia y el punto de convergencia (punto de mezcla) fue a un tiempo aproximado de 45 s, superior a los 25 s de la experiencia dos.

Experiencia 4

La Figura 4.13 muestra las señales obtenidas cuando la inyección del trazador fue realizada a 98 cm del rebalse. El sensor 6 detectó una mayor señal, a diferencia de lo observado en las experiencias 1, 2 y 3, donde el sensor con una detección mayor fue el sensor 4. Esta diferencia se debe a la ubicación del sensor 6 con respecto al 8 (lugar de inyección), que se encuentra más cercano que los otros sensores.

Respecto al tiempo que demoran las señales en converger a un mismo valor (tiempo de mezcla), éste se logra alrededor de los 100 s, con una detección de 1.800 cps, que es superior a los 100 cps y 500 cps registrados en experiencias anteriores.

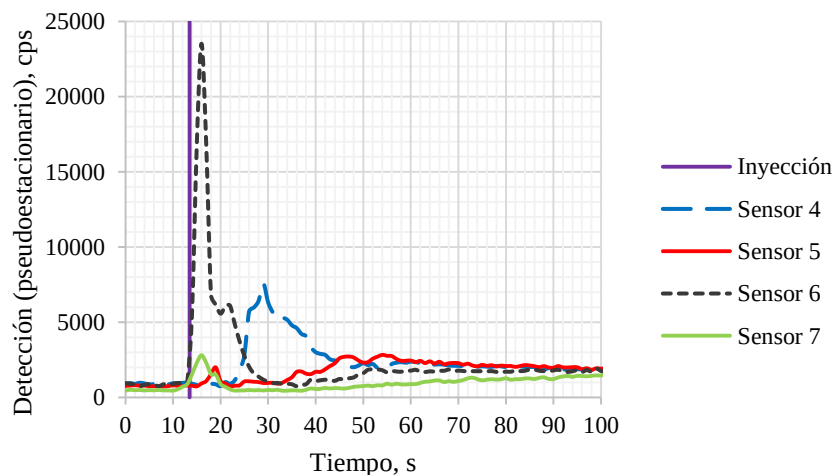


Figura 4.13: Señal detectada por sensores ubicados en la zona de colección en Experiencia 4.

4.2.2 Inyección en la interfase pulpa/espuma

Experiencia 5

La Figura 4.14 muestra que el sensor con la mayor detección fue el número 4, con una actividad de 16.000 cps. Este sensor se ubica a una distancia de 34 cm por debajo del sensor 1 (punto de inyección).

Las señales detectadas por los sensores 5, 6 y 7, se encuentran dentro del mismo orden de magnitud y no muestran señales significativas, demostrando que gran parte del trazador es transportado hacia la salida del sistema y no permanece en la zona de colección, aun cuando, la inyección fue cercana a la interfase pulpa/espuma.

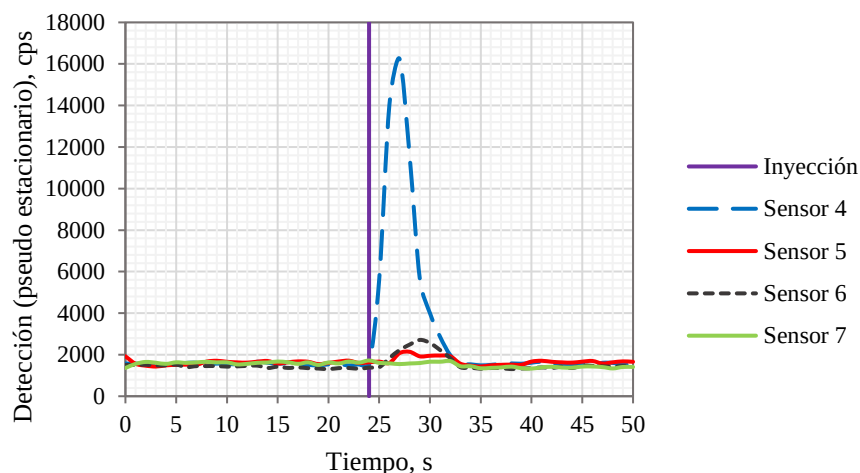


Figura 4.14: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección, para Experiencia 5.

El tiempo de mezcla registrado para la experiencia 5 fue de aproximadamente 45 s, al igual que para la experiencia 3.

Experiencia 6

En la Figura 4.15 se puede observar que el trazador inyectado cerca de la interfase, a 21 cm del rebalse, es drenado preferentemente hacia la zona de colección. Por otra parte, los cuatro sensores (4, 5, 6 y 7) convergen hacia una detección final de aproximadamente 5000 cps, lo cual implica que una cantidad considerable de trazador permanece uniforme en esta zona y será el fondo de la próxima experiencia. Por otra parte, el tiempo de mezcla registrado en la zona de colección fue de 100 s.

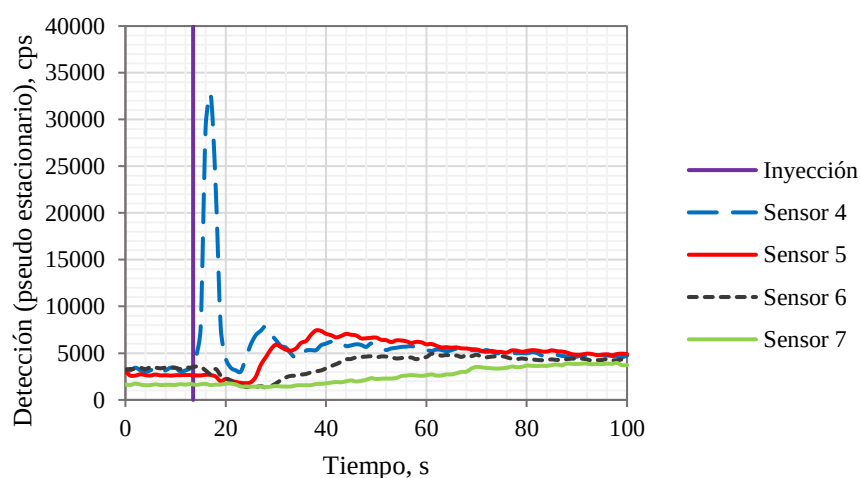


Figura 4.15: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 6.

Un aspecto importante a considerar es lo registrado por el sensor 7 (Figura 4.16), donde la señal aumenta hasta llegar a un *peak* de 4.920 cps a los 97,6 s, y luego permanece constante hasta el término de la medición. Esto muestra que el trazador inyectado no evacúa completamente del sistema y permanece en la zona de colección. Durante la medición se observó un tiempo medio de aproximadamente 2 min para alcanzar el nivel de homogenización del trazador en la zona de colección.

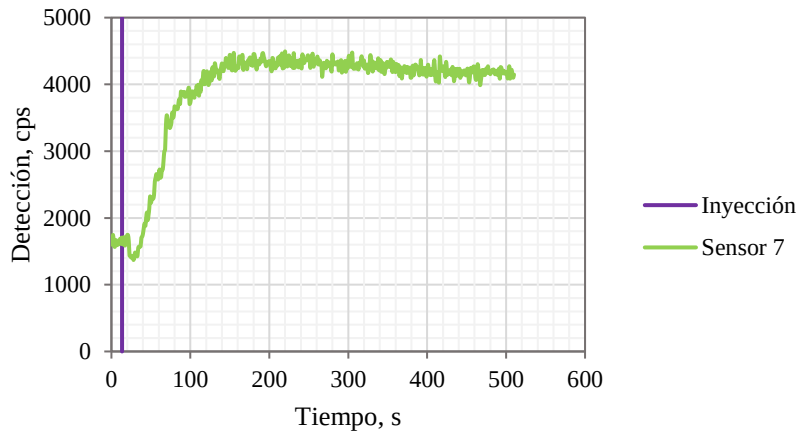


Figura 4.16: Señal detectada por sensor 7 en Experiencia 6.

Experiencia 7

Al igual que en la experiencia anterior, el sensor que presentó una detección mayor es el 4, seguido por el sensor 5, con *peaks* de 35.000 cps y 10.000 cps, respectivamente. Se puede apreciar en la Figura 4.17 que, a un tiempo de 20 s, los sensores 5, 6 y 7 presentan una caída importante de la señal y luego tienen un leve aumento, permaneciendo constante en aproximadamente 6500 cps. Al igual que en experiencias anteriores, el tiempo de mezcla se logra aproximadamente a los 100 s.

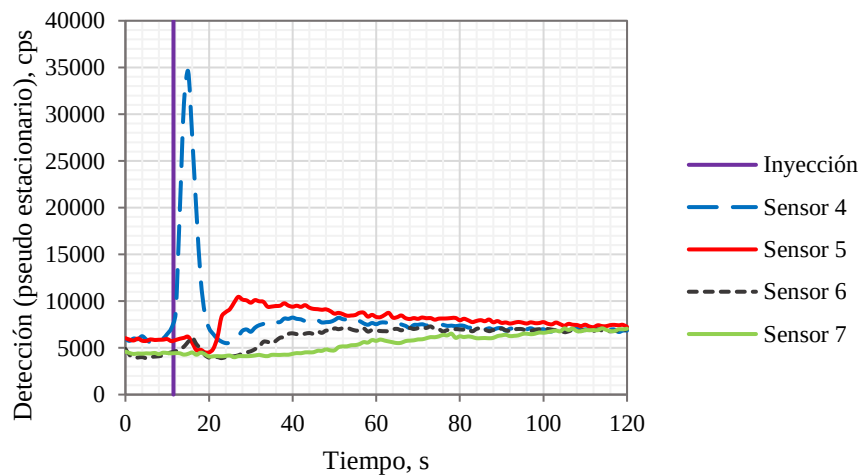


Figura 4.17: Señal detectada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 7.

4.2.3 Efecto de frothcrowder

Experiencia 8

En la experiencia 8, la inyección se realizó en la superficie, a una distancia de 36 cm respecto al labio de rebalse (sensor 3) y con un ángulo de 50°. En la Figura 4.18 se muestra que todos los sensores ubicados en la zona de colección comienzan con una señal de fondo mayor que al inicio de las mediciones de ese día, debido a la acumulación de trazador en esta zona a medida que transcurrieron las experiencias. Por otra parte, al inyectar el trazador en el punto 3, los sensores que detectan un mayor *peak* son los sensores 4 y 5 (28.229 y 10.210 cps, respectivamente), debido a su cercanía al punto de inyección.

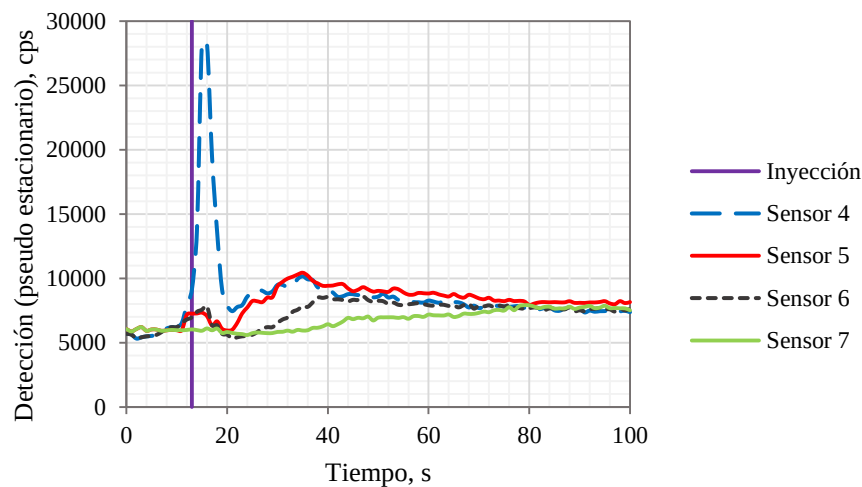


Figura 4.18: Señal registrada por sensores ubicados en zona de colección en Experiencia 8.

En la Figura 4.18 se observa que los sensores entregan una señal relativamente constante (8000 cps) después de los 80 s de haber comenzado la medición. Es decir, el trazador que drena a la zona de colección se homogeniza y descarga con una constante de tiempo mayor a 1 hora, en estado pseudoestacionario.

Experiencia 9

Las detecciones registradas por los cuatro sensores que conforman la zona de colección (Figura 4.19), son superiores a todas las experiencias anteriores, ya que una cantidad del trazador drena a la zona de colección y permanece con una constante de tiempo mayor a una hora (respuesta de largo plazo). Además, el punto de convergencia de los sensores aumenta por sobre los 9.000 cps, que fue lo registrado en la experiencia 8.

Finalmente la homogenización de la zona de colección se logra a los 100 s (tiempo de mezcla), tal como muestra la Figura 4.19.

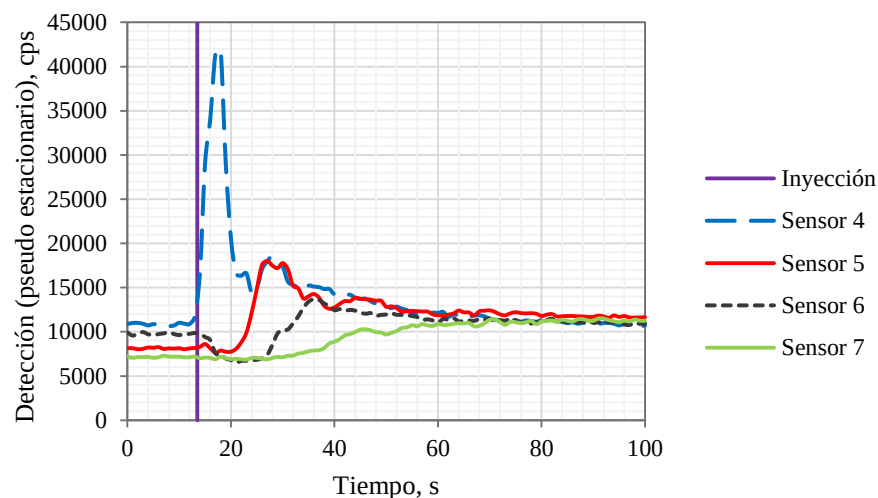


Figura 4.19: Señal detectada por sensores de fondo en Experiencia 9.

A continuación, en la Tabla 4.1 se presenta un resumen de los tiempos de mezcla obtenidos en cada una de las experiencias.

Tabla 4.1: Tiempos de Mezcla de las 9 Experiencias.

Número de Experiencia	Inyección		Tiempo s
	Distancia cm	Profundidad	
1	5	Tope Espuma	10
2	21	Tope Espuma	25
3	36	Tope Espuma	45
4	98	Tope Espuma	100
5	5	Interfase	45
6	21	Interfase	100
7	36	Interfase	100
8	36	Tope Espuma	100
9	36	Interfase	100

4.3 Detección de Fondos Finales en Estado Pseudoestacionario

Para obtener las señales de fondo detectadas por los sensores 1 al 9, se consideraron los últimos 100 s de medición para cada una de las experiencias y de cada uno de los sensores ubicados en la celda bi-dimensional. A continuación se calculó un promedio (media móvil) de las detecciones registradas por cada sensor (Anexo H: Excel, Fondo Final) y por cada experiencia, lo cual se muestra en la Tabla 4.2

Tabla 4.2: Detección de Fondos Finales en cuentas por segundo [cps].

Detección Fondo Final									
	Sensor								
Ubicación en celda	Zona de Espuma			Zona de Colección				Espuma	Descarga
Experiencia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	83	61	62	77	63	56	54	78	28
2	161	114	122	157	101	105	83	135	57
3	167	113	124	442	414	404	409	136	33
4	190	132	140	1.545	1.620	1.554	1.609	149	41
5	248	156	164	1.920	1.749	1.587	1.568	161	47
6	128	100	104	3.846	4.212	3.977	4.180	132	52
7	135	116	123	6.092	6.703	6.272	6.594	158	72
8	139	121	128	6.595	7.277	6.850	7.278	161	72
9	155	137	143	8.924	9.831	9.266	9.815	182	90

En la Figura 4.20 se muestran los datos de la Tabla 4.2, observándose que a medida que avanza el número de experiencias en el tiempo, la cantidad de trazador detectado por los sensores va aumentando. En particular, la detección de los sensores 4 a 7, ubicados en la zona de colección, aumentan de aproximadamente 100 cps a 10.000 cps, lo cual demuestra, que el trazador se acumula en esta zona, debido al largo tiempo de residencia promedio del trazador líquido, mayor a 1 hora.

Por otra parte, se muestra la diferencia que existe en las experiencias 1 a 3 con respecto a las experiencias 5 a 7, principalmente en los sensores de la zona de colección, donde la posición en donde se inyecta el trazador es determinante para la detección de éste. Esto indica, que la concentración de trazador en las últimas experiencias es muy superior a las primeras tres, ya que una inyección cercana a la zona de interfase provocará que dicho compuesto sea drenado preferencialmente hacia la zona de colección, no descargando el líquido hacia la zona de espuma directamente, sino después de homogenizarse en la zona de colección (con el τ de la zona de colección).

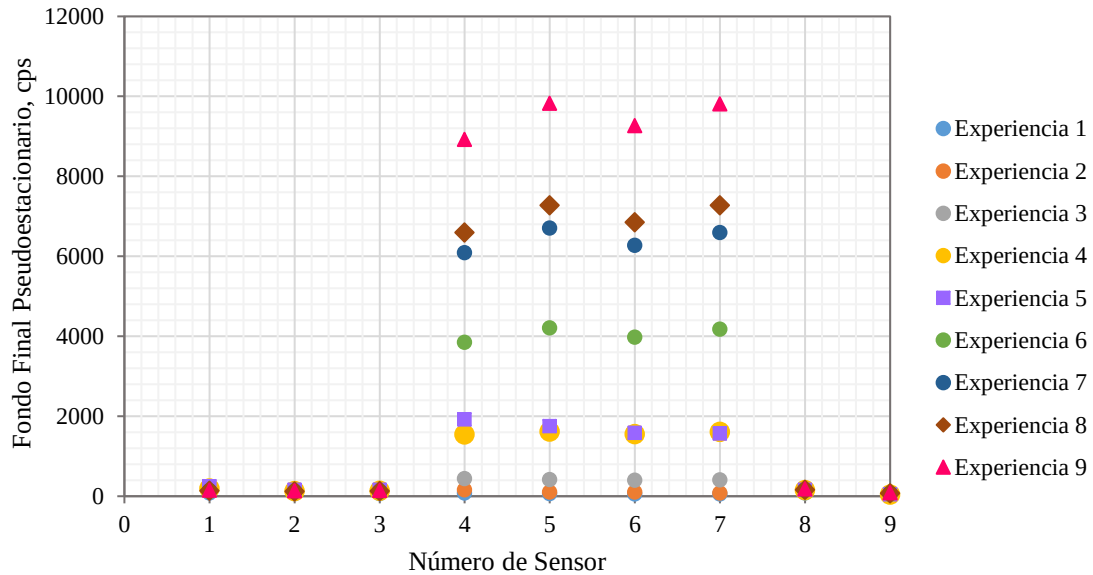


Figura 4.20 Señal del estado pseudo estacionario detectada por los sensores 1 a 9 en los últimos 100 [s] de cada experiencia.

La Figura 4.21 muestra una comparación de todas las experiencias con respecto al efecto de penetración que tiene el trazador (*drop back*) a la zona de colección, y así poder obtener el drenaje de líquido que existe hacia esta zona.

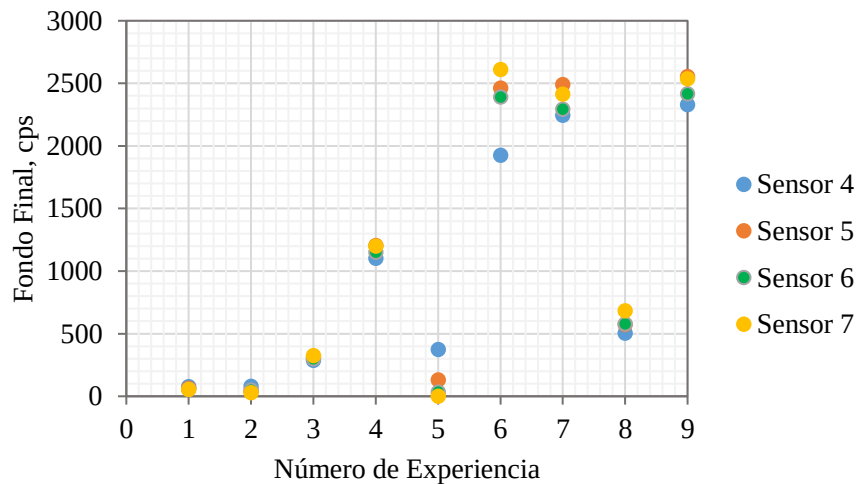


Figura 4.21: Aumento de Fondo Final pseudo estado estacionario de sensores 4, 5, 6 y 7.

En la Figura 4.21 se puede observar que el fondo final detectado por los sensores ubicados en la zona de colección es de aproximadamente 2.500 cps.

4.4 Velocidad del líquido en la descarga de la espuma

Para cada una de las experiencias, se realizó una comparación entre la velocidad entregada por la cámara Visiofroth, ubicada entre los sensores 1 y 2, y la velocidad calculada a través del seguimiento del trazador, según la Ecuación (4)

$$Velocidad_{trazador} = \frac{Distancia\ entre\ sensores,\ cm}{Tiempo\ entre\ peaks\ de\ las\ señales,\ s} \quad (4)$$

El método de cálculo se ilustra para la experiencia 3.

- i. Determinar las distancias entre los sensor 3 – 2, 2 - 1 y 3 - 1.

Distancia entre sensor 3 – 2 = 15 cm.

Distancia entre sensor 3 – 1 = 31 cm.

Distancia entre sensor 2 – 1 = 16 cm.

- ii. Registrar el tiempo en que se obtuvo el *peak* máximo para las señales de los sensores 1, 2 y 3 (Tabla 4.3). En la Figura 4.22 se muestran las señales de los sensores mencionados con su respectivo *peak*.

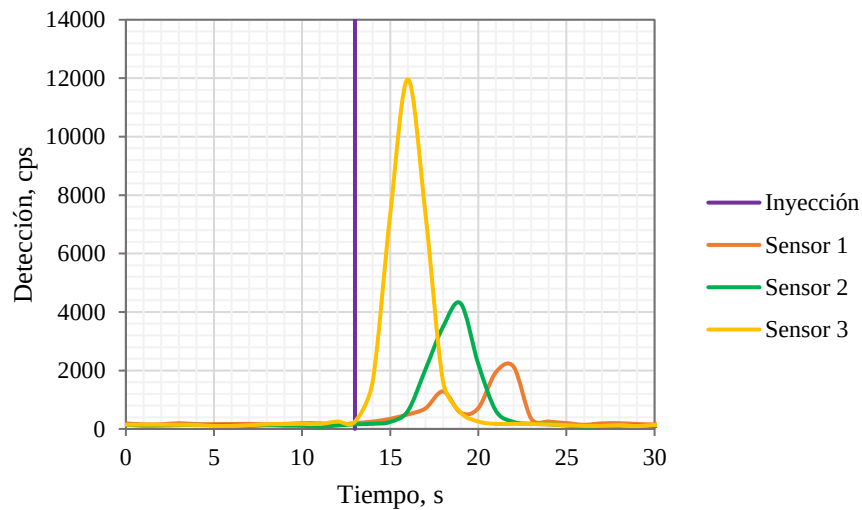


Figura 4.22: Señal detectada por sensores 3, 2 y 1.

Tabla 4.3: Tiempos de detección máxima para sensores 1, 2 y 3.

Sensor	Detección, cps	Tiempo de peak máximo, s
1	3620	21.30
2	6240	18.45
3	15600	15.65

iii. A continuación, se realizó el cálculo según Ecuación (4).

$$Velocidad_{tramo\ 3-2} = \frac{15\ cm}{18.45\ s - 15.65\ s} = 5.36\ cm/s \quad (5)$$

$$Velocidad_{tramo\ 3-1} = \frac{31\ cm}{21.3\ s - 15.65\ s} = 5.49\ cm/s \quad (6)$$

$$Velocidad_{tramo\ 2-1} = \frac{16\ cm}{21.3\ s - 18.45\ s} = 5.61\ cm/s \quad (7)$$

iv. Finalmente se obtiene un promedio entre los resultados de las tres velocidades.

$$Velocidad_{experiencia3} = \frac{5.36 + 5.49 + 5.61}{3} = 5.49 \pm 0.13 \quad (8)$$

Experiencia 1

En la experiencia 1 la metodología para el cálculo de la velocidad de espuma fue diferente, debido a que la inyección fue en el sensor 1, a una distancia de 5 cm del rebalse, por lo tanto no se aplica la diferencia entre señales máximas de cada sensor. Se calculó la velocidad de descarga de la espuma, según el flujo de descarga de concentrado y el volumen de líquido que se acumula en el depósito ubicado en un costado de la celda bidimensional (Figura 4.23).

En la Figura 4.23 se observa una espuma que presenta un desnivel en los bordes del depósito de descarga, además de la diferencia de altura que se percibe en el centro (cañería de descarga) con respecto a las orillas. Se estimó la altura de espuma en la descarga, la que resultó ser de aproximadamente $1 \pm 0.5\ cm$.

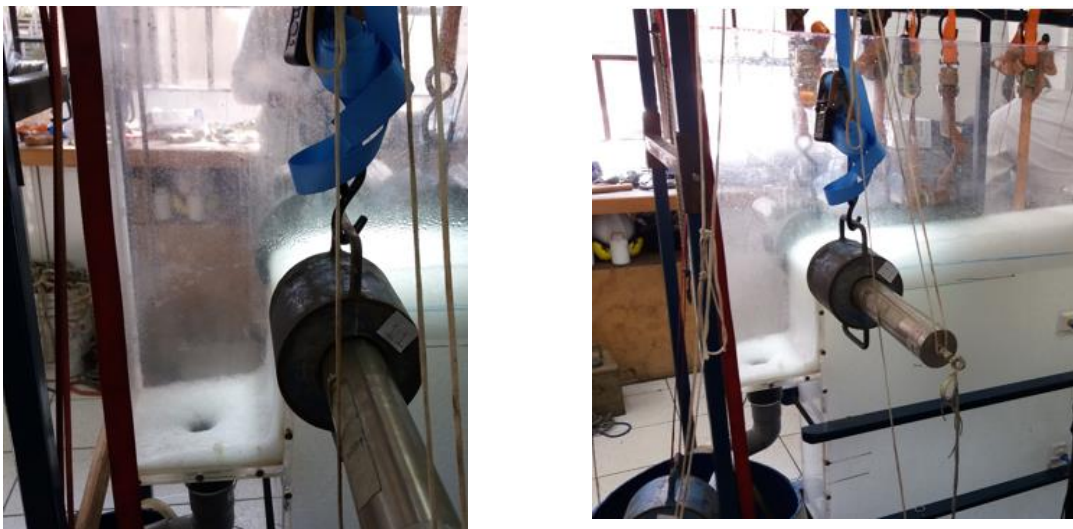


Figura 4.23: Imágenes de depósito de descarga en experiencia 1.

A continuación, se estimó el volumen de líquido contenido en el depósito de descarga según la Ecuación (9):

$$\text{Volumen de líquido} = A_D \cdot h_{F,D} \cdot \varepsilon_{\text{líquido}} \quad (9)$$

Donde:

A_D : Área de depósito de descarga, cm.

$h_{F,D}$: Altura de espuma en depósito de descarga, cm.

$\varepsilon_{\text{líquido}}$: Concentración volumétrica del líquido, %.

$$\text{Volumen de líquido} = (15 \cdot 15) \text{ cm}^2 \cdot 1.3 \text{ cm} \cdot 0.1 = 29.3 \text{ ml}$$

Con el volumen de líquido calculado y el flujo de descarga registrado durante la medición (2,89 L/min), se obtuvo el tiempo de residencia del líquido en el depósito de descarga según:

$$\tau_{\text{Depósito}} = \frac{\text{Volumen de líquido, L}}{\text{Caudal de descarga, L/min}} \quad (10)$$

$$\tau_{\text{Depósito}} = \frac{29.3 \cdot 10^{-3} \text{ L}}{2.89 \text{ L/min}} \cdot 60 = 0.6 \text{ s} \quad (11)$$

Luego, se calculó el tiempo en que tarda el trazador inyectado en recorrer los 5 cm hacia el rebalse, utilizando la siguiente expresión (Ecuación 12):

$$t_R = t_{S9} - t_{S1} - \tau_{\text{Depósito}} \quad (12)$$

Donde:

t_R : Tiempo que tarda el trazador en recorrer 5 cm.

t_{S9} : Tiempo de registro de peak en sensor 9, s.

t_{S1} : Tiempo de registro de peak en sensor 1, s.

$$t_R = 3.3 - 1.8 - 0.6 = 0.9 \quad (13)$$

Finalmente, se obtiene la velocidad estimada de la espuma de acuerdo a la Ecuación (14):

$$v_{\text{estimada}} = \frac{d_{\text{rebalse}}}{t_R} \quad (14)$$

$$v_{estimada} = \frac{5 \text{ cm}}{0.9 \text{ s}} = 5.5 \text{ cm/s} \quad (15)$$

La velocidad estimada, se comparó con la velocidad entregada por el sistema Visiofroth, la cual fue de 5.17 cm/s, arrojando un porcentaje de error de 6.4%.

Experiencia 2

Para esta experiencia, se utilizó la distancia que existe entre el sensor 2 y 1, la que corresponde a 16 cm. Ésta se divide por el tiempo en que demora el trazador en recorrer dicha distancia, lo que se refleja en el registro de *peak* máximo de cada señal. Una vez estimada una velocidad, se compara con la velocidad entregada por la cámara Visiofroth (Tabla 4.4).

Tabla 4.4: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 2.

Experiencia 2				
Sensor	Tiempo	Distancia	Velocidad Estimada	Velocidad VisioFroth
	s	cm	cm/s	cm/s
2	15.8	16	6.67 ± 0.1	5.52 ± 0.33
1	18.2			

Experiencia 3

Se realizó una comparación entre la velocidad del líquido en la espuma estimada, según la trayectoria que presenta el trazador entre los sensores 3 y 1 con respecto a la entregada por la cámara Visiofroth. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 3.

Experiencia 3				
Sensor	Tiempo	Distancia	Velocidad Estimada	Velocidad VisioFroth
	s	cm	cm/s	cm/s
3	15.65	15	5.36	5.57 ± 0.27
2	18.45	16	5.61	
1	21.30	31		
Promedio			5.49 ± 0.13	

Experiencia 4

En esta experiencia, ambas velocidades de espuma, la calculada y la registrada por la cámara Visiofroth (Tabla 4.6), se encontraron dentro del mismo orden de magnitud, con un porcentaje de error del 12.1% aproximadamente.

Tabla 4.6: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 4.

Experiencia 4				
Sensor	Tiempo	Distancia	Velocidad Estimada	Velocidad VisioFroth
	s	cm	cm/s	cm/s
8	15.75	62	4.16	3.42 ± 0.33
3	30.65	15	3.61	
2	34.80	16	3.60	
1	39.25	93		
Promedio			3.96 ± 0.32	

Experiencia 5

En esta experiencia ocurre lo mismo que en la Experiencia 1, donde se obtuvo una velocidad sin tener una diferencia entre señales máximas, debido al punto de inyección del trazador líquido. La distancia que se consideró desde el sensor hasta el rebalse es de 6.4 cm, ya que la inyección fue realizada en la interfase pulpa espuma y no en la superficie, como fue en el caso de la experiencia 1. Por lo tanto, se consideró un triángulo rectángulo con catetos de 5 y 4 cm y una hipotenusa de 6.4 cm (Figura 4.24).



Figura 4.24: Distancia desde punto de inyección a rebalse.

En la Figura 4.25 se muestra el depósito de descarga ubicado a un costado de la celda bidimensional, donde se estimó una altura de espuma, aproximadamente de 1.3 cm.



Figura 4.25: Imagen de depósito en Experiencia 5.

Con la altura de espuma, la concentración volumétrica de líquido (*Hold up*) y el área del depósito de descarga, se obtuvo el volumen de líquido, según la Ecuación (9):

$$\text{Volumen de líquido en depósito} = 10 \% \cdot 225 \text{ cm}^2 \cdot 1,3 \text{ cm} = 29,3 \text{ ml} \quad (16)$$

A continuación, con el volumen de líquido calculado y el flujo de descarga registrado durante la medición (2.94 L/min), se calculó el tiempo de residencia del líquido en el depósito de descarga según la Ecuación (10):

$$\tau_{\text{Depósito}} = \frac{\text{Volumen de líquido}}{\text{Caudal de descarga}} = \frac{29,25 \cdot 10^{-3} \text{ L}}{2,94 \text{ L/min}} \cdot 60 = 0,59 \text{ s} \quad (17)$$

Luego, se calculó el tiempo en que tarda el trazador inyectado en recorrer los 6.4 cm hacia el rebalse utilizando la Ecuación (12):

$$t_R = 28.75 - 26.7 - 0.59 = 1.46 \text{ s} \quad (18)$$

Finalmente, se estimó la velocidad de la espuma de acuerdo a la Ecuación (14):

$$v_{\text{estimada}} = \frac{\frac{(\text{cateto}_1 + \text{cateto}_2 + \text{hipotenusa})}{2}}{t_R} \quad (19)$$

$$v_{estimada} = \frac{\frac{9 + 6.4}{2} \text{ cm}}{1.46 \text{ s}} = 5.27 \text{ cm/s} \quad (20)$$

La velocidad estimada, se comparó con la velocidad entregada por el sistema Visiofroth, que fue de 5.24 cm/s, resultando con un porcentaje de error de 0.6%.

Experiencia 6

Para este caso, la velocidad calculada entregó un valor totalmente fuera de rango (12 [cm/s]), lo cual se debe a que la inyección del trazador se realizó a una profundidad de 5 [mm] sobre la interfase. Por lo tanto, solo una parte del trazador fue transportado al concentrado y registrado por el sensor 1 (inmediatamente después de haber realizado la inyección), gran parte de éste fue drenado hacia la zona de colección.

Tabla 4.7: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 6.

Experiencia 6				
Sensor	Tiempo	Distancia	Velocidad Estimada	Velocidad VisioFroth
	s	cm	cm/s	cm/s
2	15.7	16	12.31	3.64 ± 0.25
1	17.0	15		

Experiencia 7

Para la experiencia 7, las velocidades calculadas arrojaron valores dentro de lo esperado, las que se asemejan bastante a la velocidad entregada por la cámara Visiofroth, las cuales se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 7.

Experiencia 7				
Sensor	Tiempo	Distancia	Velocidad Estimada	Velocidad VisioFroth
	s	cm	cm/s	cm/s
3	14.25	15	5.66	3.83 ± 0.55
2	16.90	16	2.99	
1	22.25	31		
Promedio			3.88 ± 1.89	

Experiencia 8

Los resultados de esta experiencia se presentan en la Tabla 4.9. Cabe destacar, que para esta medición el ángulo *frothcrowder* utilizado fue de 50°, lo que aumentó la velocidad de descarga de la espuma.

Tabla 4.9: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 8.

Experiencia 8				
Sensor	Tiempo	Distancia	Velocidad Estimada	Velocidad VisioFroth
	s	cm	cm/s	cm/s
3	14.25	15	6.00	7.12 ± 0.52
2	16.75	16	7.44	
1	18.90	31		
Promedio			6.67 ± 1.02	

Experiencia 9

En esta experiencia, la inyección se realizó en la interfase pulpa/espuma, a una distancia de 36 cm del labio de descarga y con un ángulo *frothcrowder* de 50°. Por lo tanto, se esperaba obtener velocidades más altas, tanto para la velocidad calculada, como para la registrada por la cámara Visiofroth. Esto se refleja en los valores presentados en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Comparación entre velocidad estimada y registrada por cámara Visiofroth en Experiencia 9.

Experiencia 9				
Sensor	Tiempo	Distancia	Velocidad Estimada	Velocidad VisioFroth
	s	cm	cm/s	cm/s
3	14.9	15	13.64	7.83 ± 0.27
2	16.0	16	6.40	
1	18.5	31		
Promedio			8.6 ± 3.71	

A continuación, en la Figura 4.26 se presentan las velocidades entregadas por el sistema Visiofroth y las estimadas para cada una de las experiencias (Anexo G: Excel, Velocidad_Espuma).

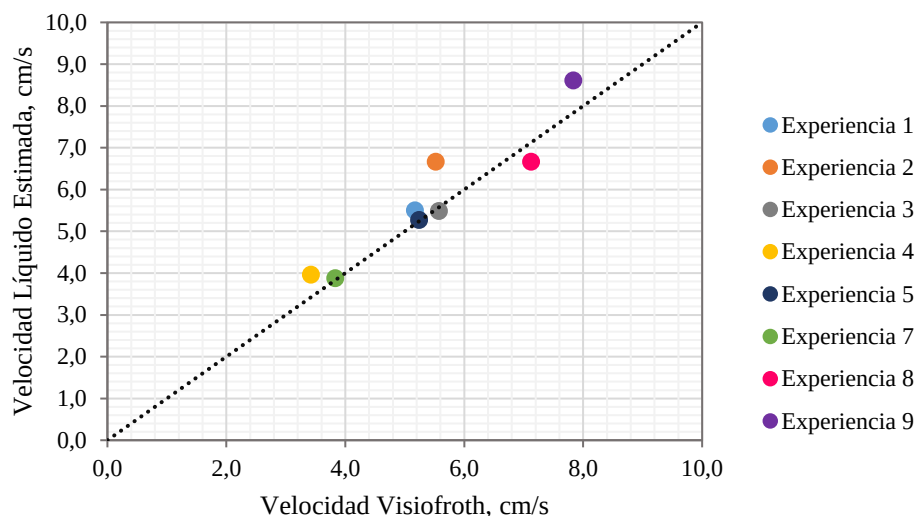


Figura 4.26: Velocidad del líquido estimada v/s Velocidad Visiofroth.

En la Tabla 4.11 se presentan los porcentajes de error asociados a las velocidades estimadas en cada una de las experiencias.

Tabla 4.11: Porcentaje de Error entre Velocidad de espuma estimada y velocidad de espuma registrada con cámara Visiofroth.

Experiencia	Velocidad Estimada	Velocidad Visiofroth	Error
	cm/s	cm/s	%
1	5.50	5.17	6.4
2	6.67	5.52	20.8
3	5.49	5.57	1.5
4	3.96	3.42	15.7
5	5.27	5.24	0.6
6	-	-	-
7	3.88	3,83	1.2
8	6.67	7.12	6.4
9	8.61	7.83	10.0

4.4.1 Efecto del ángulo *frothcrowder* en la velocidad de Espuma

Al tomar en cuenta todas las experiencias realizadas, se seleccionaron aquellas que permiten realizar una evaluación del efecto del ángulo del *frothcrowder*. Se seleccionaron las experiencias 3 y 8, que poseen las mismas condiciones de operación, a excepción del ángulo *frothcrowder*, que fue de 40° para la primera experiencia y de 50° en la segunda. La inyección del trazador se realizó a 36 cm del labio de descarga, a una profundidad de 5 mm con respecto a la superficie de la espuma.

Por otra parte, se compararon las experiencias 7 y 9, donde la inyección se realizó a 36 cm del rebalse, en la interfase pulpa/espuma. El ángulo *frothcrowder* utilizado fue de 40° y 50° en las experiencias 7 y 9, respectivamente.

En la Tabla 4.12 se muestran las velocidades entregadas por la cámara Visiofroth y la calculada con respecto al trayecto del trazador, además del número de experiencia y el ángulo *frothcrowder* correspondiente.

Tabla 4.12: Velocidad Visiofroth y Velocidad Estimada para experiencias 3, 7, 8 y 9.

	Punto de Inyección con respecto al rebalse y profundidad	Velocidad Estimada	Velocidad Visiofroth	Ángulo <i>Frothcrowder</i>
	cm / -	cm/s	cm/s	°
Exp 3	36 / espuma	5.49 ± 0.13	5.57 ± 0.27	40
Exp 8	36 / espuma	6.70 ± 0.72	7.12 ± 0.52	50
Exp 7	36 / interfase	3.88 ± 1.36	3.83 ± 0.55	40
Exp 9	36 / interfase	8.61 ± 3.71	7.83 ± 0.27	50

En las Figuras 4.27 y 4.28 se muestran los datos de la Tabla 4.12, donde se comparan las experiencias 3 y 8 y las experiencias 7 y 9, respectivamente. En la Figura 4.27 (inyección en la superficie de espuma) se observó que la velocidad de descarga de la espuma aumenta aproximadamente 1.5 cm/s cuando el ángulo *frothcrowder* cambia de 40° a 50°, lo que implica un aumento del flujo de concentrado de 2.3 a 3.8 L/min. Esta tendencia se refleja tanto para la velocidad entregada por la cámara Visiofroth como la calculada según distancia y tiempos de *peaks* máximos de las señales.

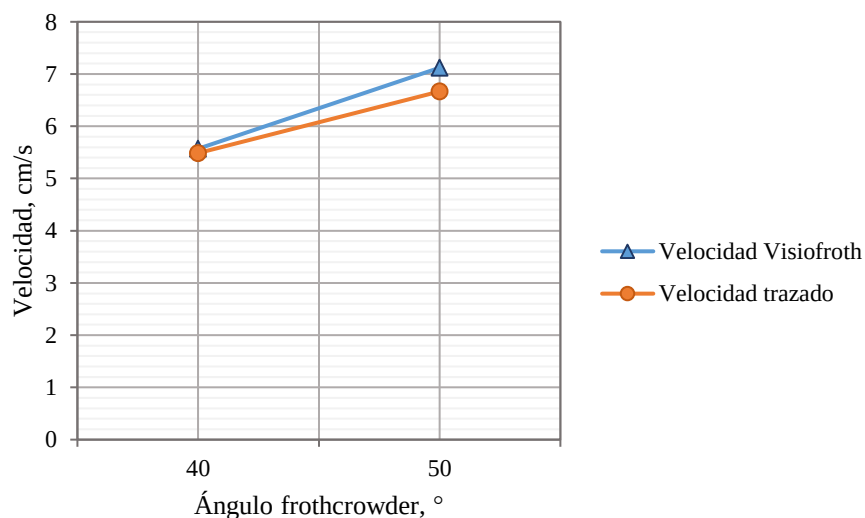


Figura 4.27 Velocidad de Espuma v/s Ángulo *frothcrowder* para experiencia 3 y 8 (inyección tope).

En la Figura 4.28 (inyección sobre interfase), también se observa una diferencia importante entre la velocidad registrada con un ángulo *frothcrowder* de 40° y la registrada a un ángulo de 50°. Para este caso, la velocidad en la experiencia 9 (ángulo *frothcrowder* de 50°) es el doble a la medida en la experiencia 7.

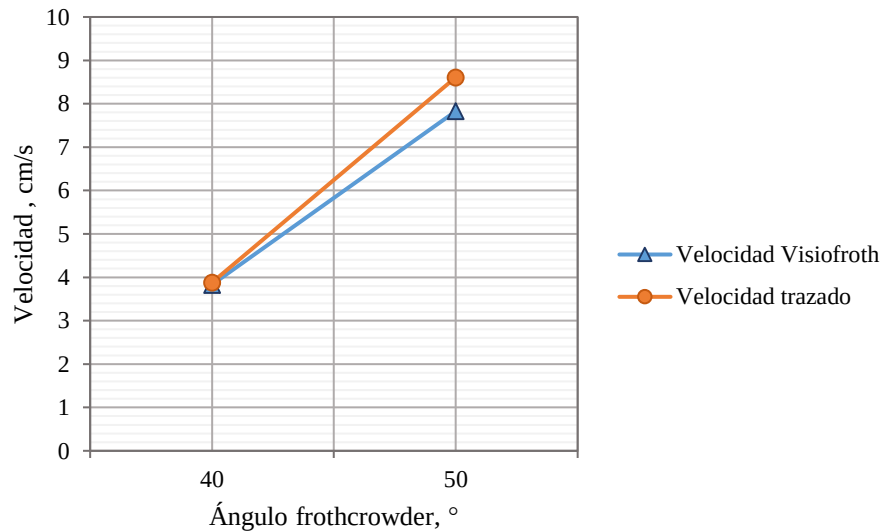


Figura 4.28: Velocidad de Espuma v/s Ángulo frothcrowder para experiencia 7 y 9 (inyección interfase).

4.5 Efecto de drenaje de líquido según distancia a rebalse

Uno de los objetivos principales en este trabajo fue determinar el drenaje de líquido desde la espuma hacia la zona de colección, evaluando distintos puntos respecto al labio de descarga en una celda de flotación. Además, se realizó una comparación entre la intensidad entregada por cada sensor según la inyección a nivel de interfase y superficie y cómo se refleja en el transporte de espuma.

En la Figura 4.29 se muestran dos curvas: (a) Radiación total (curva obtenida por medio de integración matemática) que se observó en la zona de colección cuando se inyectó el trazador en la superficie, a distancias de 5, 21 y 36 cm del labio de descarga y (b) Radiación total en la zona de colección, pero con una inyección de trazador realizada en la interfase, con respecto a las mismas distancias mencionadas anteriormente. En la Figura 4.29, se observa una clara diferencia entre ambas curvas, donde la intensidad de la inyección realizada en la interfase es diez veces mayor que la registrada por la inyección en la superficie. Esto muestra que a medida que la inyección de trazador se aleja de la descarga, el drenaje que existe hacia la zona de colección es significativa, siendo crítico para el líquido que se encuentra cerca de la interfase. Por lo tanto, el trazador drenado permanece en la zona de colección (tiempo de residencia) y se descarga de acuerdo a la dinámica que existe en esta zona.

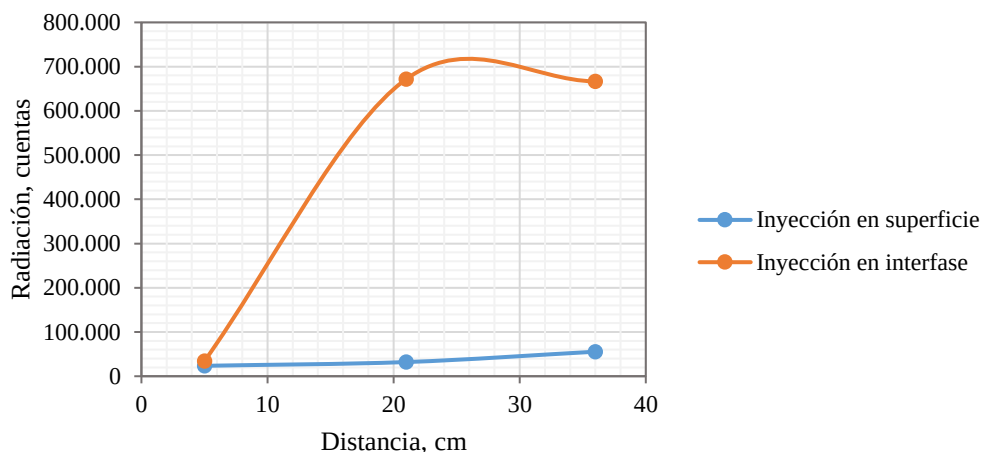


Figura 4.29: Intensidad Promedio en Zona de Colección v/s Distancia de Inyección.

La Figura 4.30 muestra la intensidad detectada por los sensores 1, 2 y 3 con respecto a la distancia de inyección, cuando esta fue realizada en la interfase. En esta Figura se muestra la tendencia que tiene la detección registrada por los sensores ubicados en la zona de espuma, según la ubicación en la celda. Cuando la inyección del trazador se realizó en el punto donde se ubica el sensor 1 (5 cm), la detección registrada por los sensores 2 y 3 es insignificante, lo que se repite para las dos condiciones restantes, donde la inyección se realizó en el punto 2 y 3.

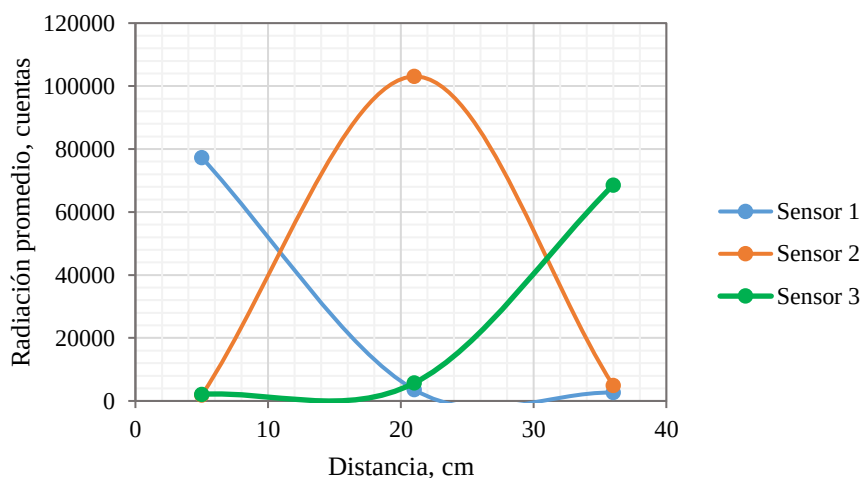


Figura 4.30: Radiación en Zona de Espuma para inyección en interfase.

En la Figura 4.31 se presenta la radiación promedio detectada en la zona de espuma con respecto a la distancia de inyección (5, 21 y 36 cm), cuando el trazador es inyectado a nivel de la superficie de la espuma. En la Figura 4.31 se observa que la detección registrada por el sensor 1 (lugar de inyección) es superior (24.834 cuentas) a las detecciones registradas por los sensores 2 y 3, ubicados aguas arriba.

La señal detectada por los sensores 2 y 3 en el punto 1 (5 cm) son de 1748 y 891 cuentas, respectivamente; lo cual se repite para las dos condiciones restantes, donde la inyección se realizó en el punto 2 y 3.

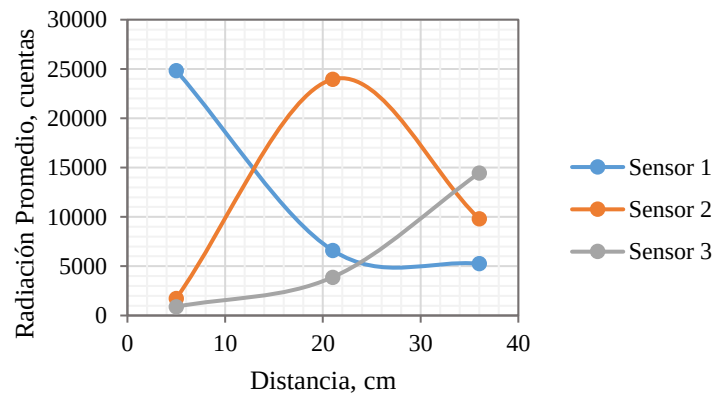


Figura 4.31: Radiación promedio en Zona de espuma para inyección en superficie.

La Figura 4.32 muestra el porcentaje de drenaje de líquido (método de cálculo en Anexo 2), calculado a partir del aumento de fondo final de los sensores 1 a 8 (sensores ubicados en la celda), en las pruebas 1 a 9. En las primeras cuatro experiencias, el trazador líquido se inyectó en la superficie de la espuma, mientras que la distancia desde el rebalse fue entre 5 y 98 cm. Se observó que el drenaje de líquido hacia la zona de colección aumentó gradualmente con la distancia y resultó significativo para las pruebas 3, 4 y 8 (inyección de 36 y 98 cm, respectivamente), alcanzando un 50% para una distancia de 98 cm. Por otra parte, en las pruebas 5, 6 y 7, el trazador se inyectó en la interfase pulpa/espuma, a distancias respecto del rebalse de 5, 21 y 36 cm, respectivamente. Para estos casos, al aumentar la distancia, el drenaje de líquido fue significativo, alcanzando valores de 100% para distancias superiores a 21 cm.

Finalmente, al variar el ángulo *frothcrowder* de 40° a 50° en las pruebas 8 y 9, estas resultaron con un porcentaje de drenaje de líquido similar a las pruebas 3 y 7.

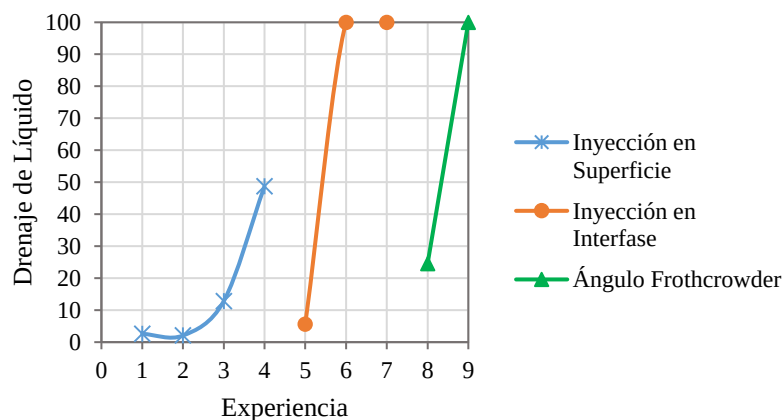


Figura 4.32: Drenaje de líquido de la zona de espuma para experiencias 1 a 9.

Capítulo 5 Conclusiones

En el trabajo desarrollado se implementó con éxito una nueva metodología basada en la inyección de un trazador radiactivo líquido en la espuma de una celda bidimensional de laboratorio, para evaluar el transporte de líquido en la espuma, respecto a la distancia del labio de descarga (5 a 98 cm). Además, se cuantificó el drenaje de líquido desde la zona de espuma hacia la zona de colección. Las pruebas se realizaron inyectando el trazador en dos niveles (a) en la parte superior de la espuma y (b) sobre la interfase pulpa-espuma.

Los resultados mostraron que el líquido (trazador) que se encuentra en la parte superior de la espuma, a distancias de 36 cm del labio de descarga, posee una alta probabilidad de ser transportado al concentrado. Por otro lado, el líquido que se encuentra cerca de la interfase pulpa/espuma, a distancias menores a 15 cm del labio de descarga, posee una alta probabilidad de recuperación. Sin embargo, para distancias superiores a 21 cm del labio de descarga, la recuperación del líquido (trazador) resultó nula, debido al drenaje del líquido a la zona de pulpa. Esta observación confirma los resultados de tiempo de residencia de la espuma obtenidos en celdas de flotación industrial, que muestran que el arrastre de sólidos finos ocurre cerca del labio de descarga.

Por otra parte, se obtuvo una buena estimación de la velocidad de descarga del líquido en la espuma, a través de la técnica de trazado radiactivo, comparada con la velocidad de espuma medida por el sistema Visiofroth. Además, los resultados mostraron un aumento del 60% en la velocidad de descarga de la espuma, al variar el ángulo *frothcrowder* de 40° a 50°. También, se comprobó que la velocidad de transporte de líquido en la espuma y la velocidad del gas en la espuma son similares, a distancias entre 5 y 36 cm.

Mediante el uso del trazador líquido, se obtuvo que el período de homogenización de la zona de colección en la celda piloto bidimensional es de aproximadamente 100 s, similar al tiempo de mezclado en celdas de flotación industrial.

Finalmente, el presente trabajo ha demostrado de forma cualitativa que la técnica de trazado radiactivo es una herramienta de gran utilidad para la evaluación del transporte de espuma. Además, posee un gran potencial para identificar el transporte de los minerales flotables y no flotables en la espuma a escala de laboratorio e industrial.

Capítulo 6 Recomendaciones

Para futuros trabajos, se recomienda realizar pruebas a escala piloto con mineral, para observar el transporte del sólido en el proceso de flotación, como también, utilizar trazadores radiactivos líquidos y sólidos a escala industrial, para observar la semejanza de transporte que existe entre ambos equipos y obtener la intensidad del trazador en la descarga.

Además, se recomienda realizar pruebas experimentales donde se modifique la dosificación y el tipo de espumante, con el fin de observar los efectos de esta variable en el proceso de flotación a escala piloto.

Referencias

- Azgoni, F., Gómez, C., & Finch, J. (2007). Correspondence of gas holdup and bubble size in presence of different frothers. *International Journal of mineral Processing*, 83, 1-11.
- ColeParmer Instrument. (2017). Obtenido de <https://www.coleparmer.com/i/cole-parmer-console-drive-230-vac-50-60-hz/7521115>
- Endara, D. (Octubre 2006). *Diseño de un sistema de medición de la distribución del tamaño de burbujas en celdas agitadas mecánicamente*. Universidad de Chile, Santiago.
- FLSmidth. (Julio de 2014). *Flotaion Technology*. Obtenido de <http://www.flsmidth.com/en-US/Industries/Categories/Products/Flotation/WEMCOFlotation/WEMCOFlotation>
- Goodall, C., & O'Connor, C. (1991). Residence time distribution studies in a flotation column. Part 1: the modelling of residence time distribution in a laboratory column flotation cell. *International Journal of Mineral Processing*, 31, 97-113.
- Gorain, B., Franzidis, J., & Manlapig, E. (June 1995). Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in a industrial scale flotation cell- Part 1: Effect on bubble size distribution. *Minerals Engineering*, 615-635.
- Leiva, J. (2012). *Caracterización de la superficie de espumas de flotación industrial*, Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Química. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de ingeniería Química y Ambiental, Valparaíso.
- Lisperguier, G., & Yianatos, J. (1998). Evaluación de un sistema generador de burbujas para columnas de flotación. *Revista Información Tecnológica*, 9(1), 175-181.
- MetsoMinerals. (2006). *Guía de Instalación y del Usuario de OCS VisioFroth*.
- Morales, P., Coddou, F., Yianatos, J., Contreras, F., Catalán, M., & Díaz, F. (2009). Hydrodynamic Performance of the Division Codelco Norte Concentrator's Large Flotation Cells. *International Mineral Processing Conference, PROCEMIN*, (págs. 385-393). Santiago.
- Outotec Web Site. (2017). *Tankcell Flotation*. Obtenido de <http://www.outotec.com/products/flotation/tankcell/>
- Rojas, I. (2013). *Caracterización de espumas y cinética de colección en celdas de flotación*, Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Química. Universidad Técnica Federico Santa María, Ingeniería Química y Ambiental, Valparaíso.
- Rojas, I., Vinnett, L., Yianatos, J., & Iriarte, V. (2014). Froth transport characterization in a two-dimensional flotation cell. *Minerals Engineering*, 40-46.
- Savassi, O., Alexander, D., & Franzidis, J. (March 1998). An empirical model for entrainment in industrial flotation plants. *Minerals Engineering*, 243-256.

- Vinnett, L., Ledezma, T., Álvarez-Silva, M., & Waters, K. (2015). Gas holdup estimation in flotation machines using image techniques and superficial gas rate. *7th International Flotation Conference*. Cape Town, South Africa.
- Vinnett, L., Yianatos, J., & Álvarez-Silva, M. (2014). Gas dispersion measurements in mechanical flotation cells: Industrial experience in Chilean concentrators. *Minerals Engineering*, 57, 12-15.
- Wills, B. (1997). *Mineral Processing Technology* (7 ed.). The University of Queensland.
- Yianatos, J., & Díaz, F. (2011). Hydrodynamic Characterization of Industrial Flotation Machines Using Radioisotopes. *Radioisotopes-Applications in Physical Sciences, InTech*, 391-416.
- Yianatos, J., & Finch, J. (1990). Gas holdup versus gas rate in the bubbly regime. *International Journal of Mineral Processing*, 29, 1414-146.
- Yianatos, J., & Henríquez, F. (2007). Boundary conditions for gas rate and bubble size at the pulp-froth interface in flotation equipment. *Minerals Engineering*, 20(6), 625-628.
- Yianatos, J., & Puelle, P. (1994). Development and calibration of a flotation bubble size sensor. *Avances en Tecnología Mineral*, 157-164.
- Yianatos, J., & Vinnett, L. (2015). *Flotación de Minerales: Fundamentos, Tecnología y Aplicación*. Valparaíso: USM.
- Yianatos, J., Bergh, L., Tello, K., Díaz, F., & Villanueva, A. (2008a). Froth mean residence time measurement in industrial flotation cells. *Minerals Engineering, Vol.21*, 982-988.
- Yianatos, J., Bergh, L., Tello, K., Díaz, F., & Villanueva, A. (2008b). Residence time distribution in single big industrial flotation cells. *Minerals and Metallurgical Processing Journal, Vol 25*, 46-52.
- Yianatos, J., Bergh, L., Vinnett, L., Panire, I., & Díaz, F. (2015). Modelling of residence time distribution of liquid and solid mechanical flotation cells. *Minerals Engineering* 78, 69-73.
- Yianatos, J., Contreras, F., Díaz, F., & Villanueva, A. (2008c). Direct measurement of entrainment in large flotation cells. *Powder Technology*.
- Yianatos, J., Finch, J., & Laplante, A. (1987). The cleaning action in column flotation froths. *International Journal of Mineral Processing*, 279-292.
- Zhang. (2009). *Water overflow rate and bubble surface area flux in flotation, Tesis de Máster en Ingeniería*. McGill University, Departamento de Minería e Ingeniería de Materiales, Montreal, Canadá.
- Zheng, X., Franzidis, J.-P., & Manlapig, E. (2004). Modelling of froth transportation in industrial flotation cells: Part I. Development of froth transportation models for attached particles. *Minerals Engineering*, 981-988.

Zheng, X., Johnson, N., & Franzidis, J. (2006). Modelling of entrainment in industrial flotation cells: water recovery and degree of entrainment. *Minerals Engineering*, 1191-1203.

Anexo A: Calibración Bomba Peristáltica 1.

La medición del caudal de agua impulsado por ambas bombas peristálticas Masterflex (Figura A-1 y A-2) fue estimado con la técnica de aforo volumétrico, es decir, la medición del volumen descargado a una probeta de 2 L durante un intervalo de tiempo medido a través de un cronómetro digital.



Figura A-1 Bomba Peristáltica 1



Figura A-2: Bomba Peristáltica 2.

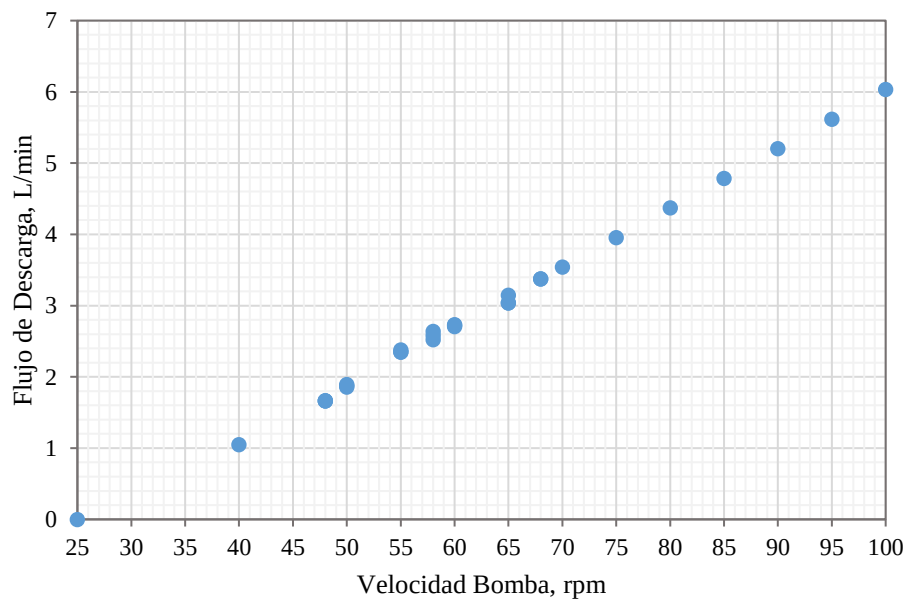


Figura A-3: Contrastación bomba peristáltica 1.

Anexo B: Método de Cálculo de Drenaje de líquido

Para obtener el porcentaje de drenaje de líquido en cada una de las experiencias, se utilizó la Tabla 4.2: “Detección de Fondos Finales”, según el siguiente ejemplo:

- a. Para la experiencia 1, el sensor 1 (Tabla 4.2) detecta como fondo final 83 cps, valor que será el comienzo de la señal del sensor 1 de la experiencia 2. Por lo tanto la detección de fondo final de la experiencia 2, sensor 1 resulta:

$$\text{Detección Fondo Final sensor 1, Exp. 2} = \text{Fondo}_{exp2} - \text{Fondo}_{exp1} \quad (21)$$

$$\text{Detección Fondo Final sensor 1, Exp. 2} = 161 - 83 = 78 \quad (22)$$

- b. Para el sensor 5 de la experiencia 3, la detección del fondo final resultará de:

$$\text{Detección Fondo Final sensor 5, Exp. 3} = \text{Fondo}_{exp3} - \text{Fondo}_{exp2} \quad (23)$$

$$\text{Detección Fondo Final sensor 5, Exp. 3} = 414 - 101 = 313 \text{ cps} \quad (24)$$

Todos los datos presentados en la Tabla 4.2 son tratados de igual forma, resultando la detección final de fondo en cada una de las experiencias, como se muestra en la Tabla B-1 (Anexo H: Excel, Fondo Final)

Tabla B-1: Fondo Final de las 9 Experiencias.

	Sensor							
Experiencia	1	2	3	4	5	6	7	8
1	83	61	62	77	63	56	54	78
2	78	53	60	80	38	50	30	57
3	6	-1	2	286	313	298	325	1
4	23	18	16	1103	1205	1150	1200	13
5	58	25	24	375	130	34	0	12
6	-120	-56	-60	1926	2462	2390	2612	-29
7	7	16	19	2246	2491	2295	2414	25
8	4	5	5	504	574	578	684	3
9	16	16	16	2329	2554	2416	2537	21

- c. A continuación se calcula el promedio de las detecciones de los sensores de fondo (4, 5, 6 y 7) para las experiencias 6, 7 y 9, donde la inyección se realizó en la interfase y existió el máximo aumento de fondo, según lo presentado en la Figura 4.21.

- d. Luego, se divide el promedio de las detecciones de los sensores de fondo de cada una de las experiencias por el promedio de fondo total. Estos resultados se muestran en la Tabla B.2.

Tabla B-2: Drenaje de Líquido de cada Experiencia.

Experiencia	Distancia de Inyección [cm]	Promedio TOF	% Drenaje
1	5	62	2,6
2	21	49	2,1
3	36	306	12,8
4	98	1.165	48,7
5	5	135	5,6
6	21	2.348	100,0
7	36	2.361	100,0
8	36	585	24,5
9	36	2.459	100,0
Promedio fondo total		2.389	

Anexo C: Datos Originales de Experiencias 1 a 9

El Archivo Excel con las mediciones originales detectadas por los sensores, se encuentran en CD adjunto con el siguiente nombre de archivo: USMEsp01Mar17MX_Brute, siendo X: Número de experiencia.

Anexo D: Datos Filtrados de Experiencias 1 a 9

El Archivo Excel con los datos filtrados de cada una de las experiencias, se encuentran en CD adjunto con el siguiente nombre de archivo: USMEsp01Mar17MX_CFiltro, siendo X: Número de experiencia.

Anexo E: Datos Originales Cámara Visiofroth

El Archivo Excel con los datos originales medidos por la cámara Visiofroth se encuentra en CD adjunto con el siguiente nombre de archivo: Datos Originales_Visiofroth.

Anexo F: Tratamiento de Datos Cámara Visiofroth

El Archivo Excel con los datos medidos por la cámara Visiofroth y tratados según filtro, se encuentra en CD adjunto con el siguiente nombre de archivo: Velocidad_Visiofroth.

Anexo G: Velocidad de descarga de Espuma

El Archivo Excel con los datos calculados para la velocidad de descarga de la espuma, a través de la técnica de trazado radiactivo. Además de las velocidades de descarga promedio entregadas por la cámara Visiofroth, se encuentran en CD adjunto con el siguiente nombre de archivo: Velocidad_Espuma.

Anexo H: Detección de Fondo Final

El Archivo Excel con las detecciones finales obtenidas mediante el cálculo presentado en el Anexo B, se encuentran en CD adjunto con el siguiente nombre de archivo: Fondo_Final.