



Universidad de Concepción

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería - Programa de Maestría en Ingeniería Metalúrgica

ESTUDIO DE EFECTO ESPUMANTE DE LIGNOSULFONATOS EN FLOTACIÓN

Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Metalúrgica

JHON VICENTE CHIQUE ACERO

CONCEPCIÓN - CHILE

Diciembre 2020

Profesor Guía: Dr. Leopoldo Gutiérrez Briones

Dpto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería

Universidad de Concepción

Autor:

Jhon Vicente Chique Acero

Profesor Guía:

Dr. Leopoldo Gutiérrez Briones

Director del Programa:

Dr. Leopoldo Gutiérrez Briones

Esta tesis ha sido revisada por los señores:

Dr. Leopoldo Gutiérrez Briones

Dpto. de Ingeniería Metalúrgica - Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción



Dr. Andrés David Ramírez Madrid

Dpto. de Ingeniería Metalúrgica - Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

Dr. Ramón Díaz Noriega

Dpto. de Ingeniería Metalúrgica - Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

Dra. Lina Marcela Uribe Vélez

Escuela de Ingeniería Civil de Minas – Facultad de Ingeniería
Universidad de Talca

Y ha sido

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas que hicieron posible el desarrollo de este proyecto, por todas sus sugerencias y el apoyo que me dieron para hacer posible su culminación.

El agradecimiento especial a mis padres Juana Acero y Vicente Víctor, a mis hermanos Donny, René, Víctor, Wily y Hernán, por los apoyos incondicionales, las recomendaciones que me dieron para mis estudios y así lograr la culminación de este proyecto logrando una meta más en mi vida.

También un agradecimiento muy especial al profesor Leopoldo Gutiérrez, por sus aportes, recomendaciones y apoyo incondicional a nivel académico como personal y por apoyar en mi formación profesional.

Al profesor Eduardo Balladares director del programa del Postgrado de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción, por su apoyo y consejos para poder culminar mis estudios.

Al cuerpo docente, técnico y administrativo de la facultad del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción por su disposición ante requerimientos, inquietudes o dudas durante el desarrollo de mis estudios.

Quiero agradecer además a mis amigos y compañeros Walter, Rodrigo, Milton, Darwin, Madrioly, Vanesa, Issac por acompañarme, por su apoyo incondicional y motivación en todo el momento de mis estudios.

A Chile, Universidad de Concepción, por darme la oportunidad de conocer personas maravillosas, así como también lugares hermosos en el transcurso de mis estudios de Maestría.

RESUMEN

La minería es una de las actividades principales para la economía en Chile, donde la flotación es el proceso más utilizado para concentrar minerales cobre-molibdeno (Cu-Mo), la cual se basa en la adhesión de partículas hidrofóbicas a burbujas de gas (aire, nitrógeno). La flotación es una de los procesos que por medio de reactivos químicos como los espumantes, colectores, activadores, depresores y modificadores logran la separación de los minerales valiosas de los no valiosos, donde, las dos etapas de la flotación para separar el cobre-molibdeno es la flotación colectiva y selectiva, la primera separa el cobre-molibdeno de la cola (mineral no valioso) llevando el cobre-molibdeno a la siguiente etapa que es la flotación selectiva donde se utiliza el sulfhidrato de sodio (NaSH) como depresor de los sulfuros de cobre y llegando a recuperar la molibdenita como concentrado, por lo cual el NaSH presenta efectos medioambientales relacionadas con las posibles emisiones de gas sulfhídrico tóxico (H_2S) y malos olores. Donde estudios previos encontraron al lignosulfonato como un reemplazo para el sulfhidrato de sodio (NaSH), llegando este a deprimir la molibdenita y así poder separar el cobre como concentrado y la molibdenita como cola sin el uso del sulfhidrato de sodio (NaSH), sin embargo, al usar el lignosulfonato evidenciaron la formación de espuma, pero a pesar de eso no se realizaron avances significativos en el estudio del efecto de este reactivo sobre los fenómenos de formación de espuma/espumabilidad en la separación de cobre-molibdeno en la flotación. Es por eso que el objetivo de este trabajo fue investigar los efectos espumantes de tres diferentes lignosulfonatos (KLS, NaLS, CaLS) a través de técnicas de espumabilidad así como son la medición de la tensión superficial, índice dinámico de espumabilidad, distribuciones de tamaño de burbuja y recuperación de agua. Se probaron tres lignosulfonatos los cuales correspondieron a lignosulfonato de sodio azucarado

(NaLS), lignosulfonato de calcio (CaLS) y una muestra preparada por sulfometilación de lignina kraft (KLS). Los resultados mostraron que todos los lignosulfonatos mostraban actividad superficial que disminuía con el pH y estaba relacionada con el grado de anionicidad y el peso molecular. El NaLS mostró el valor de Índice Dinámico de Espumabilidad (DFI) más alto de todas las muestras testeadas. Los lignosulfonatos probados en este estudio afectaron fuertemente el tamaño de las burbujas. Las pruebas de recuperación de agua realizadas mediante experimentos de flotación en un sistema de 2 fases mostraron que la muestra de KLS y NaLS tuvieron los efectos más fuertes, los cuales se correlacionaron con los resultados de tensión superficial, espumabilidad y tamaño de burbuja.



ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----|
| ÍNDICE DE FIGURAS | vii |
| ÍNDICE DE TABLAS | ix |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivo general..... | 3 |
| 1.2 Objetivos específicos | 3 |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO | 4 |
| 2.1 FUNDAMENTOS DE FLOTACIÓN DE MINERALES | 4 |
| 2.1.1 Descripción del proceso de flotación | 4 |
| 2.1.2 Físicoquímica de superficies..... | 6 |
| 2.1.3. Flotación de Cobre y Molibdeno | 8 |
| 2.2 REACTIVOS DE FLOTACIÓN | 14 |
| Colectores | 14 |
| Espumantes..... | 15 |
| Modificadores | 16 |
| Lignina | 17 |
| 2.3 MECANISMO DE FORMACIÓN DE ESPUMAS | 21 |
| 2.3.1 Mecanismos y causas de colapso de las espumas | 22 |
| 1. Drenaje de líquido..... | 23 |
| 2. Difusión de gas entre las burbujas..... | 23 |
| 3. Evaporación..... | 24 |
| 4. Rompimiento de películas..... | 24 |
| 2.4 ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE LAS ESPUMAS | 25 |
| 2.5 METODOS DE EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS ESPUMAS | 27 |
| 2.5.1 Medición de tensión superficial | 27 |
| Método de anillo | 29 |
| 2.5.2 Índice dinámico de espumabilidad (DFI) | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5.3 Distribución de tamaño de burbujas..... | 35 |
| 2.5.4 Recuperación de agua..... | 37 |
| CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL | 38 |
| 3.1 MATERIALES Y REACTIVOS | 38 |
| 3.1.1 Reactivos | 38 |
| 3.1.2 Lignosulfonatos..... | 38 |
| Caracterización de los lignosulfonatos | 38 |
| Mediciones FTIR..... | 39 |
| 3.2 EQUIPOS Y PROCEDIMIENTO | 41 |
| 3.2.1 Celda mecánica de flotación..... | 41 |
| 3.2.2 Dispositivo medidor de burbujas | 42 |
| 3.2.3 Software de procesamiento de imágenes IMAGE-J | 44 |
| Procesamiento de imágenes | 45 |
| 3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL..... | 48 |
| 3.3.1 Tensión superficial..... | 48 |
| 3.3.2 Índice dinámico de espumabilidad (DFI)..... | 49 |
| 3.3.3 Distribución de tamaño de burbujas | 51 |
| Captura y procesamiento de imágenes (Image-J)..... | 53 |
| Operación de cámara fotográfica..... | 53 |
| Captura de imágenes | 54 |
| Procesamiento de imágenes | 54 |
| 3.3.4 Recuperación de agua..... | 55 |
| CAPÍTULO 4: RESULTADOS..... | 57 |
| 4.1 Tensión superficial..... | 57 |
| 4.2 Índice dinámico de espumabilidad (DFI)..... | 58 |
| 4.3 Distribución de tamaño de burbujas | 63 |
| 4.4 Recuperación de agua..... | 68 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN | 71 |
| CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 76 |
| BIBLIOGRAFÍA | 79 |
| ANEXO N° 01: Datos de tensión superficial de los lignosulfonatos a diferentes pH..... | 85 |
| ANEXO N° 02: Datos del índice dinámico de espumabilidad (DFI)..... | 86 |
| ANEXO N° 03: Datos de distribución de tamaño de burbujas D_{32}. | 89 |
| ANEXO N° 04: Datos para la Recuperación de agua | 96 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Adhesión selectiva entre las burbujas y las partículas hidrofóbicas. ...4 | 4 |
| Figura 2. Diagrama del proceso de flotación y esquema del agregado partícula – burbuja.....5 | 5 |
| Figura 3. Ángulo de contacto.7 | 7 |
| Figura 4. Representación fuerzas ejercida entre dos superficies hidrofóbicas. ..8 | 8 |
| Figura 5. Ejemplo circuito común para minerales de Cu-Mo. 10 | 10 |
| Figura 6. Diagrama de estabilidad del NaSH..... 12 | 12 |
| Figura 7. Diagrama general de reactivos colectores..... 14 | 14 |
| Figura 8. Representación esquemática de la adhesión del espumante a la burbuja de gas. 16 | 16 |
| Figura 9. Mecanismos de decaimiento de las espumas a) Drenaje gravitacional del líquido en los bordes de Plateau; b) Succión capilar; c) Difusión gaseosa .26 | 26 |
| Figura 10: Equilibrio entre las moléculas del interior y la superficie de un líquido28 | 28 |
| Figura 11: Dibujo esquemático del proceso de medición realizado por Du Noüy método de anillo.....29 | 29 |
| Figura 12. Parte lineal de la curva volumen versus flujo de gas (tiempo de retención) para MIBC a varias concentraciones31 | 31 |
| Figura 13. Determinación gráfica de Índice Dinámico de Espumabilidad (DFI), tiempo de retención versus la concentración.....33 | 33 |
| Figura 14. Determinación gráfica de Concentración Crítica de Coalescencia para tres espumantes distintos 35 | 35 |
| Figura 15: Distribución de tamaño de burbuja en columna de flotación.....36 | 36 |
| Figura 16. Espectro FTIR de las muestras NaLS, CaLS y KLS.41 | 41 |
| Figura 17. Celda de laboratorio EDEMET con sus componentes42 | 42 |
| Figure 18. Esquema del sistema Medidor de burbujas43 | 43 |
| Figure 19. Cámara fotográfica Nikon D-510044 | 44 |
| Figura 20. Ventana emergente que despliega el software Image-J durante el análisis.....45 | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 21. Tensiómetro de fuerza K6 de KRUSS | 49 |
| Figura 22. Montaje experimental para ensayo de Índice Dinámico de Espumabilidad (DFI) | 51 |
| Figure 23. Esquema experimental para la medición de la distribución de tamaño de burbujas | 53 |
| Figura 24. Tensión superficial versus concentración de lignosulfonato a diferentes pH. a) CaLS; b) NaLS | 57 |
| Figura 25. Tensión superficial versus concentración de lignosulfonato a diferentes pH. c) KLS..... | 58 |
| Figura 26. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones a) CaLS pH 6; b) CaLS pH 9. | 60 |
| Figura 27. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones c) NaLS pH 6; d) NaLS pH 9..... | 61 |
| Figura 28. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones. e) KLS pH 6; f) KLS pH 9..... | 61 |
| Figura 29. Tiempo de retención versus concentración de lignosulfonato.a) CaLS pH 6, pH 9; b) NaLS pH 6, pH 9; c) KLS pH 6, pH 9..... | 62 |
| Figura 30. Espumas obtenidas utilizando diferentes lignosulfonatos (NaLS y KLS)..... | 63 |
| Figura 31. Distribución de tamaño de burbujas usando lignosulfonatos. a) CaLS pH y, pH 9; NaLS pH6 y pH 9; KLS pH6 y pH 9..... | 65 |
| Figura 32. El tamaño promedio de burbujas utilizando diferentes lignosulfonatos (muestras CaLS, NaLS y KLS) a pH 6 y pH 9..... | 65 |
| Figura 33. Distribución de tamaño de burbujas a dos concentraciones: 50 mg/L en a) KLS, NaLS y CaLS a pH 6, pH 9 y 800 mg/L en b) KLS, NaLS, CaLS a pH 6, pH 9 ambos a un flujo de 10 L/min. | 66 |
| Figura 34. Agua recuperada en función del tiempo a diferentes concentraciones (muestras CaLS, NaLS y KLS) para pH 6 y pH 9. | 69 |
| Figura 35. Recuperación de agua en un tiempo de 5 minutos usando diferentes lignosulfonatos (CaLS, NaLS y KLS) a un pH 6 y 9..... | 70 |
| Figura 36. Recuperación de agua de los lignosulfonatos a) KLS, b) NaLS y c) CaLS..... | 70 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Caracterización de muestras de lignosulfonato NaLS, CaLS and KLS | 39 |
| Tabla 2. Condiciones de acondicionamiento | 52 |
| Tabla 3. Condiciones de flotación | 52 |
| Tabla 4. Condiciones de acondicionamiento | 56 |
| Tabla 5. Condiciones de flotación | 56 |
| Tabla 6. Valores obtenidos de Índice Dinámico de DFI para los lignosulfonatos | 60 |
| Tabla 7. Distribución de tamaño de burbujas (d32) para el MIBC con respecto a diferentes concentraciones y pH 9..... | 67 |
| Tabla 8. Distribución de tamaño de burbujas (d32) para los lignosulfonatos con respecto a diferentes concentraciones a pH 6 y pH 9..... | 67 |
| Tabla 9. Tensión superficial de CaLS a diferentes concentraciones..... | 85 |
| Tabla 10. Tensión superficial de NaLS a diferentes concentraciones..... | 85 |
| Tabla 11. Tensión superficial de KLS a diferentes concentraciones..... | 85 |
| Tabla 12. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de MIBC pH=9 | 86 |
| Tabla 13. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de CaLS pH=6 | 86 |
| Tabla 14. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de CaLS pH=9 | 86 |
| Tabla 15. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de NaLS pH=6 | 87 |
| Tabla 16. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de NaLS pH=9 | 87 |
| Tabla 17. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de KLS pH=6 | 87 |
| Tabla 18. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de KLS pH=9 | 88 |

| | |
|---|----|
| Tabla 19. Distribución de tamaño de burbujas para el MIBC a pH=9 | 89 |
| Tabla 20. Distribución de tamaño de burbujas para el CaLS a pH=6 | 90 |
| Tabla 21. Distribución de tamaño de burbujas para el CaLS a pH=9 | 91 |
| Tabla 22. Distribución de tamaño de burbujas para el NaLS a pH=6 | 92 |
| Tabla 23. Distribución de tamaño de burbujas para el NaLS a pH=9. | 93 |
| Tabla 24. Distribución de tamaño de burbujas para el KLS a pH=6 | 94 |
| Tabla 25. Distribución de tamaño de burbujas para el KLS a pH=9 | 95 |
| Tabla 26. Datos de recuperación de agua versus concentración de MIBC a pH=9 | 96 |
| Tabla 27. Datos de recuperación de agua versus concentración de CaLS a pH=6 y pH=9 | 96 |
| Tabla 28. Datos de recuperación de agua versus concentración de NaLS a pH=6 y pH=9 | 96 |
| Tabla 29. Datos de recuperación de agua versus concentración de KLS a pH=6 y pH=9 | 96 |



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El papel principal de un espumante es proporcionar una fase de espuma estable, que permita la separación de los componentes hidrofóbicos de la fase de la pulpa durante el proceso de flotación. Para la formación de las espumas esta debe presentar diferentes características donde estas se relacionen directamente con el tamaño de las burbujas es por eso que para que una espuma presente dichas características estas deben presentar una espuma relativamente consistente para presentar una estabilidad en la espuma, la capacidad de dispersar el aire en la celda de flotación así como la velocidad de coalescencia de las burbujas individuales en la celda y la velocidad de ascenso de la burbuja hacia la superficie, todas estas características se relacionan directamente con el comportamiento de las burbujas (Gómez, 2012).

La estructura de las espumas cambia con el tiempo al adelgazar a aproximadamente 100 nm o menos, toma la forma de poliedros que se encuentran a 120 grados en los puntos de unión (Pugh, 2005). La estabilidad de la espuma también depende de: (a) el tamaño de partícula (partículas más finas estabilizan la espuma); (b) las características de humectación (las partículas que tienen ángulos de contacto inferiores a 90 grados estabilizan la espuma); y (c) la forma de las partículas (Cho and Laskowski, 2002; Tan et al, 2005).

Una característica común de la mayoría de los espumantes comerciales es su naturaleza heteropolar que consiste en un grupo polar no iónico que exhibe un carácter hidrofílico acoplado con una cadena hidrocarbonada no polar hidrofóbico. Este carácter no iónico o neutro generalmente se asocia con moléculas de tamaño suficientemente pequeño para que no se produzca la unión múltiple de Van der Waals en la porción no polar de la molécula, dando lugar a espuma excesivamente estable. En general, se acepta que agregar un agente tensoactivo al agua disminuye la tensión superficial de la solución debido a la naturaleza heteropolar de las moléculas reactivas (Rosen, 1978). Por lo tanto, la

tensión superficial de una solución es uno de los indicadores de la actividad de un espumante. Los espumantes que reducen fuertemente la tensión superficial producen espumas más estables (Klimpel and Hansen, 1988).

Si bien la imagen conceptual anterior es cualitativamente correcta, el uso de mediciones de tensión superficial sólo para detectar espumantes para su aplicación en flotación es limitado. Esto se debe en parte a la naturaleza altamente dinámica de la espuma, especialmente en presencia de partículas y turbulencias. La ciencia que estudia en la selección y el diseño del espumante no se entiende claramente y hay pautas generales para este propósito disponibles en la literatura (Klimpel and Hansen, 1988).

Es por esto que se plantea la necesidad de determinar mediante cuatro técnicas de caracterización en un sistema bifásico (líquido/gas) el efecto espumante que presentan tres Lignosulfonatos (KLS, NaLS y CaLS) con diferentes pesos moleculares y a diferentes pH, donde la solución a utilizar es agua Milli-Q (agua desmineralizada) en un sistema estático y dinámico. La hipótesis de trabajo es que los lignosulfonatos presentan un efecto tensoactivo, lo que influye directamente en el tamaño de burbujas, estabilidad de las espumas y recuperación de agua en el proceso de flotación (Gutiérrez et al., 2019). Esta hipótesis se sustenta en los resultados obtenidos por Gutiérrez et al. (2019) que evidenciaron que los lignosulfonatos aparte de depresar la molibdenita generaban un efecto espumante importante.

Las técnicas a emplear en esta tesis para la caracterización del efecto espumante de los lignosulfonatos son:

- Medición de la tensión superficial.
- Índice dinámico de espumabilidad (DFI).
- Medición de distribución de tamaños de burbuja.
- Recuperación de agua.

1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto espumante que presentan los lignosulfonatos (KLS, NaLS, CaLS) en un sistema bifásico (agua-aire), con énfasis en el estudio del comportamiento tensoactivo en la espumación presente en el proceso de flotación.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de los lignosulfonatos en la tensión superficial de las soluciones a través del método del anillo de Lecomte du Nouy, en función del pH entre 6 y 11.
- Evaluar el efecto de los lignosulfonatos en la generación de espumas mediante el Índice dinámico de espumabilidad (DFI) un sistema bifásico (aire-agua) en función a pH 6 y pH 9.
- Evaluar mediante el método de análisis de imagen el efecto de los lignosulfonatos en la distribución de tamaño de burbujas mediante el uso del visor de burbujas en función a pH 6 y pH 9.
- Evaluar el efecto de los lignosulfonatos en la recuperación de agua por la generación de burbujas en un sistema bifásico en función a pH 6 y pH 9.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS DE FLOTACIÓN DE MINERALES

2.1.1 Descripción del proceso de flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico, que tiene por objetivo la separación y recuperación selectiva de partículas minerales valiosas finamente molidas desde una pulpa o suspensión. Este proceso se realiza en una celda de flotación, mediante la agitación del sistema, inyección de aire y el empleo de reactivos.

El proceso de flotación es un sistema multifásico, es decir, posee una fase líquida (agua), una fase sólida (minerales solidos) y una fase gaseosa (Yianatos, 2005).

La base de este proceso radica en la diferencia de mojabilidad que existe entre los distintos minerales. Las partículas pueden ser muy afines con el agua (mineral hidrofílico) o pueden no serlo (mineral hidrofóbico).

Las propiedades superficiales de las partículas hidrofóbicas que están en la suspensión acuosa (pulpa) hacen que estas se adhieran a las burbujas de aire en el sistema, formando agregados partícula-burbuja como se muestra en la Figura 1 (Whelan and Brown, 1956).

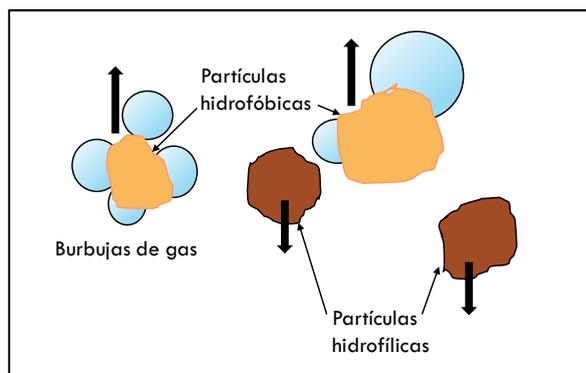


Figura 1. Adhesión selectiva entre las burbujas y las partículas hidrofóbicas (Fuente; adaptado de Whelan and Brown, 1956).

Estos agregados suben hasta la superficie de la celda para formar el concentrado mediante una espuma estable dejando de lado las partículas hidrofílicas las cuales se mantienen en suspensión, formando parte de las colas del proceso (Figura 2).

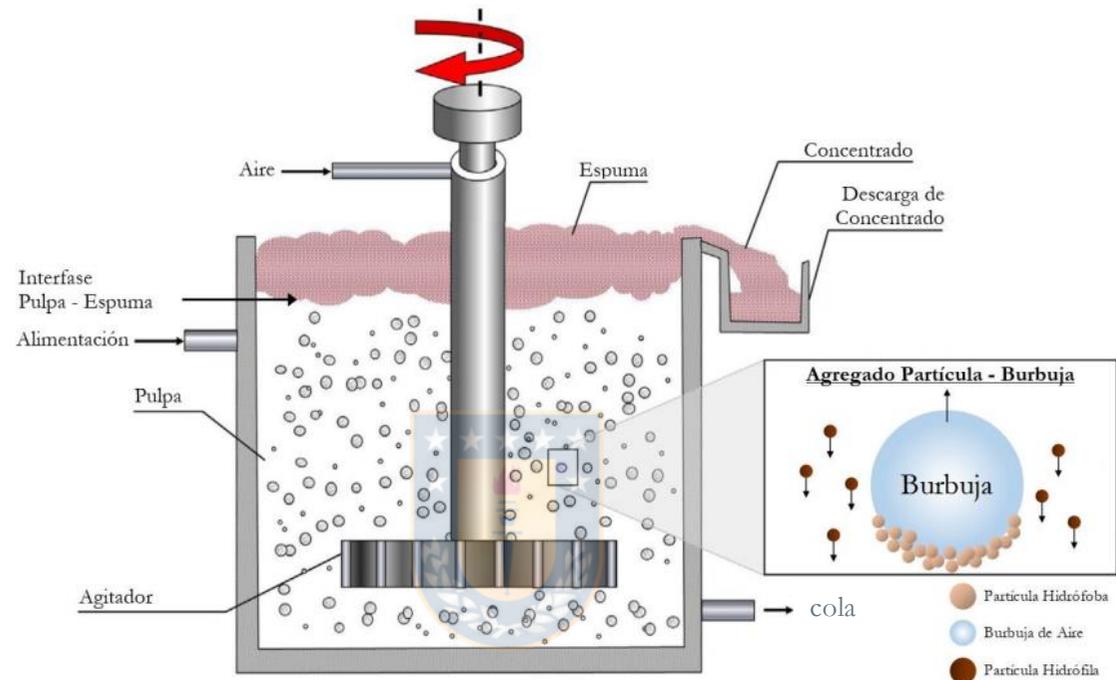


Figura 2. Diagrama del proceso de flotación y esquema del agregado partícula – burbuja, (Fuente: adaptado de Wills and Finch, 2015).

La hidrofobicidad en las partículas puede ser natural como lo es el caso de la molibdenita, carbón, talco o inducida mediante el empleo de reactivos químicos denominados colectores que cambian las propiedades superficiales de las partículas (minerales de Cobre como la calcopirita, calcosina o covelina requieren de estos reactivos para realizar la flotación). El proceso de flotación también requiere de la adición de espumantes y modificadores para el óptimo funcionamiento de este proceso. Así, colectores, espumantes y modificadores forman parte de los reactivos de flotación de minerales (Gutiérrez, 2018).

2.1.2 Físicoquímica de superficies

El proceso de flotación de minerales es un proceso que involucra el estudio de las propiedades superficiales de las interfases generadas por la interacción de las fases aire, mineral y agua, es por ello que la fisicoquímica de superficies toma una gran importancia en este proceso. Los fenómenos de interfases se generan como resultado del exceso de energía que existe en las superficies de contacto entre aire, mineral y agua como producto de la presencia de enlaces que no están copados por átomos o moléculas de su misma naturaleza. En el caso de la interfase agua/aire en general se habla de tensión superficial (γ) que es equivalente al aumento de la energía de Gibbs por unidad de área obtenido producto de este cambio a presión, temperatura y número de moles constantes. Un correcto control en la tensión superficial del agua es crítico en el proceso de flotación ya que permite generar burbujas de aire de tamaños pequeños y estables. Para cumplir esto se emplean los reactivos de flotación llamados espumantes los cuales reducen la tensión superficial del agua promoviendo la generación de burbujas pequeñas y estables (Castro, 2003).

El proceso de flotación se basa en la diferencia de mojamamiento existente entre las partículas valiosas y no valiosas de un mineral. Una forma ampliamente usada para cuantificar la mojabilidad de un material es mediante la medición del parámetro ángulo de contacto (θ). Este parámetro corresponde al ángulo medido a través de la fase líquida formado por la tangente a una gota de agua en su punto de confluencia entre las fases sólida, líquida y gaseosa (punto triple) y la interfase sólido-líquido. En equilibrio, este ángulo está gobernado por las leyes de la mecánica y depende del equilibrio de energías superficiales entre las distintas fases, tal como se esquematiza en la Figura 3 (Leja, 1982).

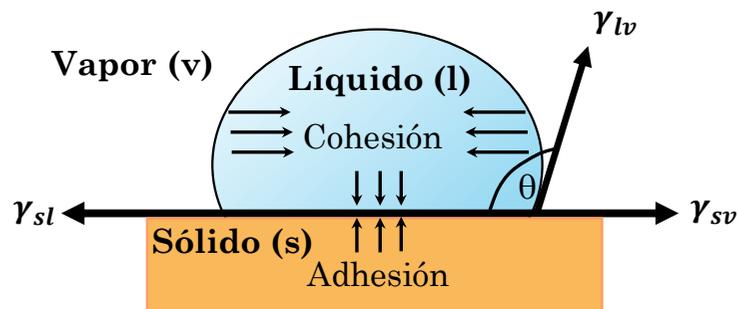


Figura 3. Ángulo de contacto (Fuente: adaptado de Gutiérrez, 2018).

Si el ángulo de contacto es mayor a 90° , la superficie es más hidrofóbica y el agua tiende a no mojar la superficie. Si por el contrario el ángulo de contacto es menor a 90° el líquido tiende a mojar más al sólido y la superficie es más hidrofílica. Young (1805) planteó el balance de fuerzas de la Ecuación (1) para correlacionar las tensiones interfaciales y el ángulo de contacto en el que también se puede reescribir de la siguiente manera Ecuación 2.

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} * \cos\theta \quad (1)$$

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2)$$

La adhesión partícula-burbuja es una función de la hidrofobicidad de las partículas minerales, las que pueden mostrar hidrofobicidad natural (molibdenita, grafito, carbón, talco, azufre, pirofilita) o hidrofobicidad inducida por colectores (sulfuros de cobre, sales de potasio, fosfatos, minerales de hierro). En general, las superficies que tienen enlaces no copados de baja energía son más hidrofóbicas que aquellas que poseen enlaces libres de alta energía. La interacción hidrofóbica partícula-burbuja se ha relacionado con la existencia de las fuerzas hidrofóbicas que al igual que las de van de Waals son de atracción y poseen una mayor magnitud que las originadas por las de van der Waals (Leja, 1982) (ver Figura 4).

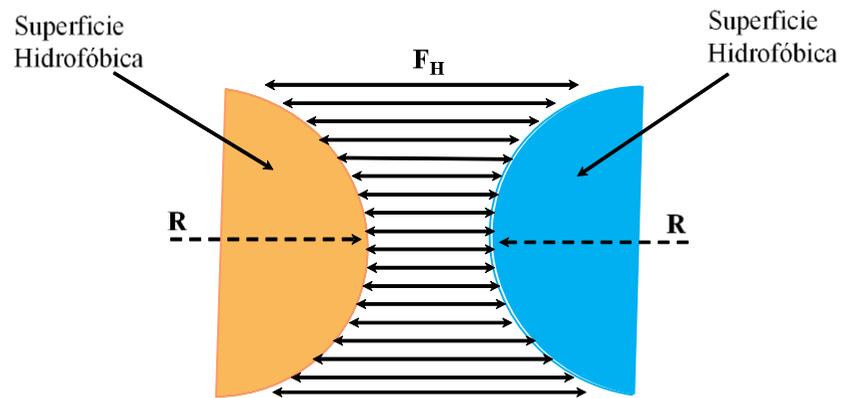


Figura 4. Representación fuerzas ejercida entre dos superficies hidrofóbicas
(Fuente: adaptado de Gutiérrez, 2018).

2.1.3. Flotación de Cobre y Molibdeno

Aproximadamente el 50% de la producción mundial de molibdeno proviene de yacimientos en los cuales el molibdeno se encuentra junto a minerales sulfurados de cobre (Bulatovic, 2007). La obtención de molibdeno requiere un método de concentración para separar la molibdenita (MoS_2) de los minerales sulfurados de cobre y del mineral no valioso (ganga).

La roca original que contiene esta mezcla de minerales ricos en cobre y molibdeno es inicialmente sometida a un proceso de conminución, que consta de dos etapas, chancado y molienda. La etapa de chancado puede requerir una reducción de tamaño primaria, secundario y hasta terciario, dependiendo de la dureza y tipo de mineral. Posteriormente, se lleva a cabo la molienda, donde el mineral es sometido a otra reducción de tamaño en húmedo hasta lograr el tamaño requerido para la flotación. Este proceso que también puede requerir hasta de 3 etapas de molienda. Pasado este proceso, el producto es llevado a una etapa de clasificación por tamaños, donde un equipo de hidrociclones se encarga de separar el material grueso del fino, siendo este último llevado a la etapa de flotación y el material grueso recirculado en la etapa de molienda.

La flotación consta de dos etapas (ver Figura 5):

1. Flotación colectiva, en la cual la ganga es removida en un gran porcentaje y se flotan los sulfuros de cobre y la molibdenita en conjunto.
2. Flotación selectiva, en donde el mineral de cobre es separado de la molibdenita.

Para llevar a cabo la etapa de flotación colectiva, los minerales sulfurados ricos en cobre (calcopirita, calcocita, bornita, entre otros) requieren de la adición de un colector que recubre su superficie haciéndolos pasar de hidrofílicos a hidrofóbicos, para poder ser flotados en conjunto con la molibdenita. Debido a la acción del colector y la naturaleza hidrofóbica de la molibdenita, ambos minerales se adhieren a las burbujas dispersas dentro de la celda de flotación, logrando así colectarse en la parte superior de la celda haciendo parte del concentrado y la ganga quedando como cola de flotación.

En la etapa selectiva el proceso habitual comprende de la inhibición de la flotación de minerales de cobre mediante el empleo de un modificador, el cual tiene como objetivo destruir el recubrimiento del colector existente en la superficie de estos minerales, obteniéndose un sistema en el cual los sulfuros de cobre pasan a ser hidrofílicos, mientras que la molibdenita mantiene sus características hidrofóbicas y por ende su flotabilidad. En este caso la molibdenita flota libremente y los minerales de cobre quedan retenidos en la celda como cola.

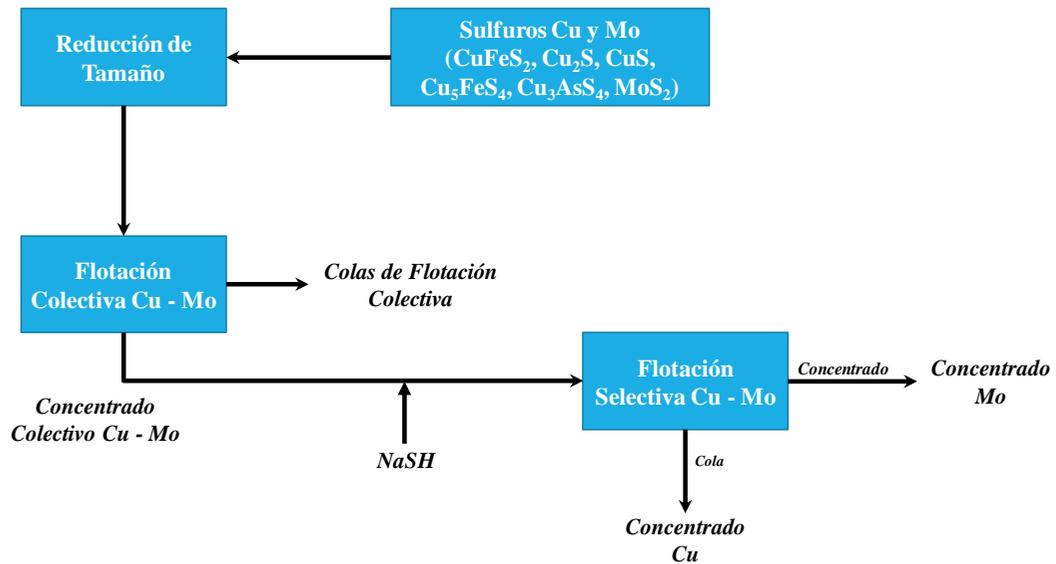


Figura 5. Ejemplo circuito común para minerales de Cu-Mo (Fuente: adaptado de Gutiérrez, 2018).

Existen varios métodos para lograr la separación del mineral de Cu-Mo, el uso de uno u otro método dependerá de la composición mineralógica que presente el concentrado colectivo (calcopirita o calcocita presente como mineral de cobre primario) y del tipo de colector utilizado en la flotación colectiva (xantatos como único colector o utilización de ditiofosfatos o tionocarbamatos) (Bulatovic, 2007). Algunos de los métodos de separación más importantes utilizados en la industria son:

- Método de tostación
- Tratamiento con vapor
- Método de ferrocianuro
- Método de NOKES
- Método de sulfuros

De los métodos anteriormente mencionados, el método de sulfuros es el más utilizado, este involucra la utilización de sulfhidrato de sodio (NaSH) como depresante de minerales de cobre en la flotación selectiva. La utilización de este

método requiere que en la flotación colectiva de Cu-Mo se haya utilizado un colector del tipo xantato (Bulatovic, 2007).

El NaSH adicionado a una pulpa de flotación alcalina se disocia para estar en equilibrio con iones Na^+ , iones hidroxilos (OH^-) y gas sulfhídrico (H_2S) tal como lo muestra la Ecuación 3 (Dávila, 2012)



A su vez, el gas sulfhídrico se disocia además en las siguientes especies (Dávila, 2012).



Los iones OH^- , HS^- y S^{2-} , son producto de la hidrólisis y disociación del NaSH, que reaccionan con la superficie del mineral, siendo los iones HS^- y S^{2-} los más activos. La disociación del H_2S ocurre entre pH 7,0 y 13,9 (véase Figura 6) con una predominante formación de HS^- . Por otro lado, la especie predominante bajo el pH 7,0 es el gas sulfhídrico (H_2S), un gas altamente tóxico.

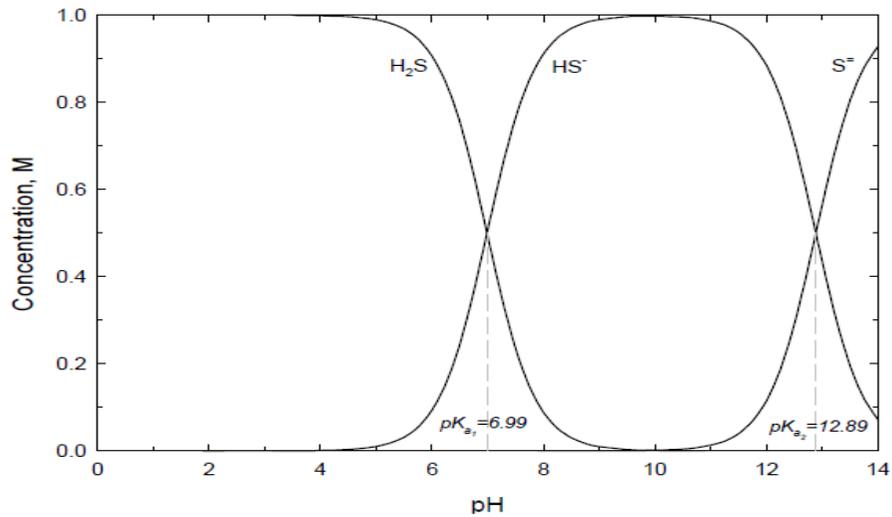


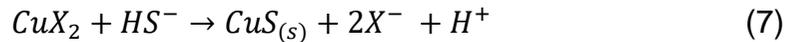
Figura 6. Diagrama de estabilidad del NaSH (Fuente: Gómez and Kracht, 2009).

Frente al mecanismo de acción del NaSH con los sulfuros se han propuesto (Castro, 2006) dos mecanismos de acción los cuales comprenden:

1. Destrucción del compuesto xantato-metálico (CuX_2) generado en la superficie de las partículas de mineral.
2. Reducción del dixantogeno a xantato.

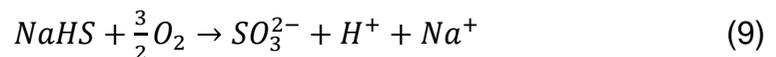
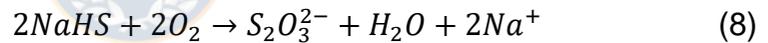
De acuerdo al primer mecanismo se produce la destrucción del compuesto xantato-metálico de Cu (CuX_2) el cual es hidrofóbico, se debe a la presencia de iones S^{2-} y HS^- disueltos en la pulpa debido a la disociación del NaSH. En este proceso, el ion S^{2-} se une al Cu del xantato-metálico, destruyendo este compuesto y formando CuS, un compuesto altamente insoluble. La constante del producto de solubilidad (K_{ps}) del etil xantato de cobre es $K_{ps} \text{CuX}_2 = 5,0 \times 10^{-20}$ mientras que el K_{ps} del CuS es de $K_{ps} \text{CuS} = 8,0 \times 10^{-37}$, por lo tanto, en presencia de S^{2-} el xantato-metálico (CuX_2) es inestable, precipitando el Cu como CuS (ver Ecuación 6). De la misma forma, el ion HS^- destruye el compuesto xantato-metálico dando lugar a la formación de CuS (ver Ecuación 7).





De acuerdo al segundo mecanismo se produce que el NaSH en solución (HS^-) genere condiciones fuertemente reductoras, lo que da lugar a pulpas de bajos valores de potencial redox (-400 a -600 mV/Ag/AgCl). En estas condiciones, el compuesto dixantogeno (X_2) se reduce al ion xantato (X^-) y por consiguiente el mineral recupera sus características hidrofílicas, inhibiéndose así su flotación (Gutiérrez, 2018).

Es importante hacer notar que la planta industrial el proceso de flotación selectiva se lleva a cabo empleando nitrógeno (N_2) como gas o aire enriquecido en gas sulfhídrico, esto es debido a que si se empleara aire sin N_2 y contenido en oxígeno, en presencia de NaSH ambos interactuarían para descomponerse en tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$) e iones sulfitos (SO_3^{2-}) (ver Ecuaciones 8 y 9), lo que generaría un mayor consumo de este reactivo (Gutiérrez, 2018).



Gutiérrez et al., (2019), plantearon la hipótesis de que se podía lograr una separación selectiva de calcopirita y molibdenita por flotación utilizando lignosulfonatos en lugar de NaSH. La conclusión son que la flotación de molibdenita puede verse deprimida por la acción de los lignosulfonatos, y dicho efecto depresor aumenta con el pH debido a las interacciones entre los lignosulfonatos con los sitios de calcio metálico existentes en la superficie de las partículas minerales. Los resultados presentados sobre el efecto de los lignosulfonatos sobre la flotación de calcopirita, se obtuvieron utilizando SIPX como colector. Sin embargo, la recuperación de calcopirita en presencia de lignosulfonato no se ve afectada cuando se usa PAX como colector. PAX es un

colector de cadena larga, más fuerte que SIPX, que hace que la superficie de la calcopirita sea ampliamente hidrófoba y previene las interacciones con las moléculas de lignosulfonato (Leja, 1982). Los resultados obtenidos sugieren que el colector de cadena larga puede prevenir la adsorción de lignosulfonatos en calcopirita, pero no la adsorción de estos reactivos en molibdenita.

2.2 REACTIVOS DE FLOTACIÓN

Para realizar el proceso de flotación, se requiere del uso de reactivos químicos, tales como colectores, espumantes y modificadores. Dentro de la última categoría, se encuentran los activadores, depresores, dispersantes y modificadores de pH.

Colectores

Los colectores pueden ser definidos como una sustancia química orgánica en la cual su estructura molecular está dividida en una parte polar y otra no polar. La parte polar del ion se adsorbe sobre la superficie del mineral. Por otro lado, la parte apolar de la molécula de colector es un radical hidrocarbonado el cual queda expuesto hacia el agua (Bulatovic, 2007). De esta manera el colector induce hidrofobicidad a las partículas (ver Figura 7).

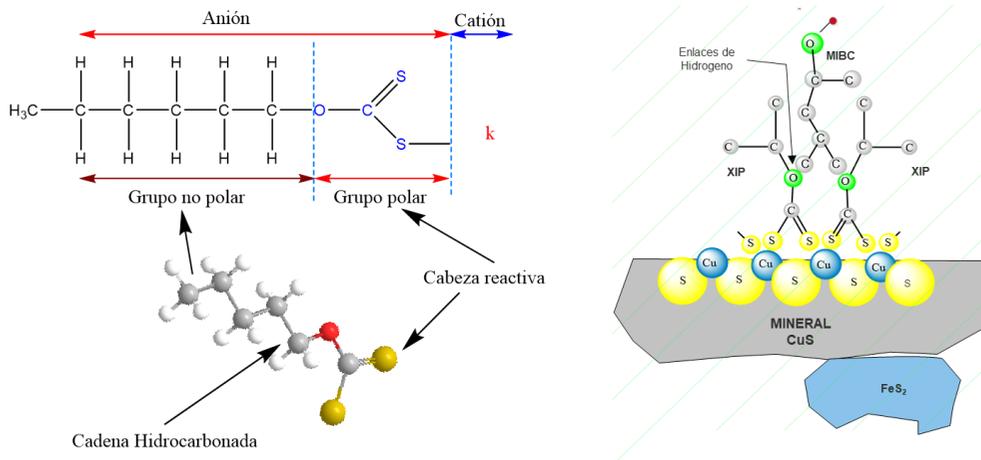


Figura 7. Diagrama general de reactivos colectores (Fuente: adaptado de Glembotskii et al., 1972)

El ángulo de contacto depende de la parte apolar del colector, es decir, mientras más larga sea la cadena del hidrocarburo, mayor será el ángulo de contacto y por lo tanto mayor será la hidrofobicidad adquirida por el mineral (Gutiérrez, 2018).

Los colectores se dividen en dos grandes categorías, los no ionizables y los ionizables. Estos últimos se dividen en dos grupos (Gutiérrez, 2018):

1. *Colectores aniónicos*: son el grupo más ampliamente utilizado en la flotación. Se caracterizan porque su parte polar posee una carga negativa que se adsorbe sobre una carga positiva. Entre los colectores más conocidos de sulfuros metálicos se encuentran los xantatos.

2. *Colectores catiónicos*: se caracterizan porque su parte polar posee una carga positiva que se adsorbe a una superficie con carga negativa. Entre los colectores más conocidos están las aminas y sales cuaternarias de amonio. Estos colectores son menos selectivos que los aniónicos y rara vez quedan adsorbidos de manera absolutamente específica a un mineral determinado. Por ello es necesario potenciar su selectividad mediante reactivos reguladores (activadores o depresantes), variando el pH o dosificando correctamente.

Espumantes

Los espumantes son compuestos tensoactivos heteropolares que contienen un grupo polar (OH, COOH, C=O, OSO₂ y SO₂OH) y un radical hidrocarbonado (ver Figura 8), capaz de adsorberse en la interfaz agua-burbuja (Bulatovic, 2007).

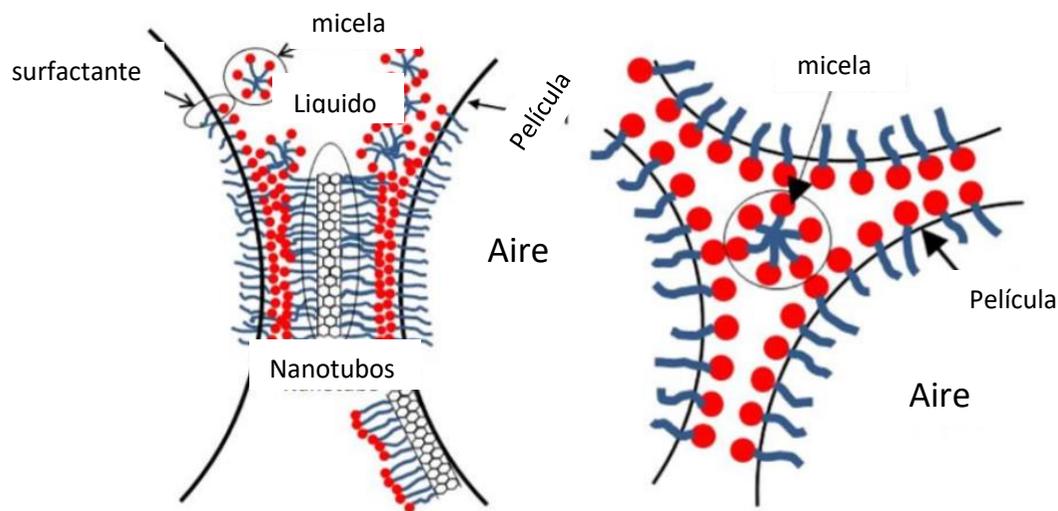


Figura 8. Representación esquemática de la adhesión del espumante a la burbuja de gas (Fuente: Wang et al, 2017).

En la flotación es necesario incorporar burbujas de aire, que al colisionar con las partículas de mineral puedan formar la adhesión partícula-burbuja. La estabilidad de esta adherencia dependerá de la eficacia del espumante. El espumante además modifica las propiedades superficiales de la burbuja para reducir la coalescencia, fenómeno que ocurre dentro del sistema espontáneamente y hace que las burbujas crezcan. Estos reactivos presentan propiedades tensoactivas, ósea que disminuyen la tensión superficial del agua, lo que ayuda a mantener la estabilidad del colchón de espuma formado en la superficie, evitando así el rompimiento de las burbujas. Los espumantes más comunes son los que contienen el grupo hidroxilo (OH^-) como por ejemplo el aceite de pino ($\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{OH}$), cresoles ($\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{OH}$) y el metilisobutil carbinol ($\text{C}_6\text{H}_{13}\text{OH}$), más conocido como MIBC (Yianatos, 2005).

Modificadores

Son reactivos que permiten manejar las condiciones fisicoquímicas del sistema para mejorar la eficiencia del proceso de flotación (Gutiérrez, 2018).

Dentro de esta categoría se define 4 tipos:

- Reguladores de pH: los más comunes son la cal (CaO), el hidróxido de sodio (NaOH), el carbonato de sodio (Na₂CO₃) y los ácidos fuertes como el ácido clorhídrico (HCl) y el ácido sulfúrico (H₂SO₄).
- Dispersantes: pueden ser de tipo inorgánico como los polifosfatos (P_nO_{3n+1})⁽ⁿ⁺²⁾ y los poli-silicatos (mNa₂.nSiO₂) que hidrolizan y aumentan el pH; o del tipo orgánico, como los polisacáridos (dextrinas, almidones, celulosas, gums), los polifenoles y los poliacrilatos.
- Depresantes: induce hidrofiliidad en las partículas hidrofóbicas y pueden ser del tipo inorgánico como los cianuros, silicatos, iones polivalentes (Ca y Mg) y el NaSH que previenen la interacción entre el colector y los minerales; o del tipo orgánico como los polisacáridos o los ácidos húmicos.
- Activadores: dentro de esta categoría encontramos surfactantes catiónicos, cationes polivalentes y aniones polivalentes, inducen hidrofobicidad.

Lignina

La lignina es un polímero heterogéneo, con red ramificada tridimensional formado por unidades básicas de fenilpropano (Marianni, 2000). Después de la celulosa, la lignina se considera como el material orgánico de origen natural más abundante del planeta. Su contenido en la madera varía entre 19% y el 35% (Dence and Lin, 1992). La lignina se extrae de la madera utilizando diferentes técnicas. Recientemente, en el proceso de producción de bioetanol, la lignina se obtiene como subproducto de bajo precio en grandes cantidades. Las ligninas técnicas se distinguen en dos categorías (Gosselink et al., 2004).

- La primera categoría incluye las ligninas sin azufre en su composición, obtenidas a través de diferentes procesos, la mayoría de ellas aún no son comercializadas (Rolleri, 2013).
- La segunda categoría la constituyen las ligninas comerciales con azufre en su contenido que incluyen los lignosulfonatos y la lignina kraft existentes desde ya hace mucho tiempo y cuya producción es la más elevada.
- El lignosulfonato se encuentra en grandes cantidades a nivel comercial (hasta 1 millón de toneladas de sólido por año) y kraft está disponible comercialmente en cantidades moderadas de hasta 100.000 toneladas por año. (Gosselink et al., 2004). Estas ligninas convencionales mayoritariamente usadas en la industria se obtienen de coníferas.

Los lignosulfonatos son empleados principalmente como reductores del contenido de agua en el concreto (Lebo et al., 2007). Una adición entre un 0,1 a un 0,3% de lignosulfonatos aumenta la resistencia del concreto, y adicionalmente retarda el fraguado, razón por la cual se estima que el 50% de los lignosulfonatos producidos mundialmente son usados para mezclas de concreto (Gargulak and Lebo, 1999; Nimz, 2003). La segunda aplicación más importante es como aglutinante para la fabricación de alimento concentrado para animales, donde una dosis máxima del 4% de lignosulfonato es permitida para la elaboración del producto final. Existen otras funciones de los lignosulfonatos relacionado con el petróleo, donde sales de lignosulfonato de cromo y ferrocromo son usados en lodos de perforación de petróleo como diluyentes de lodo, acondicionadores de arcillas, agentes de control de viscosidad y aditivos de pérdidas de fluidos (Goheen et al., 1971; Nimz, 2003).

Por otro lado, teniendo en cuenta la diversidad de propiedades químicas que presentan los lignosulfonatos, se han realizado numerosas investigaciones para el uso en el área de procesamiento de minerales, específicamente en los procesos de concentración.

Mathieu and Bruce (1974) usaron sales de lignosulfonato para separar talco a partir de minerales de molibdenita observando que depresaban la molibdenita sin afectar la flotación de talco a concentraciones normales, aun cuando el contenido de talco en la muestra excedía el 1%. También encontraron que la flotabilidad de la molibdenita depresada por el lignosulfonato podía ser restaurada mediante la adición de queroseno.

Arsentiev and Leja (1977) probaron los lignosulfonatos como floculantes de arcilla en la flotación de KCl a partir de minerales de potasio que contenían 5% de arcilla. En esta aplicación en particular no logró depresar las arcillas sin afectar la flotación del mineral de potasio. Específicamente, notaron que, al adicionar lignosulfonatos, a pesar de observar un decrecimiento sustancial en la recuperación de la arcilla, ocurría también una recuperación reducida de minerales de potasio.

Lu and Sun (1999) experimentaron con los lignosulfonatos en la recuperación de fósforo en procesos de flotación. En este estudio se encontró que el lignosulfonato de sodio conocido como L339, utilizado para reemplazar el silicato de sodio como depresor de ganga, mejoró significativamente el rendimiento de la flotación de la planta, debido a la remoción exitosa de más del 95% de los minerales de ganga, incluyendo dolomita, calcita y minerales de hierro, aluminio y sílice. Los estudios del mecanismo de depresión del L339 mostraron que el lignosulfonato interactúa con los ácidos grasos para formar un complejo, el cual promueve la adsorción del colector en la fluorapatita, esto aumenta la diferencia de mojabilidad entre la apatita y los minerales carbonatados de la ganga.

Grigg and Bai (2004) llevaron a cabo estudios de adsorción y desorción con un lignosulfonato de calcio en areniscas, este estudio se enfocó en los surfactantes usados para el control de la movilidad y la desviación del fluido causado por la espuma en los surfactantes en base a aceites en los procesos de recuperación. Los estudios mostraron que la densidad de adsorción de los lignosulfonatos fue influenciada por su concentración en la solución, la temperatura, la salinidad y la

tasa de inyección. También observaron que la adsorción y desorción no era completamente reversible.

Ma and Pawlik (2005), utilizaron los lignosulfonatos como depresantes de talco y observaron una completa depresión de la flotación de talco a altos valores de pH al emplear cal para ajustar el pH. Plantearon que el efecto de la cal en el sistema era proporcionar iones de calcio los cuales se adsorbían en la superficie del talco, para luego activar la superficie y adsorber así el lignosulfonato. Mediante este estudio se observó también que la densidad de adsorción del talco disminuía con el aumento de la carga aniónica en los reactivos, y plantearon que las fuerzas electrostáticas eran las responsables del proceso de adsorción del mineral.

Ansari and Pawlik (2007 a, b) estudiaron la flotabilidad de la calcopirita y de la molibdenita en presencia de lignosulfonatos. Los resultados de este estudio sugieren que podría ser posible separar selectivamente calcopirita de la molibdenita, depresando la molibdenita con la utilización de lignosulfonatos. Un par de los lignosulfonatos testeados, resultaron ser reactivos que no afectaron la flotabilidad de la calcopirita a pH natural (pH 5,5) o débilmente alcalino, mientras que al mismo tiempo deprimen por completo la flotabilidad natural de la molibdenita.

Gutiérrez et al., (2019) investigaron el uso de lignosulfonatos de bajo peso molecular, obtenidos por sulfometilación de lignina kraft, como depresores de molibdenita. Los lignosulfonatos kraft (KLS) se produjeron haciendo reaccionar lignina kraft con sulfito de sodio y formaldehído, y su desempeño como depresores de molibdenita se comparó con el de los lignosulfonatos disponibles comercialmente (CLS) de pesos moleculares más altos. También estudiaron el efecto de diferentes colectores de cobre sobre la flotación de la calcopirita en presencia de lignosulfonatos para buscar opciones que eviten el efecto depresor de los lignosulfonatos sobre la calcopirita. Ellos estudio plantea que se podía lograr una separación selectiva de calcopirita y molibdenita por flotación

utilizando lignosulfonatos en lugar de NaSH utilizaron un colector más potente. Este enfoque se evaluó probando el efecto de los lignosulfonatos, producidos al reaccionar lignina kraft con sulfito de sodio y formaldehído, y lignosulfonatos disponibles comercialmente, sobre la flotación de molibdenita y calcopirita. La caracterización química de los lignosulfonatos se realizó mediante la determinación de masa molecular, análisis elemental, transformada de Fourier para infrarrojo y espectroscopía de masas con plasma acoplado inductivamente. Además, estudiaron las interacciones entre molibdenita y lignosulfonatos mediante mediciones de movilidad electroforética. Donde concluyen que la flotación de la molibdenita puede verse deprimida por la acción de los lignosulfonatos, y dicho efecto depresor aumenta con el pH debido a las interacciones entre los lignosulfonatos con los sitios de calcio metálico existentes en la superficie de las partículas minerales. Los resultados experimentales indicaron que los lignosulfonatos pueden deprimir la flotación de calcopirita cuando se utiliza xantato isopropilo de sodio como colector, pero exponen que este efecto puede mitigarse por completo utilizando amil xantato de potasio como colector, posibilitando así la posible separación de ambos minerales.

2.3 MECANISMO DE FORMACIÓN DE ESPUMAS

Las espumas son sistemas en los que un gas constituye la fase dispersa y un líquido la fase continua. La fase gaseosa se esparce a lo largo de toda la fase líquida, de manera que las cavidades o burbujas de gas quedan separadas por finas películas de líquido. La estabilidad de estas delgadas películas de líquido son las que determinan la estabilidad global de la espuma. Las dos fases que conforman la espuma están íntimamente ligadas y forman una estructura que se torna más ordenada a medida que la cantidad de gas aumenta. Para que este tipo de sistemas reciba el nombre de espuma, la concentración de la fase dispersa debe ser elevada. El tamaño de las burbujas que constituyen la espuma depende de factores hidrodinámicos complejos, sin embargo, la forma de las

burbujas generadas no depende del método empleado para su producción, sino de la concentración de la fase gaseosa en la espuma. Las espumas que contienen poco líquido (espumas secas), presentan un contacto mayor entre las burbujas, debido a que ocurre un deslizamiento mínimo y el empaquetamiento conlleva a la formación de líquido entre ellas. Mientras las espumas con un elevado contenido de líquido o espumas húmedas muestran un contacto entre las burbujas mínimo y no hay empaquetamiento, lo cual facilita el deslizamiento entre ellas. Para el caso de espumas no acuosas, las burbujas tienen forma esférica y se encuentran separadas por una capa gruesa de líquido (Rosen, 1978).

Para que una espuma pueda formarse, se requiere:

1. *Trabajo mecánico (energía)*: agitación o burbujeo de gas el cual se hace para incrementar el área interfacial entre el gas y el líquido y al mismo tiempo para que las moléculas del agente espumante ocupen dicha área formada (Empuje de Arquímedes).
2. *La presencia de agente espumante*: el agente espumante es un compuesto que se ubicará en la interfase gas-líquido, provocando una disminución en la tensión superficial del líquido a espumar.
3. *Velocidad de formación de las burbujas mayor que la velocidad de colapso de las mismas*: de manera que la espuma aumente su volumen a medida que transcurre el tiempo.

2.3.1 Mecanismos y causas de colapso de las espumas

Los mecanismos de colapso de espuma que tienen lugar durante el proceso de decaimiento de las espumas, pueden clasificarse en 4 tipos.

1. Drenaje de líquido

Este tipo de mecanismo de colapso de las burbujas se debe a la acción de la gravedad y a la tensión superficial y está basado en el hecho de que el espesor de las películas interburbujas decrece hasta que las burbujas alcanzan un espesor crítico y se rompen espontáneamente (Rodríguez, 1998). Este mecanismo es muy importante sobre todo en los primeros instantes de la vida de una espuma, cuando las películas son gruesas, porque tienen una gran cantidad de líquido que poco a poco va disminuyendo. La velocidad con que ocurre este mecanismo está afectada por la viscosidad del líquido, ya que cuanto más viscoso sea el líquido mayor será la estabilidad de la espuma generada.

Después que ocurre el fenómeno de drenaje por acción de las fuerzas gravitatorias, comienza a ocurrir el llamado drenaje por diferencia de presión o por succión capilar, entrando en evidencia los conocidos como bordes de Plateau (Brady and Ross, 1944), debido a que la espuma comienza a tornarse seca. En ese momento se forman estructuras planas y poliedros colindantes y donde se unen tres o más películas habrá una curvatura que será mayor que la que existe en los bordes planos, lo que genera una diferencia de presión en varios puntos de la lamela ocasionando una succión capilar, que conlleva al desplazamiento de líquido, es decir, los líquidos son drenados hacia los bordes de Plateau Figura 9.

2. Difusión de gas entre las burbujas

Este mecanismo tiene importancia entre burbujas vecinas, sobre todo entre las de diferente tamaño y se debe a que las burbujas de acuerdo a su tamaño tienen presiones diferentes siendo las más pequeñas las de mayor presión (Forgiarini et al., 2015), por lo que el gas se difunde desde las burbujas más pequeñas hacia las más grandes.

Este mecanismo hace que la espuma que en sus primeros instantes de vida poseía unas burbujas de pequeño y de mediano tamaño se transformen en

burbujas de gran tamaño, pues las primeras tienden a desaparecer. Además, el hecho de contener diferentes tamaños a lo largo de su vida hace que la forma de las burbujas también cambie, ya que las pequeñas son generalmente de forma esférica mientras que las grandes son poliédricas.

Aunque la difusión de gas es un fenómeno de suma importancia entre los mecanismos y causas del colapso de las espumas, es bastante lento, razón por la cual, su importancia relativa aumenta en las espumas más estables como ocurre en las cremas y helados (Brady and Ross, 1944).

3. Evaporación

La evaporación está asociada con la pérdida de líquido debida al paso de éste a estado gaseoso, lo que hace que la espuma se seque cada vez más, y al disminuir la cantidad relativa de líquido con respecto a la de gas, las películas tendrán un espesor cada vez menor. Este mecanismo de decaimiento de las espumas puede ser fácilmente controlado si se cierra el recipiente en el cual se encuentra la espuma. Existen algunos factores que actúan directamente sobre este mecanismo afectando la velocidad de evaporación, como es el caso de la temperatura ambiente, la presión circundante o la humedad relativa del ambiente.

4. Rompimiento de películas

Los tres mecanismos mencionados se encuentran íntima y directamente ligados a la facilidad que tengan las películas de romperse, debido a su elasticidad y al grado de empaquetamiento en que se encuentre la especie activa en la superficie.

La ruptura de las películas se debe a la succión capilar de éstas hacia los bordes de Plateau, pues llega un momento en que ésta se encuentra ya muy delgada y cede ante la presión del gas que se encuentra encerrado dentro de la misma (Rodríguez, 1998).

2.4 ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE LAS ESPUMAS

Cuando se habla de persistencia de una espuma, hay dos tipos de conceptos que se deben diferenciar.

El primero corresponde a la etapa inicial en la vida de una espuma, es decir, la etapa de formación, en la cual las burbujas se acumulan y se desplazan unas respecto a otras. Durante esta etapa inicial, que puede durar algunos segundos con un líquido poco viscoso, es el mecanismo de elasticidad de Gibbs-Marangoni el que asegura la resistencia de las películas inter-gotas y por tanto la existencia misma de la espuma (G. & Salager, 2001). La espumabilidad depende de un gradiente de tensión y por tanto de la presencia de un surfactante. El segundo tipo de concepto relativo a la persistencia de la espuma (Figura 9), es aquel que se refiere al envejecimiento, durante el cual ocurren una serie de mecanismos de decaimiento de la espuma ya formada. Esos incluyen el drenaje gravitacional del líquido en los bordes de Plateau (*Figura 9.a*), la succión capilar de las películas hacia los bordes de Plateau (*Figura 9.b*), cuando las burbujas son poliédricas, las películas intra-burbujas se comportan como películas planas de poco espesor, pero a causa de la ley de Laplace la presión es mayor en las burbujas pequeñas (P_1) que en las grandes (P_2) (G. & Salager, 2001). En consecuencia, existe por lo general un gradiente de presión de una parte y de la otra de una película, que induce una difusión gaseosa a través de ésta película, este fenómeno es llamado como maduración de Ostwald, hace que las pequeñas burbujas se desinflen lentamente en las grandes y desaparezcan (*Figura 9.c*), y finalmente el drenaje de la película delgada que toma en cuenta una serie de fenómenos como la repulsión eléctrica y estérica, la electroviscosidad, la viscosidad interfacial y por supuesto los efectos hidrodinámicos. La estabilidad de la espuma (ya formada) tiene entonces que ver con su persistencia en el tiempo.

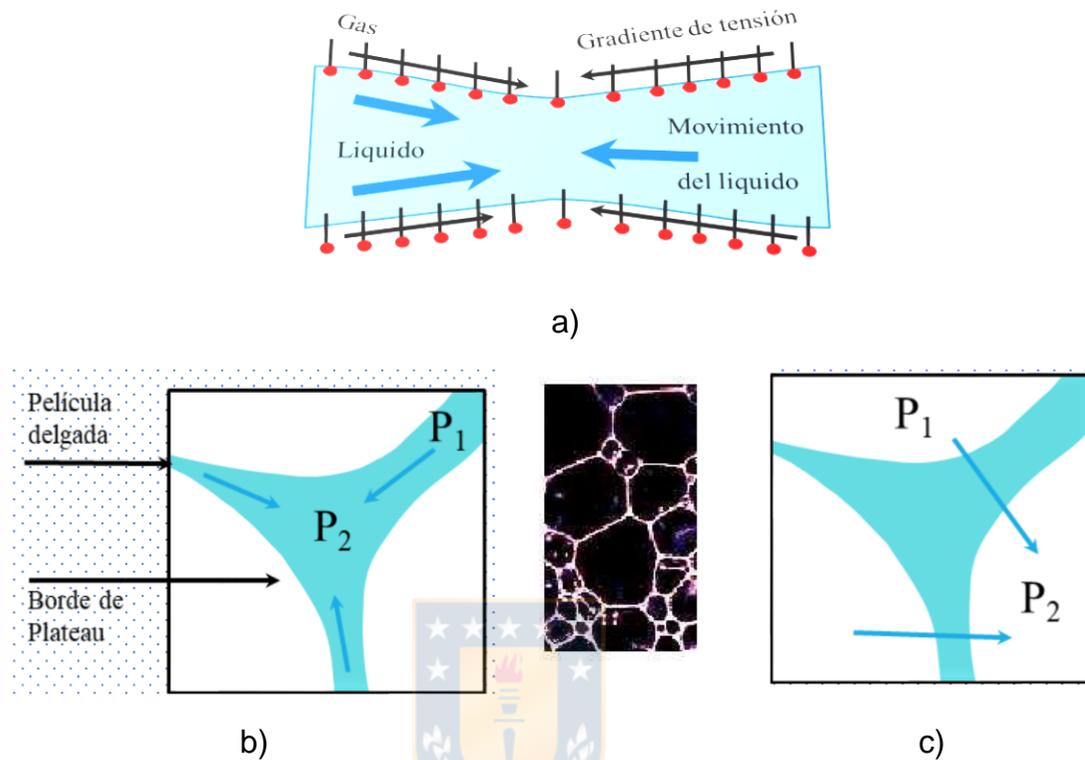


Figura 9. Mecanismos de decaimiento de las espumas a) Drenaje gravitacional del líquido en los bordes de Plateau; b) Succión capilar; c) Difusión gaseosa (Fuente: Forgiarini, 1987)

A continuación, se establecen las diferencias entre los conceptos de estabilidad y de espumabilidad:

- **Espumabilidad:** es la cantidad relativa de espuma producida en un proceso de generación estandarizado, es decir, se basa en la medición de la altura máxima que alcanza la espuma en uno o varios experimentos determinados.
- **Estabilidad:** cuando se habla de estabilidad, se hace referencia a los fenómenos de decaimiento de la espuma y de colapso de las burbujas, es decir, después que ha sido formada la espuma, se procede a medir el

tiempo que ésta permanece y la velocidad con que pierde altura (Forgiarini, 1987).

Ambos conceptos dependen de los siguientes factores (Forgiarini, 1987):

- ❖ Velocidad de adsorción de la especie activa superficialmente a nivel de la interfase.
- ❖ Reología de la capa adsorbida.
- ❖ Difusión gaseosa entre las burbujas.
- ❖ Tamaño de las burbujas.
- ❖ Tensión superficial.
- ❖ Viscosidad del líquido a espumar.
- ❖ Presencia de Electrolitos.
- ❖ Condiciones de temperatura y presión.

2.5 METODOS DE EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS ESPUMAS

Los métodos para caracterizar espumantes, que se explicaran a continuación, han sido desarrollados durante mucho tiempo en ausencia de sólidos pero esto no es estrictamente correcto debido a que estos tienen un rol fundamental en la estabilidad de la espuma; por lo que se hace de vital importancia realizar pruebas en presencia y ausencia de estos, para ver si realmente es factible escoger un espumante en función de unas condiciones.

Entre los métodos de caracterización de espumantes de flotación se cuentan los siguientes:

2.5.1 Medición de tensión superficial

La tensión superficial surge debido a interacciones cohesivas entre las moléculas en el líquido. En la mayor parte del líquido, las moléculas tienen moléculas vecinas en cada lado. Las moléculas se empujan entre sí por igual en todas las direcciones, lo que genera una fuerza neta de cero. Sin embargo, en la interfaz, las moléculas de líquido tienen solo la mitad de las moléculas de líquido vecinas

en comparación con la mayor parte del líquido. Esto hace que la molécula se asocie más fuertemente con las moléculas en sus lados y provoca una fuerza neta hacia adentro hacia el líquido como se observa en la Figura 10. Esta fuerza resiste la rotura de la superficie y se llama tensión superficial (Castellan, 1987; Atkins et al., 2006).

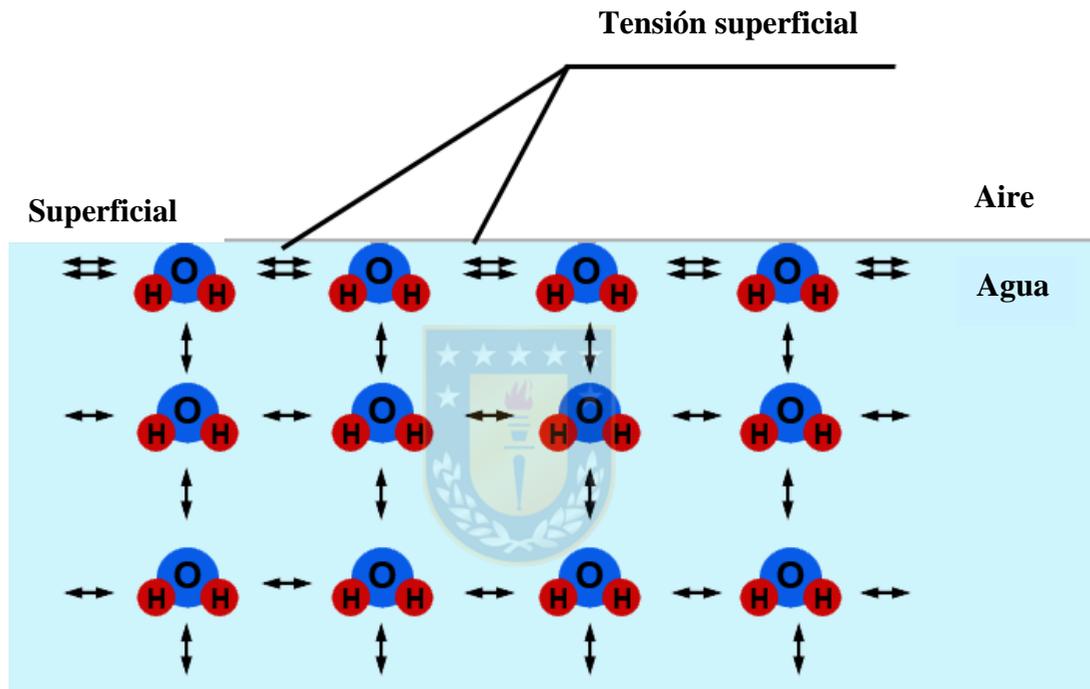


Figura 10: Equilibrio entre las moléculas del interior y la superficie de un líquido
(Fuente: Curbelo ,2006)

Método de anillo

El método del anillo, más formalmente conocido como el método del anillo de Lecomte du Nouy (du Nouy, 1918, 1919), es la técnica más utilizada por los investigadores para medir la tensión superficial estática. No es necesario calibrar el método con otros métodos o soluciones conocidas (Freud and Freud, 1930). La ventaja de este método es que la tensión superficial se puede determinar mediante la medición de una fuerza que hay que ejercer sobre un anillo de platino-iridio justo en el momento en el que la lámina de líquido se va a romper. El líquido se coloca en un recipiente con el anillo inicialmente sumergido y se extrae poco a poco hasta que se desprenda totalmente del líquido, el procedimiento de la medición se ejemplifica en la (Figura 11).

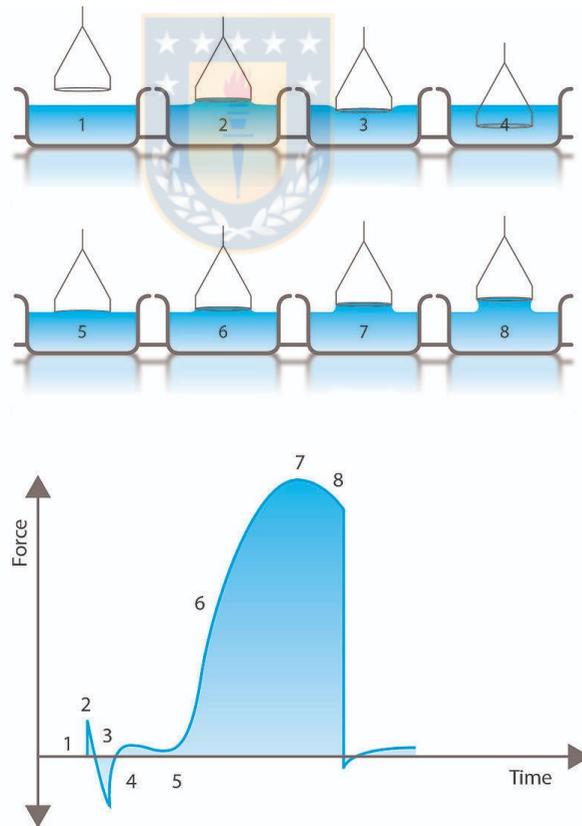


Figura 11: Dibujo esquemático del proceso de medición realizado por Du Nouy. método de anillo (Fuente: Julio and Becerra, 2006; Rowlinson and Widom, 1982).

La tensión superficial del líquido se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{F_{\max}}{4\pi R} \quad (10)$$

Donde:

γ = tensión superficial.

F = es la fuerza necesaria para romper la película.

R = radio del anillo.

2.5.2 Índice dinámico de espumabilidad (DFI)

El índice de espumabilidad dinámica es un método de caracterización de espumantes propuesto por Czarnecki et al (1982). La prueba consiste en pasar un gas a través de un disco sinterizado y en la solución de prueba de concentración conocida del espumante. El gas total presente en el sistema (solución + espuma) se determina para cada caudal de gas correspondiente. Por encima de un caudal dado, se observa que se desarrolla una relación lineal (Figura 12) entre el volumen de la espuma y el caudal de gas. La pendiente de dicha curva se denomina tiempo de retención (Ecuación 11, 12), cuyo significado físico se puede considerar como la vida media de una burbuja, desde su crecimiento hasta su ruptura.

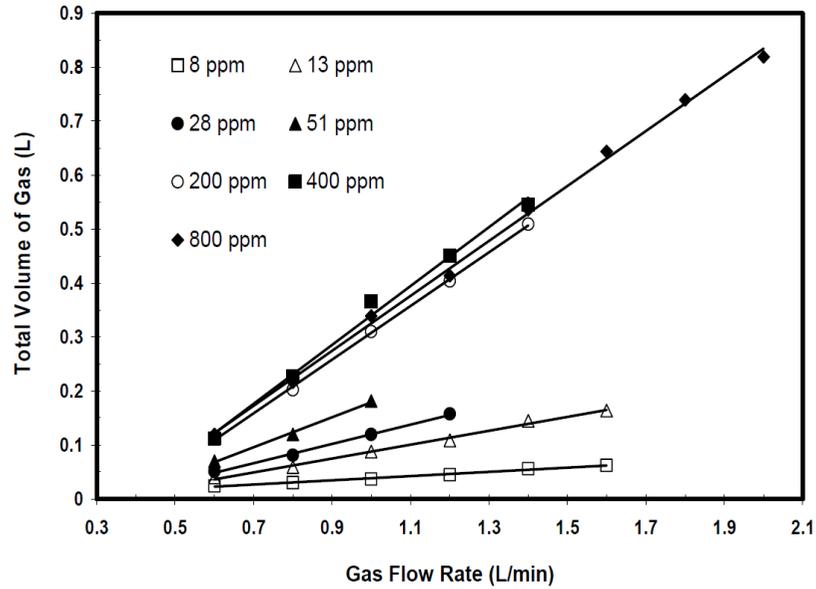


Figura 12. Parte lineal de la curva volumen versus flujo de gas (tiempo de retención) para MIBC a varias concentraciones (Fuente:Melo, 2004)

$$rt = \frac{\Delta V}{\Delta Q} \quad (11)$$

Un método analítico para el cálculo del Índice Dinámico de Espumabilidad (DFI) fue propuesto, con el fin de disminuir el error involucrado en la determinación de la pendiente para $c \rightarrow 0$ de la gráfica el tiempo de retención versus la concentración, que consiste en ajustar la data experimental utilizando la Ecuación 12 para obtener los resultados Ecuación 13, Figura 13 (Malysa et al., 1987).

$$rt = rt_0 + rt_\infty [1 - \exp(-kc)] \quad (12)$$

$$DFI = \left(\frac{\partial rt}{\partial c} \right)_{c \rightarrow 0} \quad (13)$$

Donde:

V = Volumen total de gas en el sistema, (L)

Q = Caudal de gas

t_r = Tiempo de retención, (s)

$t_{r\infty}$ = Valor de t_r límite para $c \rightarrow \infty$

K, c = Constantes empíricas

Como se verá en las siguientes secciones, el Índice Dinámico de Espumabilidad (DFI), proporciona una herramienta útil para la caracterización de espumantes Figura 13. Para espumantes más débiles, las curvas son cóncavas y, en tal caso, es fácil identificar la parte lineal la cual se utiliza para calcular el t_r (Figura 12). Para espumantes más fuertes (por ejemplo, DF-1012) el análisis no es fácil, ya que la espuma se adhiere a las paredes de la columna y la lectura exacta de la altura se hace difícil (Laskowski, 2003). En concentraciones altas de espumante, la búsqueda de una parte lineal no es fácil de identificar. Afortunadamente, sólo los $V=f(Q)$ de las curvas de bajas concentraciones de espumantes son importantes para la determinación del Índice Dinámico de Espumabilidad (DFI), las cuales pueden ser fácilmente linealizadas, incluso para un espumante fuerte (Laskowski, 2003).

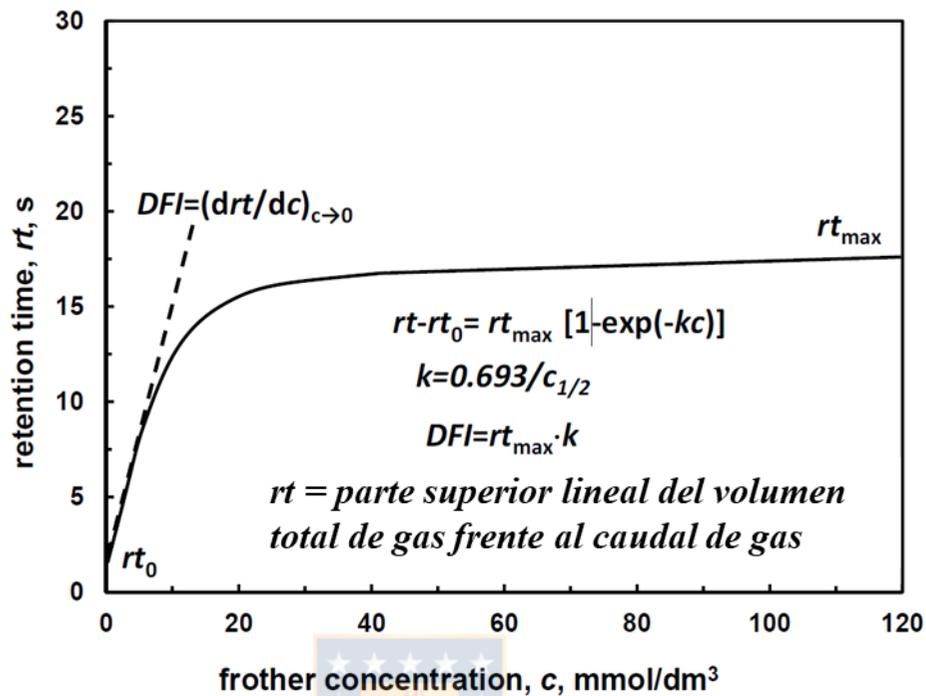


Figura 13. Determinación gráfica de Índice Dinámico de Espumabilidad (DFI), tiempo de retención versus la concentración (Fuente: Malysa et al., 1987).

Concentración crítica de coalescencia

Gourram-Badri et al., (1997) han estudiado la coalescencia de las burbujas en la zona de pulpa en la celda de flotación. Ellos desarrollaron un método para cuantificar la habilidad del MIBC para reducir la coalescencia y para determinar el efecto de los sólidos en la espumabilidad del reactivo. Determinaron la espumabilidad del MIBC midiendo la altura total de espuma, incluyendo la solución y la zona de espuma, como una función del tiempo. Encontraron que la altura total de espuma aumenta con el tiempo y después de 2 minutos se alcanza un valor de estado estacionario que variaba con la concentración del espumante, siendo similar a lo que encontraron Johansson and Pugh (1992).

También se encontró que las partículas más hidrofóbicas no contribuyen con una altura de estado estacionario estable.

Cho and Laskowski (2002) estudiaron el efecto de los espumantes sobre el tamaño de burbuja y su implicancia sobre la estabilidad de la espuma. Siguiendo el procedimiento introducido por Malysa et al., (1981) llevaron a cabo experimentos para medir el índice dinámico de espumabilidad en un sistema de dos fases usando diferentes espumantes y “burbujeadores”. Encontraron que el tamaño de burbujas no es afectado por variaciones en la concentración de espumante si las burbujas no son afectadas por variaciones en la concentración de espumante si las burbujas no pueden colisionar entre sí.

Cuando la concentración de espumante alcanza una cierta concentración, llamada concentración crítica de coalescencia (CCC) (Figura 14), la coalescencia está totalmente impedida y la distribución de tamaño de burbuja se hace asintótica a un valor mínimo producto de esto. Ellos correlacionaron el valor de CCC y el índice dinámico de espumabilidad.

En el trabajo de Laskowski (2003) se muestra la determinación gráfica de la CCC para los diferentes espumantes evaluados, como se ve en la Figura 14. La CCC puede ser fácilmente determinada midiendo el tamaño de burbuja como una función de la concentración del espumante. Para concentraciones superiores a la CCC, el tamaño de las burbujas ya no es afectado por la concentración de espumante.

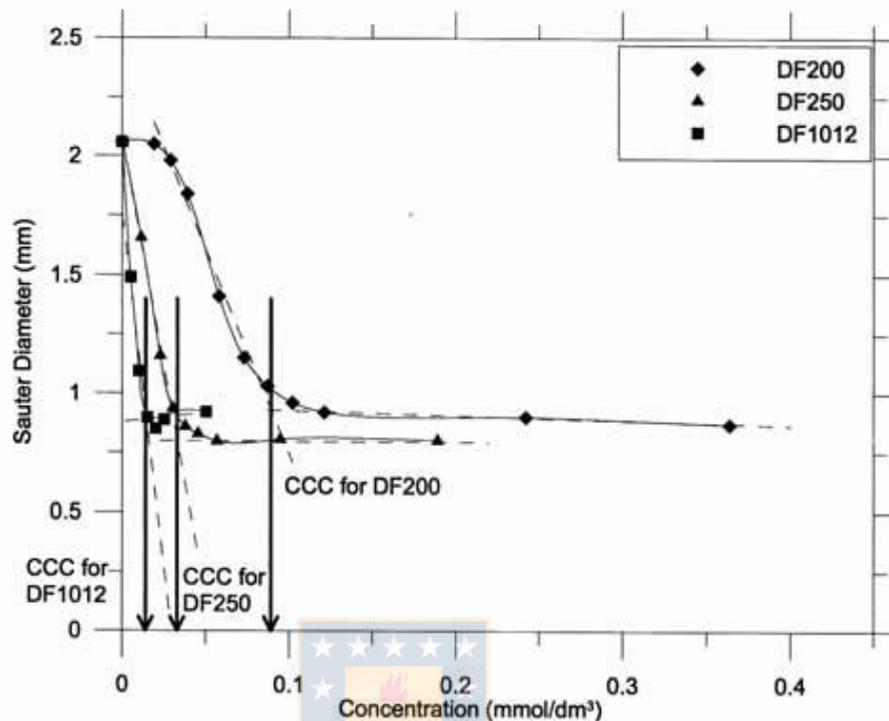


Figura 14. Determinación gráfica de Concentración Crítica de Coalescencia para tres espumantes distintos (Fuente: Laskowski, 2003)

2.5.3 Distribución de tamaño de burbujas.

La Distribución de tamaño de burbujas es una variable que afecta significativamente la probabilidad de colisión y colección, teniendo una influencia directa en el transporte de partículas sólidas (Aliste, 2013). Las burbujas de tamaño muy reducido (0,2 a 0,4 mm) (Yianatos, 2005) presentan una velocidad de ascenso baja acarreado la pérdida de partículas hidrófobas hacia el relave (Yianatos et al., 1994; Yianatos and Puelle, 1994). Por otro lado, burbujas de grandes tamaños (sobre los 2,5 mm) no generan una colección de partículas eficaz reduciendo la capacidad de transporte y estabilidad de la espuma. Como resultado podemos esperar la existencia de un diámetro óptimo de burbuja para una distribución de tamaño de partículas dada (Yianatos, 2005). En una celda o columna de flotación el tamaño y la distribución de tamaño de las burbujas

dependen del tipo de generador de burbujas, del flujo de aire y de la adición del reactivo espumante (Lisperguier and Yianatos, 1998). Los valores típicos varían entre 0,5 y 2,5 *mm* (Gorain et al., 1995) y 0,5 a 2,0 *mm* para celdas y columnas industriales respectivamente (Yianatos and Puelle, 1994) (ver Figura 15). El parámetro más común para representar la distribución de tamaño de burbujas es el diámetro de Sauter o d_{32} , el cual se calcula mediante la ecuación adjunta:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (14)$$

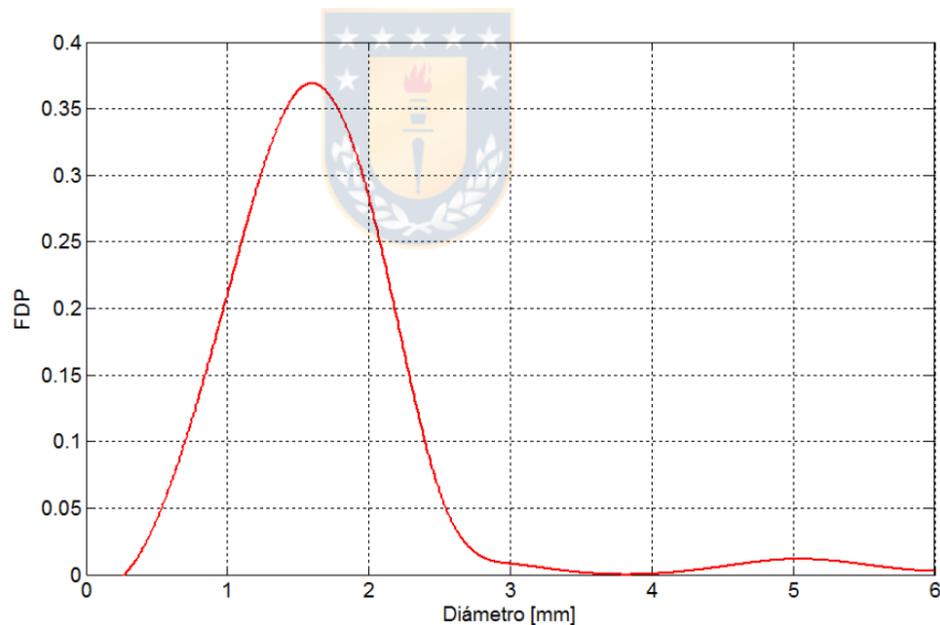


Figura 15: Distribución de tamaño de burbujas en columna de flotación (Fuente: Paredes, 2012).

2.5.4 Recuperación de agua

Muchos autores han informado que la recuperación de partículas de ganga por arrastre está fuertemente relacionada con la recuperación de agua (Smith and Warren (1989), Rahal et al. (2001), Savassi et al. (1997)). En general, cuanto mayor es la recuperación de agua, mayor es el grado de arrastre. Esto debe considerarse cuidadosamente cuando se trata de seleccionar los reactivos adecuados para un proceso de flotación. Diferentes productos químicos modifican de diferentes maneras en la estructura de la espuma, cambiando su tendencia a recuperar agua y, por tanto, cambiando el grado de arrastre.



CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL

El estudio de evaluar el efecto espumante de los diferentes tipos de lignosulfonatos (KLS, NaLS, CaLS) y MIBC en agua Milli-Q, comprende una serie de diferentes métodos usando concentraciones diferentes. En esta sección se describirán los materiales y equipos utilizados.

3.1 MATERIALES Y REACTIVOS

3.1.1 Reactivos

- **Espumante Pro – análisis:** Metil Isobutil Carbinol (MIBC) obtenido por Merck a una concentración de 98 %, peso molecular de 102.17 g/mol, densidad relativa 0.802 g/cm³ a 25°C, solubilidad 17 g/L, es un espumante pro análisis de alta pureza que es usado para algunos experimentos.
- **Reguladores de pH:** se emplea ácido clorhídrico (HCl) obtenido por Merck e hidróxido de sodio Na(OH) obtenido por Merck.
- **Agua Milli-Q:** se utiliza una unidad de purificación de agua ultra-pura para laboratorio Simplicity®, es el agua que se utiliza en todas las pruebas, aquella a la que se le han extraído cationes como el sodio, el calcio, el hierro, el cobre y otros, y aniones tales como el carbonato, el fluoruro, el cloruro y otros, mediante un proceso de intercambio iónico. El agua milli Q tiene, generalmente, una resistividad de 18,2 MΩ·cm.

3.1.2 Lignosulfonatos

Caracterización de los lignosulfonatos

Las muestras de lignosulfonato se analizaron para C, H y N en un analizador elemental FISON 1108. Las masas molares se midieron usando un equipo de

cromatografía de permeación UV / Gel (Shimadzu). Los análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se realizaron usando un espectrofotómetro FTIR Nexus WQF-510A mezclando las muestras con bromuro de potasio en polvo (KBr) para formar gránulos. La concentración de calcio y sodio en las muestras de lignosulfonato se midió usando un Optima 5300 DV ICP-OES de Perkin Elmer. Se pueden encontrar más detalles sobre los procedimientos en el trabajo de Gutiérrez et al., (2019).

Mediciones FTIR

En la Tabla 1 se muestra la caracterización de las muestras de lignosulfonato utilizadas en este trabajo. Los lignosulfonatos de NaLS y CaLS tienen alrededor del 42% de carbono y menos del 2% de nitrógeno. El contenido de azufre en estas muestras comerciales varía entre 3.7 y 5.5% y el peso molecular promedio en peso (Mw) y el peso molecular promedio en número (Mn) varían entre 18.000 y 54.000 g / mol y 2.500-7.268 g / mol respectivamente. El contenido de sodio en la muestra de NaLS es del 20,5% y la concentración de calcio en el CaLS es del 16,6%. Las concentraciones de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en el KLS son similares a las de los lignosulfonatos comerciales. El Mw y Mn de KLS son significativamente más bajos que para las muestras de CaLS y NaLS, lo que indica que la sulfometilación produce un fraccionamiento sustancial de la molécula de lignina (Gutiérrez et al., 2019).

Tabla 1. Caracterización de muestras de lignosulfonato NaLS, CaLS and KLS

| | Humedad | C | H | N | S | Ca | Na | Mwa | Mn | Mw/Mn |
|-------------|----------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|--------------|
| | % | % | % | % | % | % | % | Da | Da | |
| NaLS | 9,5 | 42,2 | 4,75 | <2,2 | 3,73 | 1,48 | 20,48 | 54.000 | 7.300 | 7,40 |
| CaLS | 10,2 | 41,8 | 5,30 | <2,2 | 5,50 | 16,60 | 5,00 | 18.000 | 2.500 | 7,20 |
| KLS | 9,4 | 38,8 | 4,25 | 3,90 | 5,70 | 0,00 | 11,55 | 960 | 634 | 1,51 |

Fuente: Gutiérrez et al., 2019

La Figura 16 presenta los espectros FTIR de los lignosulfonatos probados en este trabajo. Existen algunas bandas y picos que son comunes para las tres muestras ensayadas: las bandas en el rango de 1.600-1.700 cm^{-1} que corresponden a tramos C=O asociados a ácidos carboxílicos, cetonas, ésteres, aldehídos y otros; las bandas a 1.400-1.500 cm^{-1} asignadas a los tramos S=O y ácidos sulfónicos; las bandas a 1.100-1.150 cm^{-1} que se pueden atribuir al estiramiento S=O; la banda de 1.000-1.050 cm^{-1} que se refiere a la presencia de grupos sulfonato; y la banda de 3.100 a 3.700 cm^{-1} que corresponde a O-H se estira muy probablemente debido a la presencia de grupos fenólicos y agua adsorbida o agua de cristalización. Es importante señalar que algunas de las bandas que aparecen en los espectros FTIR de las muestras de NaLS y CaLS no se muestran en los espectros FTIR del KLS. Por ejemplo, las bandas a 1.700-1.750 cm^{-1} que corresponden a las vibraciones de estiramiento C=O de los grupos carboxilo, se suprimen en la muestra KLS, lo que también sucede con las bandas relacionadas con el estiramiento S=O a 1.300-1.350 cm^{-1} y 1.200-1.250 cm^{-1} .

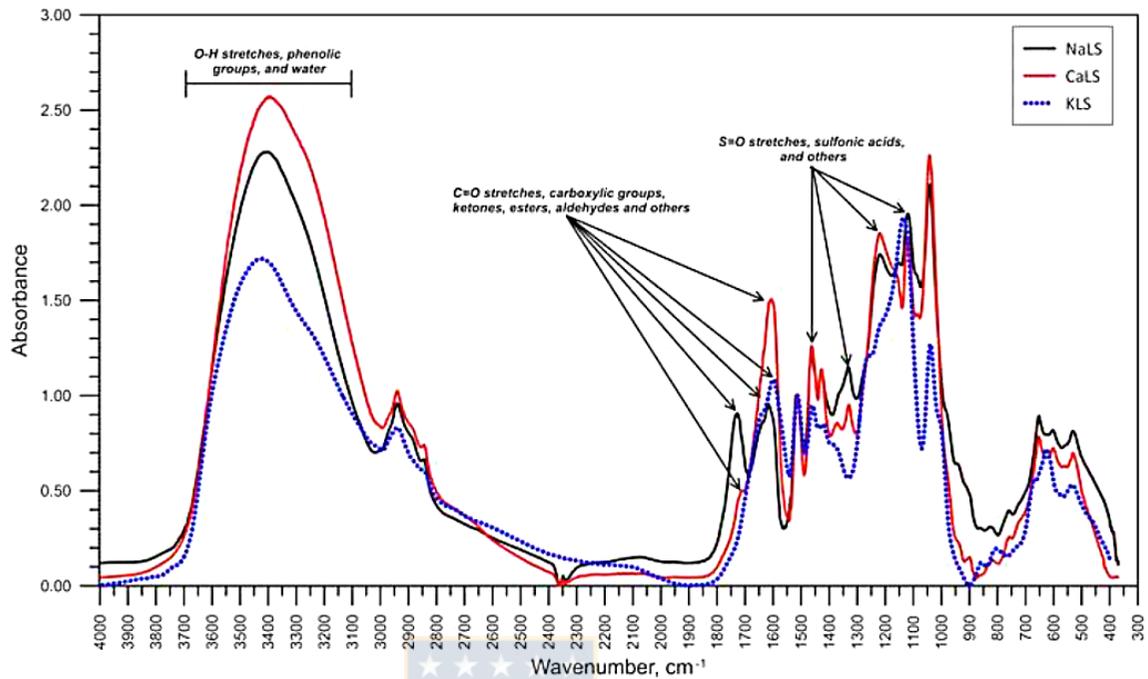


Figura 16. Espectro FTIR de las muestras NaLS, CaLS y KLS (Fuente: Gutiérrez et al., 2019).

3.2 EQUIPOS Y PROCEDIMIENTO

3.2.1 Celda mecánica de flotación

La unidad seleccionada fue la celda mecánica de flotación de laboratorio EDEMET (Figura 17), la que permite monitoreo constante y el control de las variables velocidad de impulsor y flujo de aire. La velocidad del impulsor se controla electrónicamente mediante un variador de frecuencia, mientras que un compresor interno proporciona un flujo constante y limpio de aire. Un loop (conector) del lado de la inyección de aire permite el suministro de otro tipo de gas como también la instalación de un flujómetro. La celda tiene la capacidad para usar a la vez hasta seis bombas peristálticas para controlar la adición de reactivos de forma continua o por etapas, para controlar el agua o el nivel de pulpa en la celda, así como controlar valores de pH y ORP (potencial de

oxidación-reducción). Además, está provista de paletas giratorias, que pueden ser programadas para funcionar en forma continua a una velocidad seleccionada o para dar una vuelta después de un tiempo dado, permitiendo de esa manera la remoción automatizada de concentrado. La celda de material acrílica utilizada en el test fue de 2.7 litros con su respectivo impulsor (Figura 17).



Figura 17. Celda de laboratorio EDEMET con sus componentes (Fuente: Elaboración propia)

3.2.2 Dispositivo medidor de burbujas

El visor de burbujas utilizado consiste básicamente en una cámara iluminada desde atrás y que tiene una inclinación de 15° , que recibe la muestra de burbujas capturadas por un tubo de PVC, que conduce las burbujas desde la celda acrílica. Para operar el tubo de muestreo debe estar cerrado y el visor de burbujas lleno de agua con las mismas propiedades físicas y químicas que la

celda, para preservar el mismo ambiente y así evitar su coalescencia de las burbujas.

El tubo muestreador está inmerso en la celda por debajo de la zona de espuma. Gracias al vacío provocado por el visor, las burbujas suben hasta la superficie inclinada del visor de burbujas donde se toman las imágenes mediante la cámara fotográfica (ver Figura 18).



Figure 18. Esquema del sistema Medidor de burbujas (Fuente: Elaboración propia)

Para tomar la fotografía utilizó una cámara NIKON D-5100 con un objetivo de 60 mm de distancia focal (Figura 19) para el visor de burbujas.



Figure 19. Cámara fotográfica Nikon D-5100 (Fuente: Elaboración propia)

3.2.3 Software de procesamiento de imágenes IMAGE-J

Para el análisis de las imágenes se utilizó el software IMAGE J que permite identificar, cuantificar y analizar más de 4.000 burbujas muestreadas en cada prueba (véase ejemplo en la figura 20), generando los datos necesarios para construir los gráficos que permiten la determinación de la distribución de tamaño de burbujas (d_{32}).

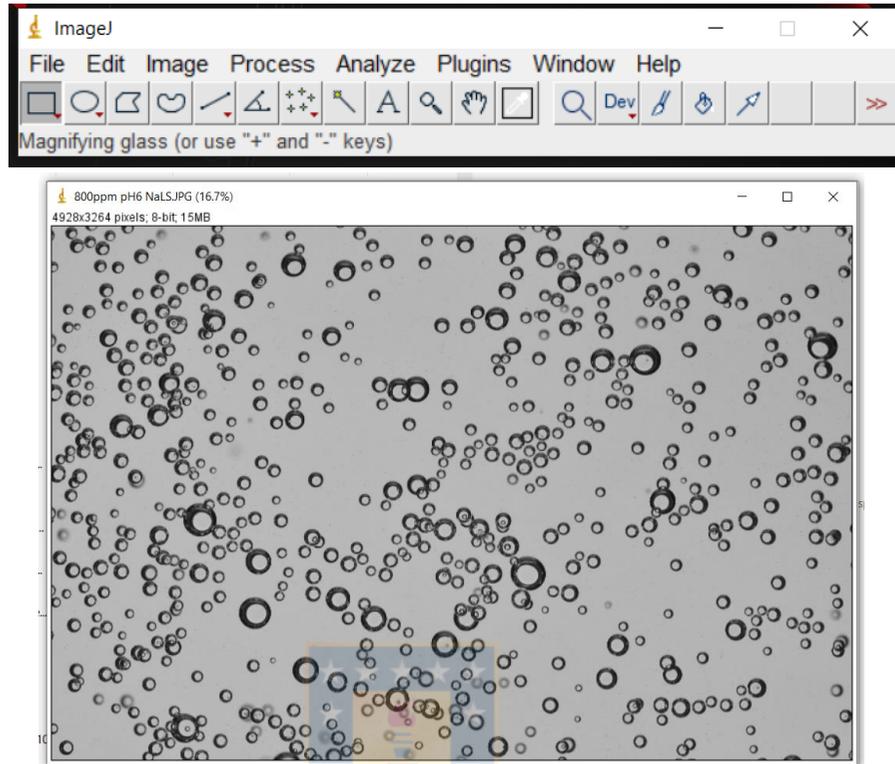


Figura 20. Ventana emergente que despliega el software Image-J durante el análisis (Fuente: Elaboración propia)

Procesamiento de imágenes

La toma de imágenes de burbujas se puede hacer en una máquina de flotación, industrial o de laboratorio, para determinar la distribución de tamaño de burbujas de la celda en la cual se efectúa el proceso. El muestreo se hace por medio de un tubo de 20 mm de diámetro, lleva la muestra de burbujas desde la celda hasta el Bubble Viewer (visor de burbujas). El visor de vidrio transparente con un ángulo (15°) de inclinación por la que las burbujas ascienden por el vidrio evitando la superposición (cluster) (Gómez and Finch, 2002). Se denomina clusters o conglomerado al conjunto de dos o más burbujas cuyas imágenes en la fotografía se transponen (Figura 20). Un conglomerado puede consistir en burbujas que se superponen en la fotografía pero que en realidad se encuentran en distintos planos y no están en contacto.

El visor debe estar iluminado desde atrás por una pantalla de led, que emite una luz blanca permitiendo la correcta captura de imágenes. Las burbujas en sistemas de dos fases aparecen como círculos negros con centros blancos u orificios (en presencia de sólidos, dependiendo de la carga de las burbujas en centro puede ir oscureciéndose) (Bailey et al.,2005). Las imágenes son tomadas desde adelante por una cámara digital, de alta resolución, (170 – 180 pixeles/mm) NIKON D-5100 con un objetivo de 60 mm de distancia focal. Las imágenes deben ser capturadas en escala de grises, para luego poder hacer el análisis con el software computacional IMAGE-J (Figura 20). Se hacen a una velocidad de una fotografía por segundo, para así evitar el re-muestreo, pues la velocidad con las que ascienden las burbujas permite que en un segundo una burbuja salga del campo de la fotografía.

Una vez tomadas las fotografías se procede al análisis mediante el programa IMAGE-J que sigue los siguientes pasos:

- Conversión: La imagen debe estar en escala de grises para poder ser analizada, en caso de que la imagen original sea de colores se debe hacer la conversión.
- Definición del umbral (Thresholding): Para poder determinar que objetos son burbujas, el primer paso es binarizar la imagen, es decir, transformar cada pixel en blanco y negro. Para esto, ya que la imagen está en escala de grises se debe definir un umbral de separación que depende de la iluminación. Todos los pixeles con un valor de escala de grises por encima de este valor se consideran negro, mientras que los valores bajo éste se considera blanco. Las agrupaciones de pixeles negros se consideran objetos (Bailey et al., 2005). El valor seleccionado debe ser lo suficientemente alto como para permitir que los pixeles negros del perímetro de la burbuja sean considerados, pero lo suficientemente bajo como para evitar la adición de pixeles extras en el perímetro de la burbuja,

que de lugar a una sobreestimación del tamaño de las burbujas (Bailey et al., 2005).

- Segmentación: La imagen binaria contiene objetos denominados BLOBS (Binary Large Objects). En primera instancia se eliminan objetos muy pequeños que corresponden al ruido de la imagen y que pueden ser burbujas que se adhieren al vidrio apareciendo en más de una imagen, teniendo que discriminarlas por tamaño. Los blobs pueden presentar agujeros o zonas más claras que son rellenados por el software y se puede proceder a la medición de sus características.
- Medición de propiedades: Para determinar cuáles de los objetos que aparecen en la imagen corresponden a las burbujas, el software hace una serie de mediciones geométricas para cada objeto binarizado, tales como área total, eje mayor, eje menor, circularidad. Estas propiedades se ven afectadas por el valor de umbral definido y la resolución de las imágenes.
- Aceptación: los objetos medidos deben ser comparados con criterios de aceptación de burbujas. En primera instancia se clasifica según su factor de forma o circularidad, valor que va desde cero hasta uno, correspondiendo el valor uno a una esfera perfecta. Típicamente los objetos que corresponden a burbujas tienen un valor cercano a 0,85 sin alcanzar ninguno el valor máximo. Ya que son formados por conglomerados de pixeles cuadrados (las burbujas perfectas tienen un valor cercano a uno). La desventaja es que este método puede incluir aglomerados de varias burbujas o rechazar burbujas individuales en casos particulares.

3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.3.1 Tensión superficial

Para estas pruebas se prepara soluciones a diferentes concentraciones de KLS, NaLS y CaLS (50, 100, 200, 300, 400, 600 y 800 mg/L), donde se agitaron en un sistema de rodillos móviles de laboratorio durante 15 minutos y a 600 rpm en un envase de plástico, terminando la agitación se tomaron alícuotas de 25 mL modificando a cada uno de ellos el pH de 6 hasta pH 11 y así poder medir la tensión superficial por triplicado a una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Este estudio se basa en el método Lecomte du Nouy, en el cual el anillo (platino-iridio) se sumerge en el líquido y luego se lo hace ascender lentamente (Figura 21). A medida que el anillo suba, se forma un menisco de líquido en la interfase (líquido/gas) y la fuerza ejercida pasa por un máximo y luego disminuye, donde se observa el desprendimiento entre el líquido y el anillo mostrando en el tensiómetro el valor que este ejerce. El cálculo de la tensión superficial se basa en medir esa fuerza máxima.

Al utilizar los anillos de platino – iridio para la medición de la tensión superficial se deben tomar precauciones importantes a efectos de asegurar valores reproducibles y precisos:

- El alambre del anillo debe estar perfectamente horizontal, libre de dobleces.
- El anillo debe estar suspendido de tal forma que el plano del mismo este paralelo a la superficie del líquido.
- Tanto el anillo como el recipiente que contiene el líquido deben estar perfectamente limpios. La limpieza del anillo se realiza con acetona, luego con agua destilada y finalmente se calienta a la llama de un mechero. La vasija de vidrio debe limpiarse con solución, enjuagar con agua destilada y secar en estufa.

- Para cada solución estudiada se realizan tres medidas de tensión superficial, reportándose el promedio.



Figura 21. Tensiómetro de fuerza K6 de KRÜSS

3.3.2 Índice dinámico de espumabilidad (DFI)

Para la prueba se utiliza una columna de vidrio (45 mm de diámetro interior y 980 mm de altura) como se observa en la Figura 22 que contiene en la parte inferior un disco de filtro fritado con un cierto tamaño de poro (frita número 2 con tamaño máximo nominal del poro 40-100 μm), también se tiene un flujómetro donde se regula el ingreso de aire hacia la columna de vidrio proveniente de un compresor. Para la prueba se realiza el pesado de las muestras a diferentes concentraciones (lignosulfonatos y MIBC) para 250 mL de solución, seguidamente se agita por 15 minutos para una buena dilución (agua Milli-Q + reactivo), posteriormente se trasvasija a la columna de vidrio los 250 mL de solución. Se registra la altura inicial del líquido dentro de la columna sin ingreso de aire. Luego se ingresa un cierto caudal de aire regulado con el flujómetro según el flujo a trabajar (0,6 - 2 L/min). Cuando la altura de la espuma llega a alcanzar el equilibrio que es

aproximadamente entre los 10 - 15 minutos, se toma registro de la altura total de la espuma (altura de espumabilidad). De acuerdo a esto la altura de la espuma es la diferencia entre la altura total de las espumas y la altura inicial del líquido. Todas las pruebas se realizan a temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), cada prueba se repite tres veces y se informa un valor promedio.

Después de cada prueba se registra el volumen de estado estable resultante (solución + espuma) donde para la obtención del tiempo de retención se grafica el volumen total de gas versus el caudal de gas para obtener la pendiente (tiempo de retención), las concentraciones de los reactivos, caudal de aire y pH de las soluciones se presenta a continuación:

- Concentración del MIBC: 8, 16, 25, 50, 100 y 200 mg/L.
- Concentración de KLS: 25, 50 y 100 mg/L.
- Concentración de NaLS: 8, 25, 50, 100 y 200 mg/L.
- Concentración de CaLS: 50, 100, 200, 400, 800 y 1.600 mg/L.
- Caudal de aire: 0,6 - 2 L/min.
- pH de la solución: 6 y 9.

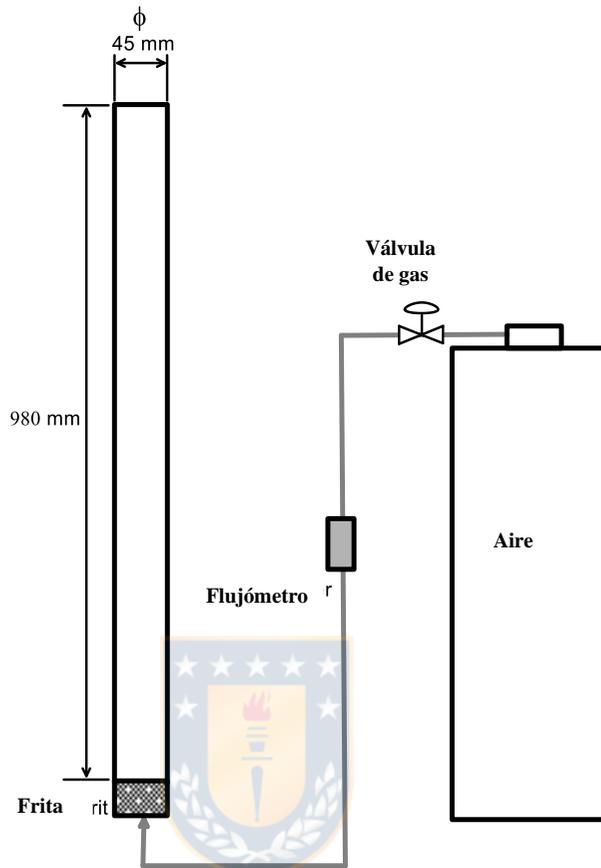


Figura 22. Montaje experimental para ensayo de Índice Dinámico de Espumabilidad (DFI) (Fuente: Elaboración propia)

3.3.3 Distribución de tamaño de burbujas

El equipo seleccionado para este trabajo es una máquina de flotación mecánica automatizada (Edemet 2,7 L), que permite el monitoreo y control continuo de las variables operativas relevantes, particularmente la velocidad del impulsor, el ingreso del flujo de aire y pH que se encuentra esquematizada en la Figura 23. Primeramente se pesan los lignosulfonatos (KLS, NaLS y CaLS) a la concentración requerida (50, 100, 200, 400 y 800 mg/L) en 10 Litros de solución de agua Milli Q, debido a que se requiere que tanto la celda y el visor de burbujas tengan la misma solución a la misma concentración para que no exista

diferencias de concentración por lo cual se realiza un tiempo de acondicionamiento en la celda de flotación (Tabla 2), luego pasado el tiempo de acondicionamiento se trasvasa una cantidad de los 10 L de solución al visor de burbujas, luego que el visor de burbujas y la celda tengan solución se inicia con el proceso de flotación con las condiciones de la Tabla 3, seguidamente a la vez se inicia con la toma de imágenes con la cámara Nikon para luego terminada las tomas de imagen se llevan para ser examinadas con el programa Image J, luego obtener el d32, donde, también se realiza pruebas con el MIBC con las mismas condiciones que se da en la Tabla 2 y Tabla 3 pero la diferencia son las concentraciones (MIBC): 5, 10, 15, 30, 60 y 100 mg/L.

Acondicionamiento.

Tabla 2. Condiciones de acondicionamiento.

| Flujo de aire (L/min) | Velocidad de agitación | Volumen de celda ocupada | pH de trabajos | Tiempo |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|----------------|---------|
| 0 | 600 rpm | 2,4 L | 6 y 9 | 15 min. |

(Fuente: Elaboración propia)

Flotación.

Tabla 3. Condiciones de flotación.

| Flujo de aire (L/min) | Velocidad de agitación | Volumen de celda ocupada | pH de trabajos | Tiempo |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|----------------|--------|
| 10 | 1.000 rpm | 2,4 L | 6 y 9 | 5 min |

(Fuente: Elaboración propia)

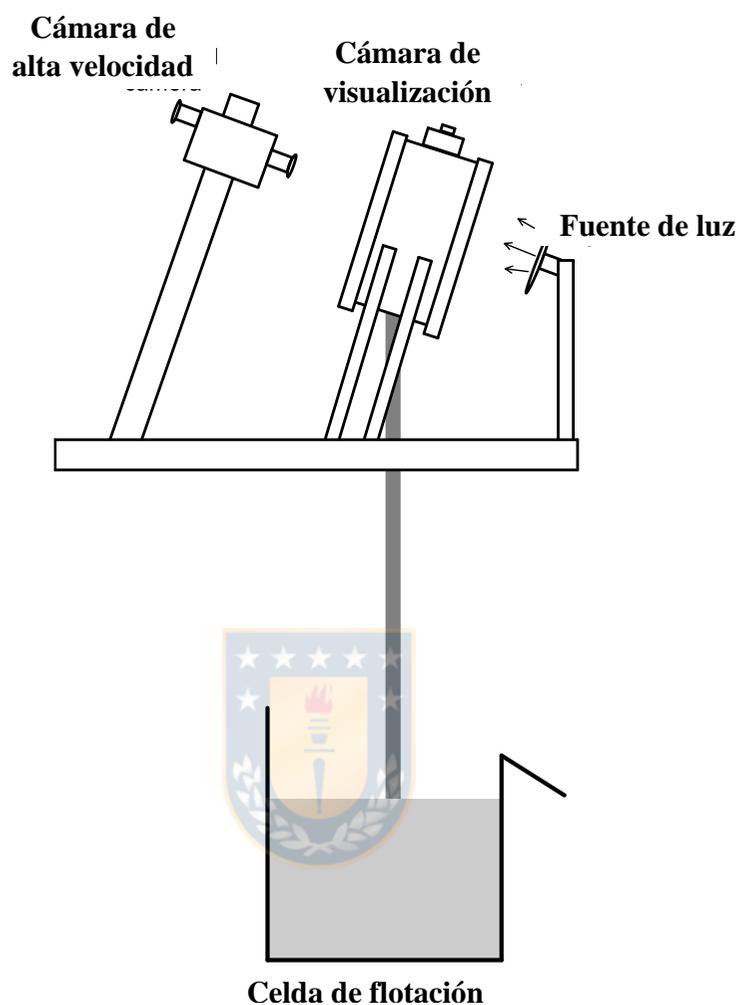


Figure 23. Esquema experimental para la medición de la distribución de tamaño de burbujas (Fuente: Elaboración propia)

Captura y procesamiento de imágenes (Image-J)

Operación de cámara fotográfica.

La cámara Nikon D – 5100 debe estar en la modalidad MANUAL. En el SHOOTING MENU la siguiente configuración debe ser establecida:

1. IMAGE QUALITY: JPEG FINE
2. IMAGE SIZE: LARGE

3. SET PICTURE CONTROL: MONOCHROME
4. HIGH ISO NR: NORMAL
5. ISO SENSITIVITY SETTING: 1250 (Calidad de imagen)
6. Se debe ajustar la abertura del diagrama (F) para que la velocidad de obturación sea (4.000). (da a conocer la velocidad de la toma de imagen debido a que las burbujas se encuentran en movimiento).

Captura de imágenes

Para poder determinar los pixeles por milímetro de la imagen, antes de empezar con el proceso de flotación se fotografía una regla lo que permite hacer la toma de imágenes con un mismo enfoque para todo el set. Una vez que empieza el proceso de agitación de la solución en la celda comienza la generación de burbujas, entonces se debe tomar el set de fotografías de la siguiente manera:

SHOOTING MENU/INTERVAL TIMER SHOOTING/NOW/

Luego escoge el intervalo de tiempo que hay entre cada fotografía, en este caso cada 1 segundo para general 200 fotografías (3 minutos y 20 segundos) cantidad que asegura que se tenga una muestra de alrededor de 4.000 burbujas para cada concentración.

Procesamiento de imágenes

El programa computacional requiere los siguientes parámetros para el análisis de imagen:

Pixeles por mm: Parámetro que varía dependiendo del set de fotografías el valor por lo general fluctúa entre 170 – 180 pixeles/mm (se calibra en Set Scale solo es referencial)

Min. Circularidad: Valor que sirve para filtrar Clusters, se utiliza el valor 0,85. (se toma este valor para tener valores que represente la esfericidad solo es referencial).

Min. Object área: Valor mínimo de área para ser considerado burbuja. Se utiliza el valor 0,005 mm². (para eliminar los ruidos, pero dependerá del investigador, solo es referencial)

Max. Object área: Valor máximo de área para ser considerada burbuja. Se utiliza el valor 10 mm².

3.3.4 Recuperación de agua

Para realizar las pruebas de recuperación de agua para un sistema bifásico, se utiliza en un equipo de flotación con agitación mecánica (Edemet 1,7 L). Todos los lignosulfonatos (NaLS, CaLS y KLS) utilizados en este trabajo se prueban para medir la capacidad de recuperar agua en un sistema simple que consta de agua Milli-Q y lignosulfonato.

Para realizar la recuperación de agua se sigue los siguientes pasos:

- Pesar 5 bandejas y numerarlos del 1 al 5.
- Agregar el peso requerido de lignosulfonato (NaLS, CaLS y KLS) para 1,7 L de solución para las siguientes concentraciones (100, 200, 400 y 800 mg/L).
- Para el MIBC se prepara soluciones a las siguientes concentraciones 3, 8, 10, 12, 15, 20, 50 y 100 mg/L para 1,7 L de solución.
- Seguidamente se da un tiempo de acondicionamiento que se observa en la Tabla 4, pasado este tiempo se procede a realizar la flotación con las condiciones que da a conocer la Tabla 5, iniciada la flotación se da a la colección de las espumas cada 15 segundos manualmente (4 veces por minuto) en intervalos de tiempo 0-1, 1-2, 2-3, 3-4 y 4-5 minutos en las bandejas previamente pesadas.
- Pesar cada bandeja (bandeja + agua recuperada) donde por diferencia de peso final menos peso inicial se calcula el agua recuperada.

Acondicionamiento.

Tabla 4. Condiciones de acondicionamiento.

| Flujo de aire (L/min) | Velocidad de agitación | Volumen de celda ocupada | pH de trabajos | Tiempo |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|----------------|--------|
| 0 | 600 rpm | 1,7 L | 6 y 9 | 15 min |

(Fuente: Elaboración propia)

Flotación.

Tabla 5. Condiciones de flotación.

| Flujo de aire (L/min) | Velocidad de agitación | Volumen de celda ocupada | pH de trabajos | Tiempo |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|----------------|--------------------|
| 4 | 1.200 rpm | 1,7 L | 6 y 9 | 1, 2, 3, 4 y 5 min |

(Fuente: Elaboración propia)

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Tensión superficial

Las Figuras 24 y 25, muestran los resultados de tensión superficial como una función de las concentraciones de lignosulfonatos (KLS, NaLS y CaLS) a valores de pH diferentes en una solución preparada en agua Milli-Q en un sistema en estado estacionario, para los valores obtenidos ver ANEXO N° 1.

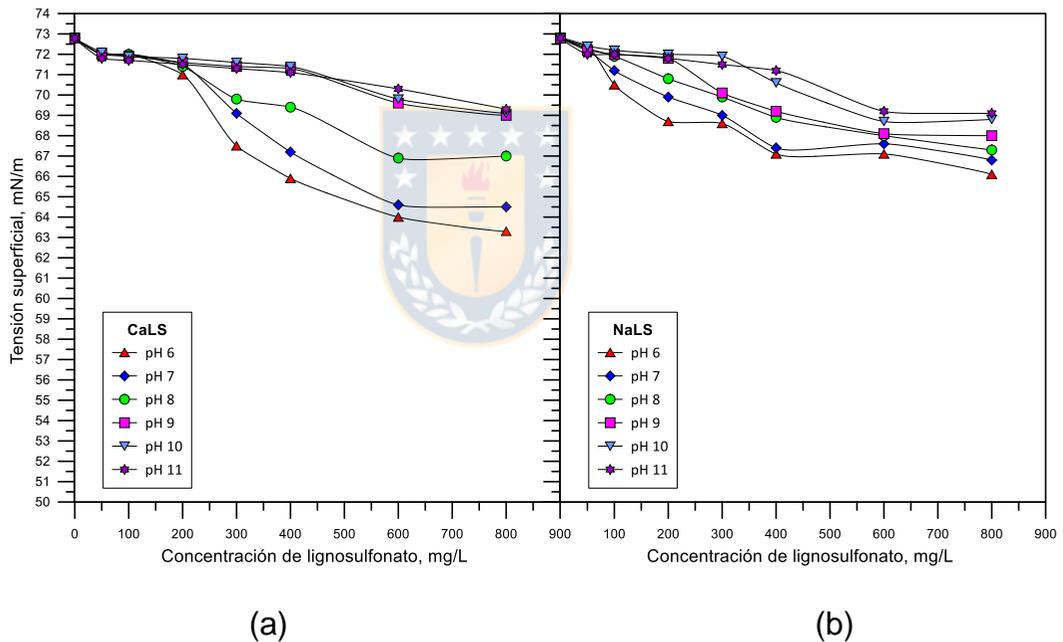
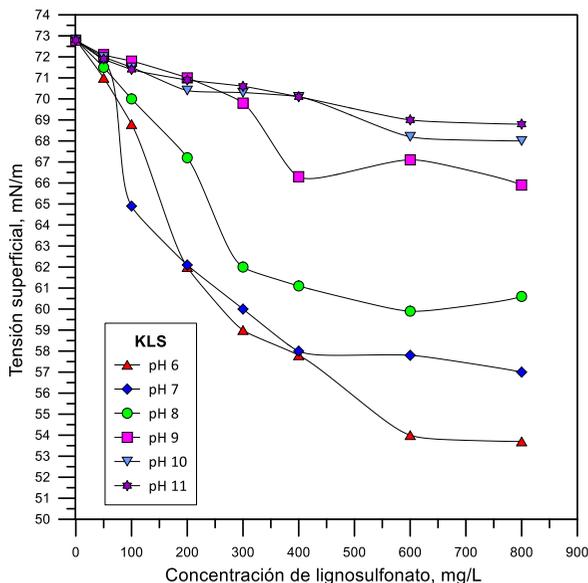


Figura 24. Tensión superficial versus concentración de lignosulfonato a diferentes pH. a) CaLS; b) NaLS (Fuente: Elaboración propia)



(c)

Figura 25. Tensión superficial versus concentración de lignosulfonato a diferentes pH. c) KLS (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados experimentales indican que todos los lignosulfonatos estudiados en este trabajo presentan actividad superficial, donde la muestra que tiene más actividad superficial es el KLS, seguido por CaLS y NaLS. Adicionalmente la actividad superficial de los lignosulfonatos se reduce a medida que el pH de la solución aumenta.

4.2 Índice dinámico de espumabilidad (DFI)

Las Figuras 26 a 28 muestran el volumen total de gas retenido en la columna versus el caudal de gas utilizando soluciones de CaLS, NaLS, y KLS, ver ANEXO N° 2. La Figura 29 muestra la obtención del tiempo de retención a partir de las líneas rectas de las Figuras 26 a 28. La Figura 30 muestra las espumas generadas. El índice dinámico espumabilidad (DFI) se pueden usar para clasificar el efecto de formación de espumas de estos reactivos (Czarnecki et al, 1982; Malysa et al, 1987). El DFI puede obtenerse a partir de la pendiente del

tiempo de retención de gas versus la concentración de los lignosulfonatos cuando la concentración tiende a cero. Czarnecki et al. (1982) propusieron la Ecuación (15) para mejorar la determinación de Índice Dinámico de Espumabilidad (DFI) de los datos experimentales.

$$rt = rt_0 + rt_\infty(1 - e^{-kc}) \quad (15)$$

Donde rt_0 , rt_∞ , y k son constantes empíricas, y c es la concentración de reactivo. Tiene que ser señalado que $rt_0 + rt_\infty$ es el valor en condición limitante de $c \rightarrow \infty$. Los valores DFI se pueden calcular como el producto entre rt_∞ y la constante k (Czarnecki et al., 1982). La Tabla 6 muestra los resultados de DFI y rt_∞ obtenidos con los lignosulfonatos utilizados en este trabajo. Los resultados muestran que el reactivo NaLS es el que tiene el valor DFI más alto, que es muy por encima de los resultados para el CaLS y KLS, y más alto que los valores reportados para MIBC de alrededor de 37.000 sL/mol (Cho y Laskowski, 2002). Por otro lado, los resultados obtenidos para rt_∞ muestran que NaLS alcanza los valores más altos. Es interesante observar que ambos parámetros, DFI y rt_∞ aumentan al aumentar el pH.

Tabla 6. Valores obtenidos de Índice Dinámico de DFI para los lignosulfonatos.

| Lignosulfonato | DFI, sL/mol | | rt_{∞} , s | |
|----------------|-------------|-----------|-------------------|------|
| | pH=6 | pH=9 | pH=6 | pH=9 |
| NaLS | 3.074.122 | 3.298.648 | 8,8 | 10,2 |
| CaLS | 15.304 | 26.310 | 2,5 | 2,7 |
| KLS | 30.802 | 56.911 | 4,4 | 7,7 |

(Fuente: Elaboración propia)

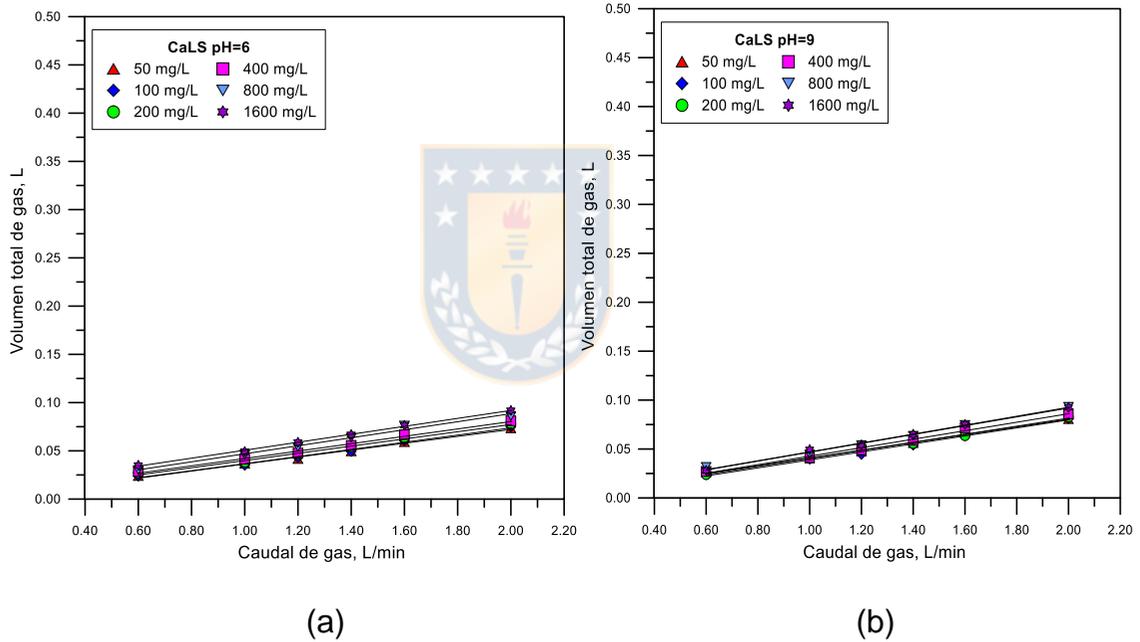
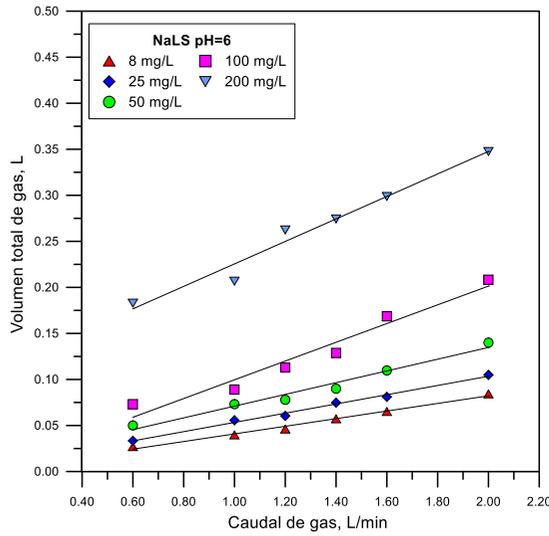
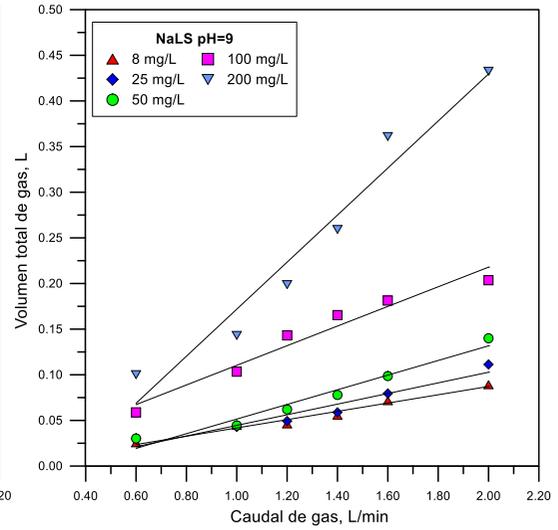


Figura 26. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones a) CaLS pH 6; b) CaLS pH 9 (Fuente: Elaboración propia).

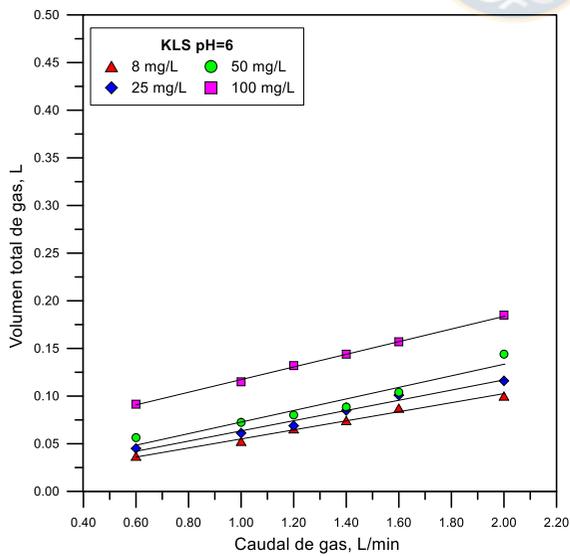


(c)

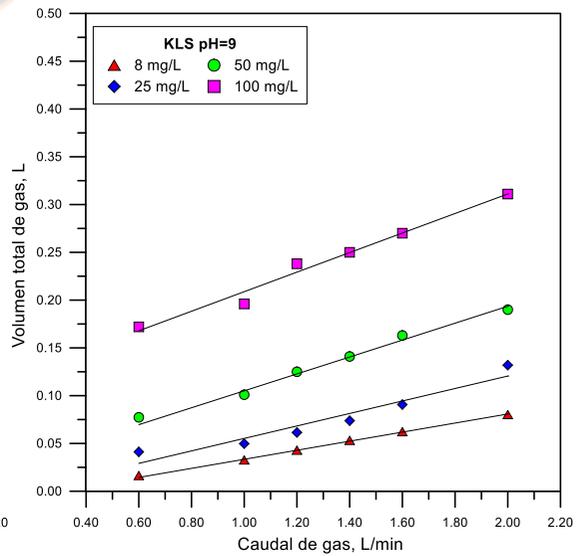


(d)

Figura 27. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones c) NaLS pH 6; d) NaLS pH 9 (Fuente: Elaboración propia).

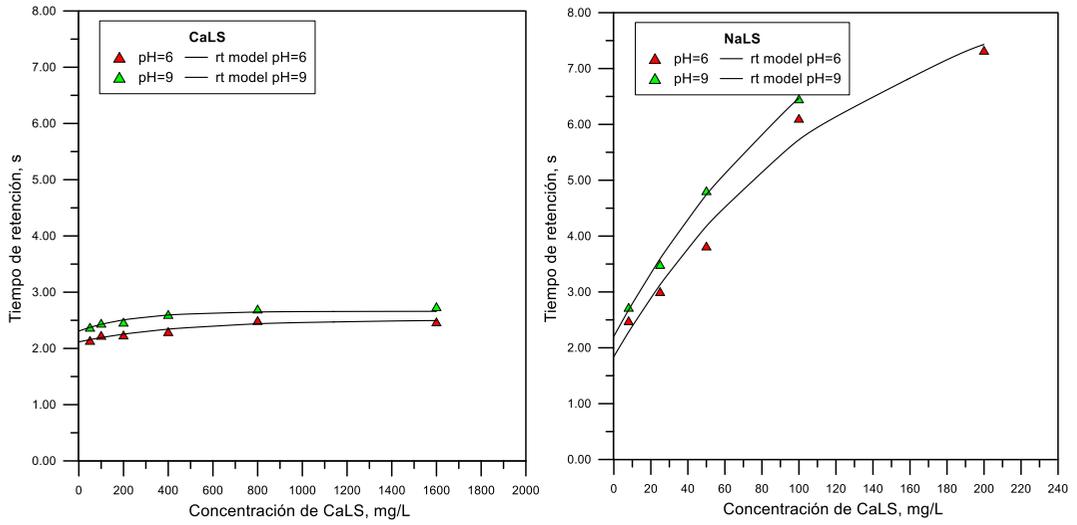


(e)



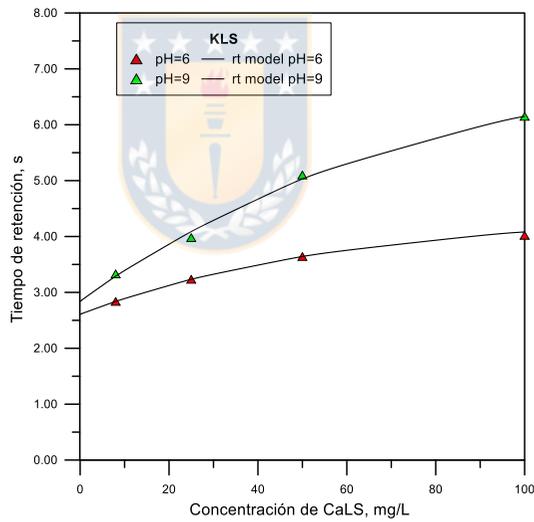
(f)

Figura 28. Volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones. e) KLS pH 6; f) KLS pH 9 (Fuente: Elaboración propia).



(a)

(b)



(c)

Figura 29. Tiempo de retención versus concentración de lignosulfonato.

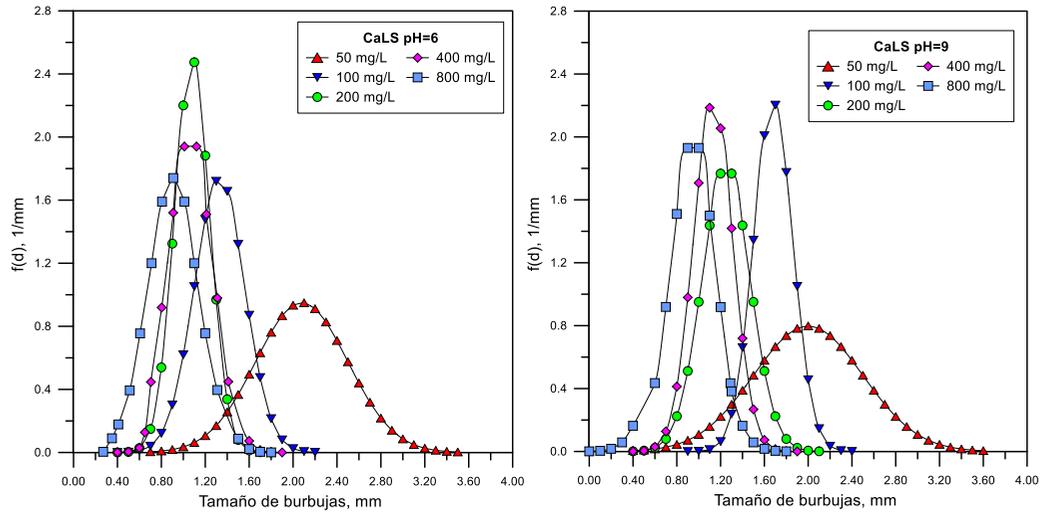
a) CaLS pH 6, pH 9; b) NaLS pH 6, pH 9; c) KLS pH 6, pH 9 (Fuente: Elaboración propia).



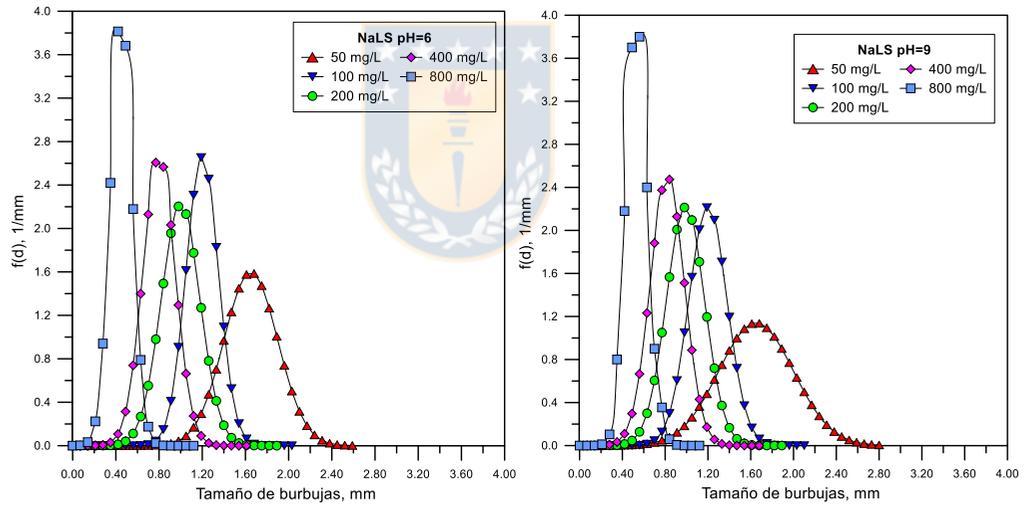
Figura 30. Espumas obtenidas utilizando diferentes lignosulfonatos (NaLS y KLS) (Fuente: Elaboración propia).

4.3 Distribución de tamaño de burbujas

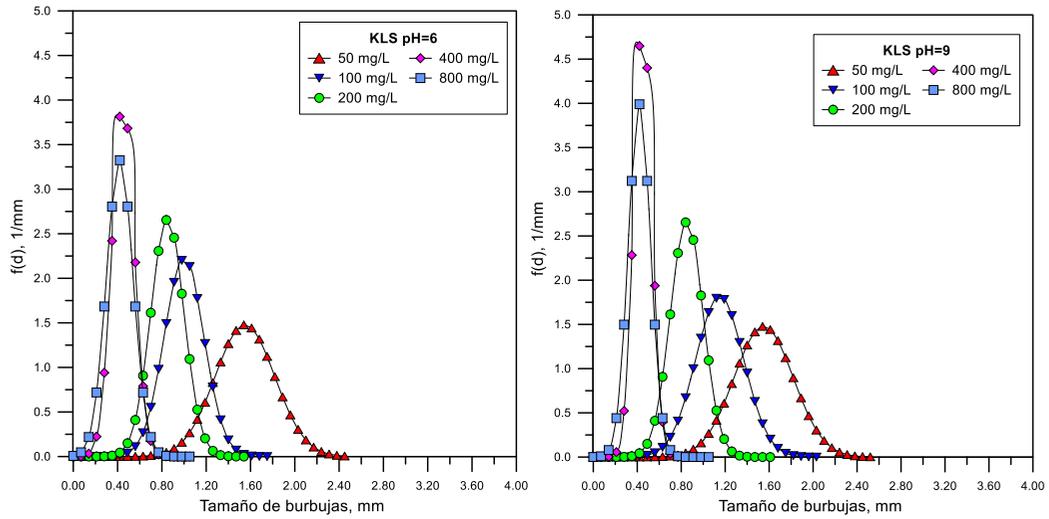
La Figura 31 muestra las distribuciones de tamaño de burbuja obtenidas usando diferentes lignosulfonatos (CaLS, NaLS y KLS) a pH 6 y pH 9. La Figura 32 resume los diámetros de Sauter medio de burbujas d_{32} (ANEXO N° 3) a pH 6 y pH 9 como una función de la concentración de lignosulfonato, y la Figura 33 muestra algunas imágenes de las burbujas generadas. Los resultados en la Tabla 8 muestran que el KLS es el que genera los tamaños más pequeños de burbujas (mínimo 0,47 mm), seguido del NaLS (mínimo 0,49 mm), mientras que el CaLS es el que genera las burbujas más gruesas (mínimo 1,02 mm) y en la Tabla 7 muestran para el MIBC. Es importante señalar que los valores de tamaño de burbuja típicos varían entre 0,5 – 2,5 mm (Gorain et al., 1995).



(a)



(b)



(c)

Figura 31. Distribución de tamaño de burbujas usando lignosulfonatos. a) CaLS pH y, pH 9; NaLS pH6 y pH 9; KLS pH6 y pH 9 (Fuente: Elaboración propia).

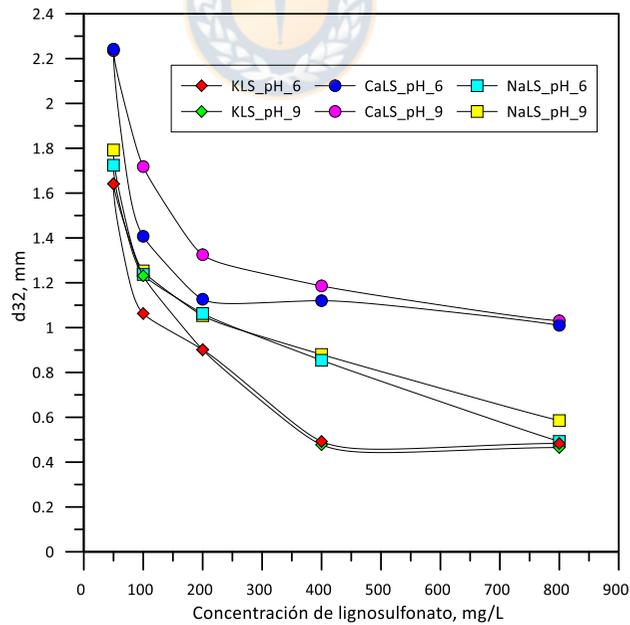


Figura 32. El tamaño promedio de burbujas utilizando diferentes lignosulfonatos (muestras CaLS, NaLS y KLS) a pH 6 y pH 9 (Fuente: Elaboración propia).

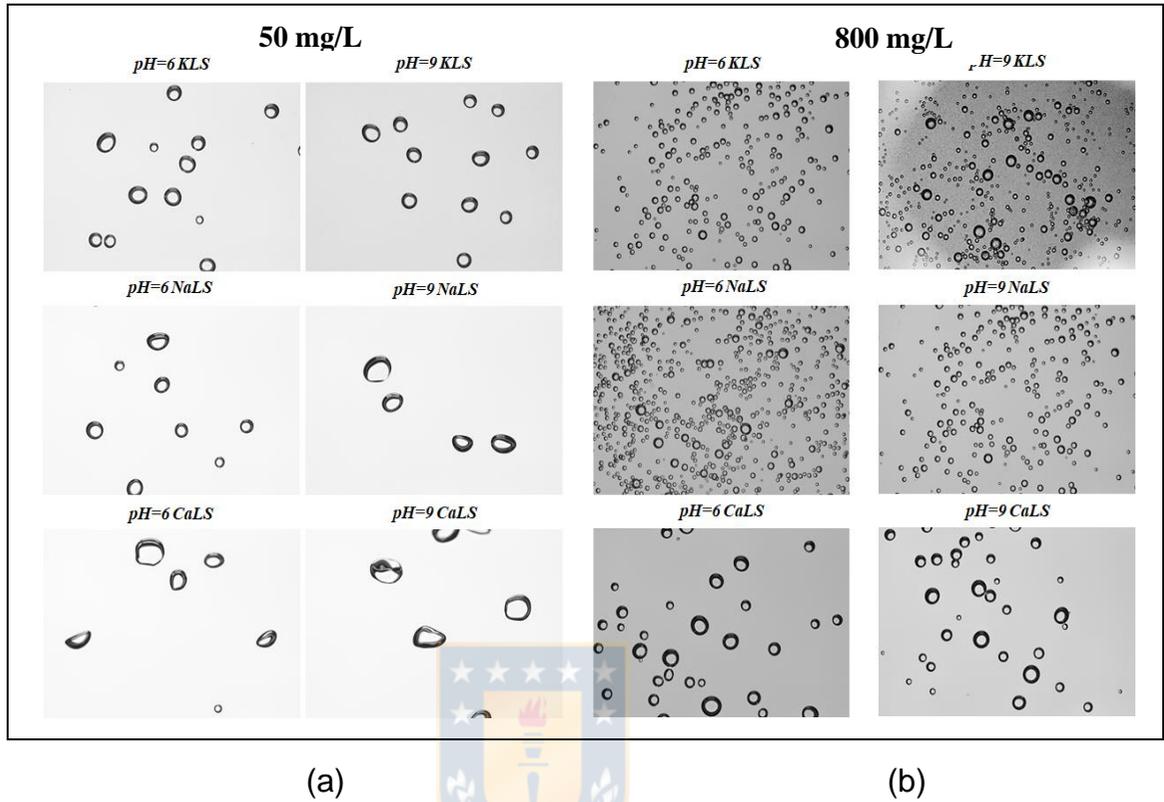


Figura 33. Distribución de tamaño de burbujas a dos concentraciones: 50 mg/L en a) KLS, NaLS y CaLS a pH 6, pH 9 y 800 mg/L en b) KLS, NaLS, CaLS a pH 6, pH 9 ambos a un flujo de 10 L/min (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7. Distribución de tamaño de burbujas (d32) para el MIBC con respecto a diferentes concentraciones y pH 9.

| MIBC | pH=9 |
|-----------------|-------------|
| Conc. (mg/L) | d32 (mm) |
| 5 | 1,02 |
| 10 | 0,42 |
| 15 | 0,34 |
| 30 | 0,34 |
| 60 | 0,34 |
| 100 | 0,34 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Distribución de tamaño de burbujas (d32) para los lignosulfonatos con respecto a diferentes concentraciones a pH 6 y pH 9.

| | KLS | | NaLS | | CaLS | |
|-----|-----------------|-------------|-------------|----------|-------------|----------|
| | pH=6 | pH=9 | pH=6 | pH=9 | pH=6 | pH=9 |
| | Conc. (mg/L) | d32 (mm) | d32 (mm) | d32 (mm) | d32 (mm) | d32 (mm) |
| 50 | 1,64 | 1,64 | 1,72 | 1,79 | 2,24 | 2,24 |
| 100 | 1,06 | 1,23 | 1,24 | 1,25 | 1,41 | 1,72 |
| 200 | 0,90 | 0,90 | 1,06 | 1,05 | 1,13 | 1,33 |
| 400 | 0,49 | 0,48 | 0,85 | 0,88 | 1,12 | 1,19 |
| 800 | 0,48 | 0,47 | 0,49 | 0,59 | 1,02 | 1,04 |

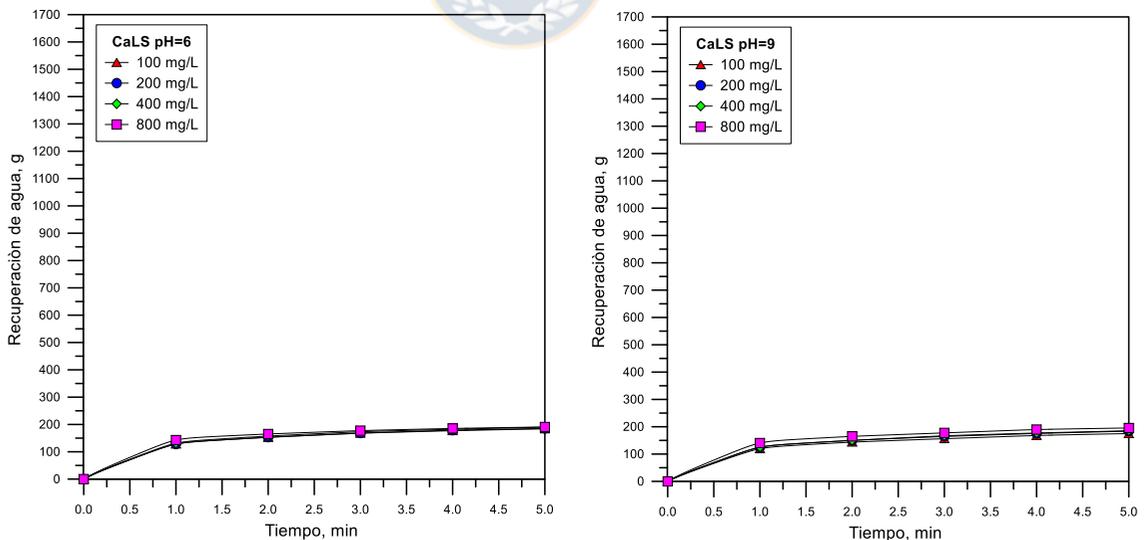
Fuente: Elaboración propia

4.4 Recuperación de agua

La Figura 34 muestra los resultados de recuperación de agua obtenidos para los lignosulfonatos (CaLS, NaLS y KLS). Este valor de recuperación está relacionado directamente con el tiempo (ANEXO N° 4), en los primeros minutos llega a las recuperaciones de agua más altas seguidamente llegando a una asíntota, eso sucede en los tres lignosulfonatos y no varía mucho los resultados respecto al pH.

En la Figura N° 35 muestra la concentración versus recuperación donde en caso del KLS y NaLS la recuperación es bien notoria, donde, no pasa en el CaLS llegando a obtener muy poca recuperación.

En la Figura 36 se puede observar la diferencia de colchón de espuma que llega a formar los lignosulfonatos (CaLS, NaLS y KLS) en los primeros minutos.



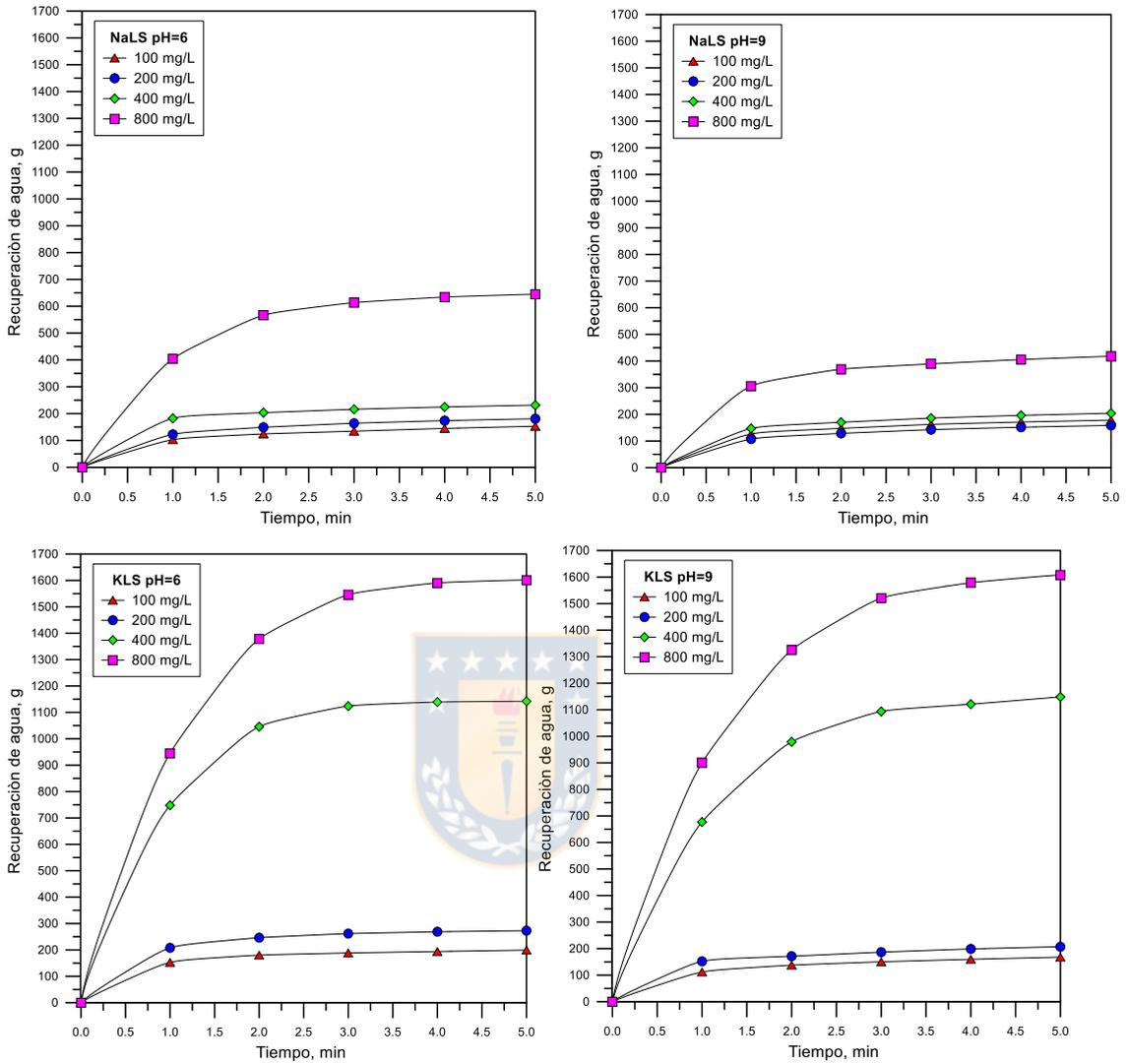


Figura 34. Agua recuperada en función del tiempo a diferentes concentraciones (muestras CaLS, NaLS y KLS) para pH 6 y pH 9 Fuente: Elaboración propia.

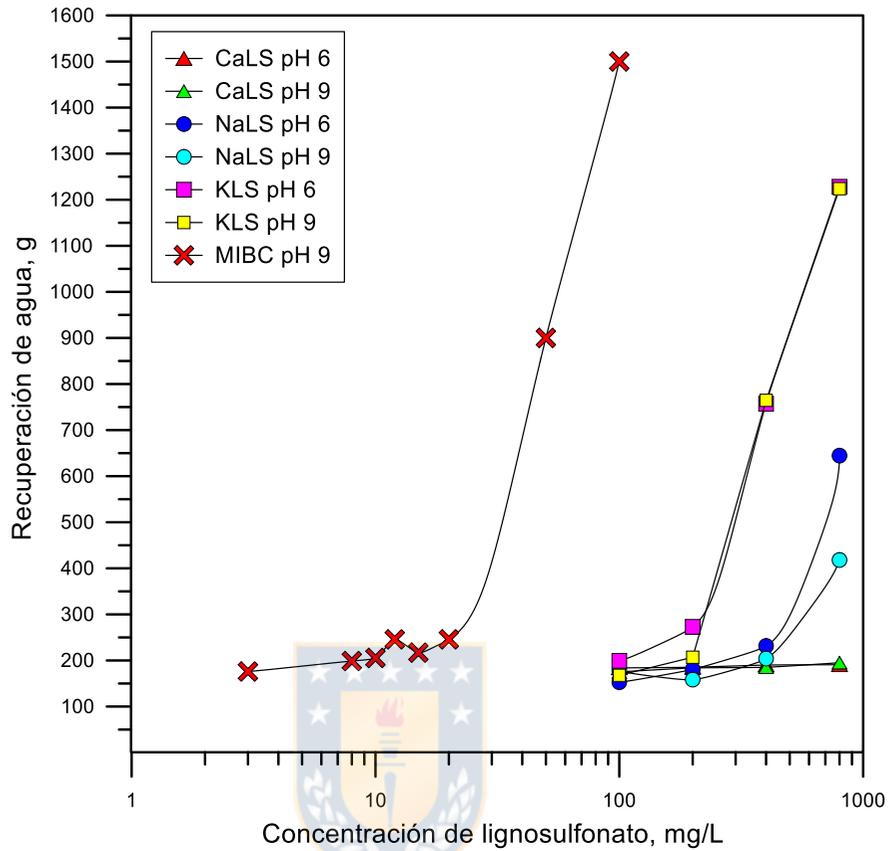


Figura 35. Recuperación de agua en un tiempo de 5 minutos usando diferentes lignosulfonatos (CaLS, NaLS y KLS) a un pH 6 y 9 Fuente: Elaboración propia.

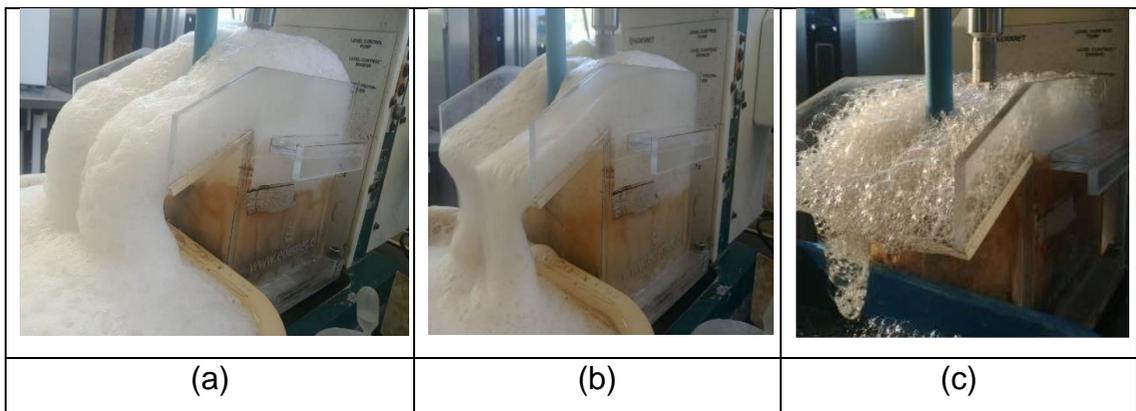


Figura 36. Recuperación de agua de los lignosulfonatos a) KLS, b) NaLS y c) CaLS Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

Discusión

El carácter aniónico de los lignosulfonatos está cercanamente relacionado con la conformación estructural de estos polielectrolitos y depende del grado de disociación de los grupos carboxílico (- COOH), sulfónico (- SO₃H) y fenólico. Como resultado de la disociación de estos grupos funcionales, las moléculas de lignosulfonato se cargan más negativamente a un pH alto (Nanthakumar et al., 2010). Es bien sabido que para que una molécula tenga propiedades tensoactivas necesita tener componentes moleculares liofóbicos (en soluciones acuosas sin afinidad con el agua) y liofílicos (en soluciones acuosas afinidad con el agua) y, por tanto, la actividad superficial de la molécula depende de las concentraciones relativas de ambos grupos moleculares (Myers, 1999). Los resultados experimentales presentados en las Figuras 24 y 25 muestran que la tensión superficial disminuye con la concentración de lignosulfonato para las tres muestras analizadas, y que este efecto es menos relevante a medida que aumenta el pH. Como se indicó anteriormente, las moléculas de lignosulfonato se cargan más negativamente a medida que aumenta el pH y, por lo tanto, las interacciones con las moléculas de agua se intensifican como resultado del aumento de hidrógeno y enlaces dipolo-dipolo que pueden existir en estas condiciones. Es razonable esperar que la adsorción de moléculas de lignosulfonato en la interfaz aire/líquido disminuya a valores más altos de pH. También hay estudios que indican que en sí mismo las burbujas de gas tienen potenciales zeta más negativos a un pH más alto (Li and Somasundaran, 1991), por lo tanto, podría tener lugar un efecto de repulsión electrostática entre el LS aniónico y la interfase aire/líquido cargada negativamente, lo que llevaría a una menor adsorción a un pH alto. Las Figuras 24 y 25 también muestran que la superficie más activa es del KLS, seguido por el CaLS y NaLS. El grado de

anionicidad (DA) de los lignosulfonatos probados en este trabajo es proporcional a la suma de los moles de cargas positivas relacionadas con la presencia de sodio y calcio en los polielectrolitos, como se presenta en la Ecuación 15.

$$DA \propto \sum_i Z_i C_i \quad (15)$$

donde Z_i es la valencia del catión y C_i es la concentración molar del catión. Considerando los datos presentados en la Tabla 1, los valores del término en el lado derecho de la Ecuación 15 para los lignosulfonatos KLS, CaLS y NaLS son 0,5, 1,05 y 0,96 respectivamente. Según estos resultados, KLS es el lignosulfonato con menor DA y por tanto el que menos interactúa con las moléculas de agua lo que explica su elevada actividad superficial. Al mismo tiempo, KLS es la muestra que tiene el peso molecular más bajo, lo que mejora la difusión molecular hacia la interfaz aire/líquido. Los lignosulfonatos CaLS y NaLS tienen el DA más alto, pero como el NaLS tiene un peso molecular más alto que el CaLS, se espera que la migración de las moléculas de NaLS hacia la interfaz aire/líquido y la actividad superficial sea menor.

Los resultados presentados en la Figura 29 muestran que los lignosulfonatos de NaLS y KLS tienen el efecto de espumabilidad más fuerte, mientras que CaLS no tiene un efecto significativo sobre la formación de espuma. Los resultados de los tamaños de las burbujas (Figuras 31 y 32) muestran que el lignosulfonato KLS inhibe fuertemente la coalescencia de las burbujas, seguido por los lignosulfonatos NaLS y CaLS. Está bien establecido que las espumas están formadas por tres zonas, es decir, una zona de burbujas, una zona de kugelschaum o esfera y una zona de polyederschaum o poliédrica (Pugh, 1996). La Figura 30 muestra un ejemplo de la espuma obtenida en los experimentos con las muestras LS utilizadas en este trabajo. En la zona de burbujas, las

burbujas se mueven libremente hacia arriba y la concentración de gas es relativamente baja; luego, en la zona de la esfera, las burbujas todavía presentan una geometría casi esférica y están separadas por películas gruesas de líquido; en la zona poliédrica, las burbujas están separadas por láminas o películas de líquido planas delgadas, y los puntos de unión de los canales de interconexión existentes entre las burbujas se conocen como bordes de Plateau (Pugh, 1996).

Los fenómenos de formación de espuma ocurren debido a la distribución no uniforme de la concentración de agentes tensoactivos en la interfaz aire/líquido que inducen fuerzas de recurrencia que tienden a restablecer el espesor de las laminillas (Pugh, 1996), que está cercanamente relacionado con la coalescencia de las burbujas en la espuma y estallido de las burbujas a medida que estas se aproximan a la sección superior de la columna (Neethling and Cilliers, 2009; Neethling et al., 2003a, b; Neethling and Brito-Parada, 2018). Estas fuerzas de recurrencia se denominan efectos de Gibbs-Marangoni que están relacionados con una distribución no equilibrada del tensoactivo en las láminas. El proceso de drenaje de la zona poliédrica a la burbuja depende en gran medida de los efectos de la gravedad y de los fenómenos que ocurren en las laminillas y los bordes de Plateau. Debido a la curvatura de la interfaz aire/líquido en los bordes de Plateau, la presión en la fase líquida es menor que la presión en las láminas, por lo que la transferencia de masa líquida tiene lugar hacia los bordes de Plateau (Pugh, 2005). La velocidad de drenaje también depende de otras variables como la viscosidad del líquido, las fuerzas repulsivas electrostáticas que existen entre las interfaces aire/líquido. Para espesores de película pequeños, las fuerzas repulsivas electrostáticas estabilizan la laminilla y, como resultado, mejoran la estabilidad de la espuma. El drenaje del líquido desplaza las moléculas de tensoactivo de las láminas a los bordes de Plateau, lo que induce un gradiente de tensión superficial y la tensión superficial en las láminas disminuye con respecto a la tensión superficial en los bordes de Plateau. Por tanto, la transferencia de masa líquida desde los bordes de Plateau a las láminas tiene

lugar debido a los efectos de Gibbs-Marangoni que aumentan el grosor de las láminas y, por lo tanto, mejora la estabilidad de la espuma. La fuerte espumabilidad generada por NaLS y KLS probados en este trabajo puede correlacionarse con los pequeños tamaños de burbujas observados, lo que se relaciona con una disminución en la coalescencia de burbujas debido a interacciones estéricas entre burbujas causadas por la adsorción de moléculas de LS en la interfaz aire/líquido; con base en los resultados de las tensiones superficiales obtenidos en este trabajo, es plausible pensar que la estabilidad de la espuma también puede estar relacionada con la manifestación de los efectos de Gibbs-Marangoni. Los resultados experimentales también indicaron que las espumas generadas por las muestras de NaLS y KLS duraron incluso más de 10 minutos después de detener la aireación, lo que indica una fuerte reducción de las burbujas que estallan en la sección superior de la espuma y una fuerte estabilización de la interfaz aire/agua. Este tema ciertamente merece un mayor estudio.

Los resultados de recuperación de agua obtenidos en este trabajo están estrechamente relacionados con los resultados comentados anteriormente. Las Figuras 34 y 35 muestran que la cantidad de agua recuperada aumenta fuertemente en presencia de KLS y NaLS, lo que se correlaciona con los resultados de la tensión superficial, la espumabilidad y el tamaño de las burbujas. La recuperación de líquido de espumas que fluyen fue estudiada por Neethling et al. (2003a) que desarrolló y validó un modelo basado en la física de las espumas para describir la recuperación de líquido. El modelo indica que la cantidad de agua que se recupera de una espuma que fluye, disminuye a medida que aumenta el tamaño de la burbuja en la espuma como resultado de una mayor coalescencia de las burbujas, que es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de los bordes de Plateau. El mismo grupo de investigadores demostró más tarde que la cantidad de agua que desborda la espuma depende en gran medida de la estabilidad de la espuma, que está estrechamente relacionada con

la coalescencia y el estallido de burbujas cuando llegan a la columna del labio (Neethling and Cilliers, 2009; Neethling et al., 2003a, b; Neethling and Brito-Parada, 2018). Los autores cuantificaron el estallido de burbujas como la fracción de aire que entra en la espuma que finalmente desborda la columna como burbujas sin estallido, lo que se denominó α o recuperación de aire (Neethling et al., 2003a). Según estas teorías, el aumento de la recuperación de agua obtenido en presencia de KLS y NaLS se explica por el efecto inhibitor de estos polielectrolitos sobre la coalescencia de las burbujas y muy probablemente sobre el estallido de las burbujas.



CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Los lignosulfonatos estudiados en este trabajo mostraron una actividad superficial sustancial. El lignosulfonato más tensoactivo fue KLS, seguido de CaLS y NaLS. El orden de actividad superficial de los lignosulfonatos ensayados estuvo relacionado con el grado de anionicidad y el peso molecular de estos polielectrolitos.
- La actividad superficial de los lignosulfonatos disminuyó con el aumento del pH, lo que se explica por el aumento de la carga negativa de los lignosulfonatos a un pH más alto y por la fuerte repulsión electrostática entre los lignosulfonatos más aniónicos y la interfaz aire/agua cargada negativamente debido al grado de anionicidad que estos presentan.
- El lignosulfonato de NaLS es el que presenta el valor de DFI más alto, que es superior a los valores de DFI obtenidos para las muestras de CaLS y KLS, y superior a los valores reportados para espumantes industriales comunes.
- Los lignosulfonatos probados en este estudio tuvieron un fuerte efecto sobre el tamaño de las burbujas, con valores similares a los obtenidos previamente usando MIBC. El lignosulfonato de KLS generó los tamaños de burbuja más pequeños ($d_{32} \sim 0,47$ mm), seguido de NaLS ($d_{32} \sim 0,5-0,6$ mm) y CaLS ($d_{32} \sim 1,0-1,1$ mm).
- Los experimentos realizados para evaluar el efecto de los lignosulfonatos sobre la recuperación de agua que se realizaron mediante experimentos de flotación en un sistema de 2 fases mostraron que la muestra de KLS y NaLS tuvo el efecto más fuerte. La cantidad de agua recuperada aumentó considerablemente en presencia de KLS y NaLS, lo que se correlacionó

con los resultados de la tensión superficial, la espumabilidad y el tamaño de las burbujas. Según estos resultados, el aumento de la recuperación de agua obtenido en presencia de KLS y NaLS se explica por el efecto inhibitor de estos polielectrolitos sobre la coalescencia de las burbujas y muy probablemente sobre el estallido de las burbujas.



Recomendaciones

Para las siguientes investigaciones se recomienda los siguientes estudios.

- Se recomienda estudiar el comportamiento espumante de los lignosulfonatos (CaLS, NaLS y KLS) para un sistema trifásico (agua-sólido-gas) para ver el efecto que este presentara en la recuperación del mineral valioso.
- Estudiar el efecto espumante de los lignosulfonatos en presencia de iones en un sistema bifásico (agua-gas) mediante las técnicas de espumabilidad estudiadas en este trabajo y ver el efecto que este tendría en la estabilidad de las espumas.
- Evaluar y comparar el efecto, comportamiento de los lignosulfonatos en una solución con agua de mar por medio de las cuatro técnicas de espumabilidad que se trabajaron.
- Evaluar el efecto espumante mediante las cuatro técnicas usadas en este trabajo para diferentes mezclas de lignosulfonatos y espumantes industriales como el MIBC para un sistema bifásico (agua-aire) y trifásico (agua-sólido-gas) para comparar dichos resultados con los resultados encontrados en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Ansari, A., Pawlik, M., (2007a). "Floatability of chalcopyrite and molybdenite in the presence of lignosulfonates. Part I. Adsorption studies". *Miner. Eng.* 20, 600–608.

Ansari, A., Pawlik, M., (2007b). "Floatability of chalcopyrite and molybdenite in the presence of lignosulfonates. Part II. Hallimond tubeflotation". *Miner. Eng.* 20, 609–616.

Aliste, K. (2013). *Frother Coverage*, Memoria (Ing. Civil Químico), Canadá, McGill University, Department of Mining and Materials Engineering, 1-20.

Arsentiev, V., Leja, J. (1977). Problems in potash flotation common to ores in Canada and the Soviet Union. *CIM Bulletin*, 154-158 pp.

Atkins, Peter y Jones Loretta. (2006). "Principios de Química. 3ra edición. Ed. Médica Panamericana"., 161-171- Buenos Aires, Argentina.

A. P. Brady and S. Ross, *J. AM. Chem. Soc.* 66: 1348-1356.

Bailey M., Gómez C. O., Finch J. A. (2005). "Development and application of an image analysis methods for wide bubble size distribution"; *Minerals Engineering*; 18, pp. 1214-1221.

Bulatovic, M. (2007). *Handbook of flotation reagents*. Ontario: Elsevier science and technology books.

Castro F., Sergio. (2003). *Flotación: Fundamentos y aplicaciones*. Concepción-Chile: Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Castro F., Sergio. (2006). *Flotación: Fundamentos y Aplicaciones*. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción. 181 pp.

Castellan, Gilbert W., *Fisicoquímica*. (1987). 2da Edición. Editorial Addison-Wesley Iberoamericana. 434-436. Wilmington, Delaware. USA.

César Gómez, Ph.D., Willy Kracht, Ph.D. (2009). "Fundamentos de flotación de minerales". Cátedra de procesamiento de minerales.

Curbelo, F. D. S. (2006). *Recuperação Avançada de Petróleo Utilizando Tensoativos*.

Cho Y. S., Laskowski J. S. (2002). "Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability"; *International Journal of Mineral Processing*; vol. 64, N° 2-3, pp 69-80.

Czarnecki, J., Malysa, K., Pomianowski, A (1982). Dynamic frothability index. *J. Colloid Interface Sci.*, 86, 570–572.

Dence, C.W., Lin, S.Y. (1992). "General structure features of lignin", In: Lin, S.Y., *Methods in Lignin Chemistry*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 3-6 pp.

Díaz Julio C. and Luis O. Becerra. (2006). "Determinación de la Tensión Superficial mediante el método de pesada hidrostática, Simposio de Metrología", *Memorias*, 2006.

Du Nouy, P. Lecomte, (1918-1919). "A New Apparatus for Measuring Surface Tension," *J. Gen. Physio.*, Vol. 1, 521-524.

Freud, B.B. and H.Z. Freud, (1930, 1772- 1782)"A Theory of the Ring Method for the Determination of Surface Tension," *Amer. Chem. Soc. I.*, Vol. 52.

Forgiarini, A. (1987). "Reología de Espumas en medios porosos". Tesis de Maestría, Informe FIRP N° 8710. Mérida. Venezuela.

Forgiarini A., Marquez L., Celis M.T., Salager J.L. (2015). Nanoemulsiones — Formación con baja energía. Chap. 16 in *Nanopartículas: Fundamentos y Aplicaciones*. C.L. Larez-Velasquez, S. Koteich, F. Lopez, Eds. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. pp 273-293.

G., V. C., & Salager, R. A. (2001). Estabilización de espumas no acuosas en presencia de sólidos finos. Tesis Ingeniería Química, Informe FIRP N° 0106. Venezuela.

Gargulak, J.D., Lebo, S.E. (1999). Lignin: Historical, Biological, and Materials Perspectives. *ACS Symposium Series 742*: 301pp.

Gómez, C.O., Finch, J.A. (2002) Gas dispersion measurements in flotation machines; *CIM Bulletin 95 (1066)*,73-78.

Gómez, C. (2012). *Espumantes en flotación: roles y efectos*. McGill University, Department of Mining and Materials Engineering, 1-52.

Gosselink, R.J.A., De Jong, E., Guran, B., Abacherli, A. (2004). Coordination network for lignin-Standardization, production and applications adapted to market requirements (EUROLIGNIN). *Ind. Crops Prod.* 20, 121-129 pp.

Goheen, D.W., Sarkanen, K.V., Ludwig, C.H. (1971). Lignin, occurrence, formation, structure, Wiley-Interscience, New York.

Gourram-Bradi F., Conil P., Morizot G. (1997) "Measurements of selectivity due to coalescence between two mineralized bubbles and characterization of MIBC action on froth flotation"; International Journal of Mineral Processing, 51; pp 197-208.

Gorain, B. K., Frandizis, J. P. y Mainlapig, E. V. (1995). Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell-Part 1: Effect on bubble size distribution. Minerals Engineering, Vol 8 N°6, 615-635.

Gutiérrez, L., 2018. Presentaciones curso de flotación. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Gutiérrez, L., Uribe, L., Hernandez, V., Vidal, C., Texeira-Mendonca, R. (2019). "Assessment of the use of lignosulfonates to separate chalcopyrite and molybdenite by flotation". Powder Technology, 359, 216-225.

Grigg, R.B. and Bai, B. (2004). "Calcium lignosulfonate adsorption and desorption on Berea sandstone", Journal of Colloid and Interface Science, 279: 36-45.

J. Dávila, R. Llenera, N. Benavides, C. Curo. (2012). "NaSH en la optimización de la flotación de cobre concentradora Cuajone", 9º congreso nacional de minería.

J. S. Rowlinson and B. Widom. (1982). "Molecular theory of Capillarity", Clarendon Press, Oxford.

Johansson G., Pugh R. J. (1992). "The Inference of particle size and hydrophobicity on the stability of mineralized froth"; International Journal Mineral Processing; 34, 1-21.

R. R. Klimpel and R. D. Hansen. (1988) Frothers, In Reagents in Mineral Technology (P. Somasundaran and B. M. Moudgil, eds.), Marcel Dekker, New York, pp. 385–409.

Laskowski, J.S. (2003). "Fundamental properties of flotation frothers", Proc. 22nd Int. Mineral Processing Congress (L. Lorenzen and D.J. Bradshaw, eds.), Cape Town, vol. 2, pp.788-797.

Lebo Jr, S.E., Gargulak, J.D., McNally, T.J. (2007). Lignin en Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology 5th Edition.

Leja, J., 1982. Surface chemistry of the froth flotation. New York: Plenum Press.

Li C., Somasundaran P. (1991). Reversal of bubble charge in multivalent inorganic salt solutions – effect of magnesium. *J. Colloid Interface. Sci.*, 146, 215–218.

Lisperguier, G.S. y Yianatos, J.B. (1998). Evaluación de un sistema generador de burbujas para columnas de flotación. *Revista Información Tecnológica*, Vol.9, 175-181.

Lu, S., Sun, K. (1999). Developments of phosphate flotation reagents in China.

Ma X. and Pawlik, M. (2005) “The effect of lignosulfonates on the floatability of talc”, *International Journal of Mineral Processing*.

Malysa, E., Malysa, K., Czarnecki, J. (1987). A method of comparison of the frothing and collecting properties of frothers. *Colloids Surfaces*, 23, 29–39.

Malysa K., Lunkenhelmer K., Miller R., Hartenstein C. (1981). “Surface Elasticity and Frothability of n-octanol and n-octanoic Acid Solutions”; *Colloids and Surfaces*; pp 329-338.

Mathieu, G.I., Bruce, R.W. (1974). Getting the talc out of molybdenite ores, *Canadian Mining Journal*.

Marianni. S. (2000) *Química de la madera, conceptos básicos*.

Melo, F. (2005). “Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation,” tesis de master. departamento de ingeniería de minas, universidad de british columbia. 9.

Myers, D., (1999). “Surfaces, Interfaces, and Colloids: Principles and Applications”, Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. DOI:10.1002/0471234990.

Nanthakumar, B., Arinatwe, E., Pawlik, M. (2010). “Adsorption of sodium lignosulfonates on hematite”. *Adsorption*, 16, 447-455.

Neethling, S.J.; Brito-Parada, P. (2018). Predicting flotation behavior—The interaction between froth stability and performance. *Miner. Eng.*, 120, 60–65.

Neethling, S.J.; Cilliers, J.J. (2009). The entrainment factor in froth flotation: Model for particle size and other operating parameter effects. *Int. J. Miner. Process.*, 93, 141–148.

Neethling, S.J.; Lee, H.T.; Cilliers, J.J. (2003a). The recovery of liquid from flowing foams. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 15, 1563–1576.

- Neethling, S.J.; Lee, H.T.; Cilliers, J.J. (2003b). Simple relationships for predicting the recovery of liquid from flowing foams and froths. *Miner. Eng.*, 16, 1123–1130.
- Nimz, H.H. (2003). Lignin, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley- VCH Verlag GmbH & Company.
- Paredes, C. (2012). Determinación de la distribución de tamaño de burbujas vía imágenes: análisis y alternativas. Memoria (Ing. Civil de Minas), Santiago de Chile, Universidad de Chile, Departamento de Ing. de Minas, 11-14.
- Pugh, R.J. (1996). Foaming, foam films, antifoaming and defoaming. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 64, 67–142.
- Pugh, R.J. (2005). Experimental techniques for studying the structure of foams and froths. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 114–115, 239–251.
- Rahal, K., Manlapig, E. and Franzidis, J-P. (2001). "Effect of frother type and concentration on the water recovery and entrainment recovery relationship", *Minerals & Metallurgical Processing*, vol. 18, pp. 138-141.
- Rodríguez C. (1998) Diferentes Regímenes de Formación y Colapso de Sistemas Espumantes. Tesis de Maestría. Mérida. Venezuela.
- Rolleri, A. (2013). Activación de lignosulfonato de sodio por hidroximetilación. Departamento de Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile.
- Rosen, M. J. (1978) "Surfactants and Interfacial Phenomena, John Wiley and Sons, New York, NY.
- Savassi, O.N., Alexander, D.J., Franzidis, J.P. and Manlapig, E.V. (1997). "An empirical model for entrainment in industrial flotation plants", *Minerals Engineering*, vol. 11, pp. 243-256 (1997)
- Shengbo Wang, Changlong Chen, Bor-Jier Shiau & Jeffrey H. Harwell (2017). "Enhancing foam stability in porous media by applying nanoparticles", *Journal of Dispersion Science and Technology*.
- Smith, P.G., Warren, L.J. (1989). "Entrainment of particles into flotation froths", *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 5, pp. 123-145.
- T. Young. (1805) "An essay on the cohesion of fluids". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 95, 65–87.

V. A. Glembotskii & V. I. Klassen & I. N. Plaksin. (1972). Flotation. New York: Primary Sources

Whelan, P.F., and Brown, D.J. (1956) "Particle-Bubble attachment in froth flotation", Bull. Inst. Metall.

Wills, B. A., & Finch, J. (2015). Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Butterworth-Heinemann.

Yianatos, J. (2005). Flotación de Minerales, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Procesos Químicos, Biotecnológicos y Ambientales, 4-108.

Yianatos, J.B., Bergh, L.G., Durán, O.U., Díaz, F.J. y Heresi, N.M. (1994). Measurement of residence time distribution of the gas phase in flotation columns. Journal of Minerals Engineering, Vol.7, Nos 2/3, 333-344.

Yianatos, J.B. y Puelle, P. (1994). Development and calibration of a flotation bubble size sensor. III Latin-American Congress on Froth Flotation, Concepción, Vol. IV, 157-167.



ANEXO N° 01: Datos de tensión superficial de los lignosulfonatos a diferentes pH

Tabla 9. Tensión superficial de CaLS a diferentes concentraciones

| CaLS Tension superficial, mN/m | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------|------|------|------|------|-------|-------|
| mg/L | Tens. Sup. agua | pH=6 | pH=7 | pH=8 | pH=9 | pH=10 | pH=11 |
| 0 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 |
| 50 | 72,8 | 72,0 | 72,0 | 72,0 | 72,0 | 72,1 | 71,8 |
| 100 | 72,8 | 72,0 | 72,0 | 72,0 | 71,9 | 71,9 | 71,7 |
| 200 | 72,8 | 71,0 | 71,5 | 71,4 | 71,6 | 71,8 | 71,5 |
| 300 | 72,8 | 67,5 | 69,1 | 69,8 | 71,4 | 71,6 | 71,3 |
| 400 | 72,8 | 65,9 | 67,2 | 69,4 | 71,3 | 71,4 | 71,1 |
| 600 | 72,8 | 64,0 | 64,6 | 66,9 | 69,6 | 69,8 | 70,3 |
| 800 | 72,8 | 63,3 | 64,5 | 67,0 | 69,0 | 69,1 | 69,3 |

Tabla 10. Tensión superficial de NaLS a diferentes concentraciones

| NaLS Tension superficial, mN/m | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------|------|------|------|------|-------|-------|
| mg/L | Tens. Sup. agua | pH=6 | pH=7 | pH=8 | pH=9 | pH=10 | pH=11 |
| 0 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 |
| 50 | 72,8 | 72,4 | 72,2 | 72,3 | 72,2 | 72,4 | 72,0 |
| 100 | 72,8 | 70,5 | 71,2 | 71,9 | 72,0 | 72,2 | 72,0 |
| 200 | 72,8 | 68,7 | 69,9 | 70,8 | 71,8 | 72,0 | 71,8 |
| 300 | 72,8 | 68,6 | 69,0 | 69,9 | 70,1 | 71,9 | 71,5 |
| 400 | 72,8 | 67,1 | 67,4 | 68,9 | 69,2 | 70,6 | 71,2 |
| 600 | 72,8 | 67,1 | 67,6 | 68,0 | 68,1 | 68,7 | 69,2 |
| 800 | 72,8 | 66,1 | 66,8 | 67,3 | 68,0 | 68,8 | 69,1 |

Tabla 11. Tensión superficial de KLS a diferentes concentraciones

| KLS Tension superficial, mN/m | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------|------|------|------|------|-------|-------|
| mg/L | Tens. Sup. agua | pH=6 | pH=7 | pH=8 | pH=9 | pH=10 | pH=11 |
| 0 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 | 72,8 |
| 50 | 72,8 | 71,0 | 71,8 | 71,5 | 72,1 | 72,0 | 71,9 |
| 100 | 72,8 | 68,8 | 64,9 | 70,0 | 71,8 | 71,5 | 71,4 |
| 200 | 72,8 | 62,0 | 62,1 | 67,2 | 71,0 | 70,4 | 70,9 |
| 300 | 72,8 | 59,0 | 60,0 | 62,0 | 69,8 | 70,3 | 70,6 |
| 400 | 72,8 | 57,8 | 58,0 | 61,1 | 66,3 | 70,1 | 70,1 |
| 600 | 72,8 | 54,0 | 57,8 | 59,9 | 67,1 | 68,2 | 69,0 |
| 800 | 72,8 | 53,7 | 57,0 | 60,6 | 65,9 | 68,0 | 68,8 |

ANEXO N° 02: Datos del índice dinámico de espumabilidad (DFI)

Tabla 12. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de MIBC pH=9

| MIBC pH=9 | 8 mg/L | 16 mg/L | 25 mg/L | 50 mg/L | 100 mg/L | 200 mg/L |
|------------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|
| Qg (L/min) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) |
| 0,6 | 0,03 | 0,07 | 0,08 | 0,07 | 0,05 | 0,21 |
| 1,0 | 0,05 | 0,10 | 0,10 | 0,14 | 0,21 | 0,37 |
| 1,2 | 0,05 | 0,11 | 0,12 | 0,17 | 0,29 | 0,50 |
| 1,4 | 0,06 | 0,13 | 0,15 | 0,21 | 0,38 | |
| 1,6 | 0,08 | 0,15 | 0,17 | 0,31 | 0,46 | |
| 2,0 | 0,09 | 0,18 | 0,23 | 0,34 | 0,60 | |

Tabla 13. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de CaLS pH=6

| CaLS pH 6 | 50 mg/L | 100 mg/L | 200 mg/L | 400 mg/L | 800 mg/L | 1600 mg/L |
|------------|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Qg (L/min) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) |
| 0,6 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| 1,0 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| 1,2 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,06 |
| 1,4 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,07 |
| 1,6 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,08 |
| 2,0 | 0,07 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 0,09 |

Tabla 14. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de CaLS pH=9

| CaLS pH 9 | 50 mg/L | 100 mg/L | 200 mg/L | 400 mg/L | 800 mg/L | 1600 mg/L |
|------------|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Qg (L/min) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) |
| 0,6 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| 1,0 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,05 |
| 1,2 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 1,4 | 0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,07 |
| 1,6 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,08 |
| 2,0 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |

Tabla 15. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de NaLS pH=6

| NaLS pH=6 | 8 mg/L | 25 mg/L | 50 mg/L | 100 mg/L | 200 mg/L |
|------------|--------|---------|---------|----------|----------|
| Qg (L/min) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) |
| 0,6 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,18 |
| 1,0 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,21 |
| 1,2 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,11 | 0,26 |
| 1,4 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,13 | 0,27 |
| 1,6 | 0,07 | 0,08 | 0,11 | 0,17 | 0,30 |
| 2,0 | 0,08 | 0,10 | 0,14 | 0,21 | 0,35 |

Tabla 16. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de NaLS pH=9

| NaLS pH=9 | 8 mg/L | 25 mg/L | 50 mg/L | 100 mg/L | 200 mg/L |
|------------|--------|---------|---------|----------|----------|
| Qg (L/min) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) |
| 0,6 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 0,10 |
| 1,0 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,10 | 0,14 |
| 1,2 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,14 | 0,20 |
| 1,4 | 0,06 | 0,06 | 0,08 | 0,17 | 0,26 |
| 1,6 | 0,07 | 0,08 | 0,10 | 0,18 | 0,36 |
| 2,0 | 0,09 | 0,11 | 0,14 | 0,20 | 0,43 |

Tabla 17. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de KLS pH=6

| KLS pH 6 | 8 mg/L | 25 mg/L | 50 mg/L | 100 mg/L |
|------------|--------|---------|---------|----------|
| Qg (L/min) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) |
| 0,6 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,06 |
| 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,07 |
| 1,2 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,08 |
| 1,4 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | |
| 1,6 | 0,09 | 0,09 | 0,10 | |
| 2,0 | 0,10 | 0,10 | 0,12 | |

Tabla 18. Datos de volumen total de gas versus flujo de gas a diferentes concentraciones de KLS pH=9

| KLS pH 9 | 8 mg/L | 25 mg/L | 50 mg/L | 100 mg/L |
|------------|--------|---------|---------|----------|
| Qg (L/min) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) | Vg (L) |
| 0,6 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,08 |
| 1,0 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,10 |
| 1,2 | 0,05 | 0,04 | 0,06 | 0,13 |
| 1,4 | 0,06 | 0,05 | 0,07 | |
| 1,6 | 0,07 | 0,06 | 0,09 | |
| 2,0 | 0,08 | 0,08 | 0,13 | |



ANEXO N° 03: Datos de distribución de tamaño de burbujas D₃₂.

Tabla 19. Distribución de tamaño de burbujas para el MIBC a pH=9

| MIBC pH=9 | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| | 5 mg/L | | 10 mg/L | | 15 mg/L | | 30 mg/L | | 60 mg/L | | 100 mg/L |
| d₃₂ (mm) | 1.02 | d₃₂ (mm) | 0.42 | d₃₂ (mm) | 0.34 | d₃₂ (mm) | 0.34 | d₃₂ (mm) | 0.34 | d₃₂ (mm) | 0.34 |
| d | f(x) |
| mm | °/1 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,02 |
| 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,01 | 0,14 | 0,07 | 0,14 | 0,07 | 0,14 | 0,07 | 0,14 | 0,30 |
| 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,14 | 0,21 | 1,24 | 0,21 | 1,24 | 0,21 | 1,24 | 0,21 | 2,05 |
| 0,28 | 0,00 | 0,28 | 1,31 | 0,28 | 5,32 | 0,28 | 5,32 | 0,28 | 5,32 | 0,28 | 5,20 |
| 0,35 | 0,00 | 0,35 | 4,42 | 0,35 | 5,87 | 0,35 | 5,87 | 0,35 | 5,87 | 0,35 | 4,84 |
| 0,42 | 0,00 | 0,42 | 5,47 | 0,42 | 1,66 | 0,42 | 1,66 | 0,42 | 1,66 | 0,42 | 1,66 |
| 0,49 | 0,02 | 0,49 | 2,49 | 0,49 | 0,12 | 0,49 | 0,12 | 0,49 | 0,12 | 0,49 | 0,21 |
| 0,56 | 0,06 | 0,56 | 0,42 | 0,56 | 0,00 | 0,56 | 0,00 | 0,56 | 0,00 | 0,56 | 0,01 |
| 0,63 | 0,20 | 0,63 | 0,03 | 0,63 | 0,00 | 0,63 | 0,00 | 0,63 | 0,00 | 0,63 | 0,00 |
| 0,70 | 0,53 | 0,70 | 0,00 | 0,70 | 0,00 | 0,70 | 0,00 | 0,70 | 0,00 | 0,70 | 0,00 |
| 0,77 | 1,09 | 0,77 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 0,77 | 0,00 |
| 0,84 | 1,83 | 0,84 | 0,00 | 0,84 | 0,00 | 0,84 | 0,00 | 0,84 | 0,00 | 0,84 | 0,00 |
| 0,91 | 2,46 | 0,91 | 0,00 | 0,91 | 0,00 | 0,91 | 0,00 | 0,91 | 0,00 | 0,91 | 0,00 |
| 0,98 | 2,65 | 0,98 | 0,00 | 0,98 | 0,00 | 0,98 | 0,00 | 0,98 | 0,00 | 0,98 | 0,00 |
| 1,05 | 2,31 | 1,05 | 0,00 | 1,05 | 0,00 | 1,05 | 0,00 | 1,05 | 0,00 | 1,05 | 0,00 |
| 1,12 | 1,61 | 1,12 | 0,00 | 1,12 | 0,00 | 1,12 | 0,00 | 1,12 | 0,00 | 1,12 | 0,00 |
| 1,19 | 0,91 | 1,19 | 0,00 | 1,19 | 0,00 | 1,19 | 0,00 | 1,19 | 0,00 | 1,19 | 0,00 |
| 1,26 | 0,41 | 1,26 | 0,00 | 1,26 | 0,00 | 1,26 | 0,00 | 1,26 | 0,00 | 1,26 | 0,00 |
| 1,33 | 0,15 | 1,33 | 0,00 | 1,33 | 0,00 | 1,33 | 0,00 | 1,33 | 0,00 | 1,33 | 0,00 |
| 1,40 | 0,04 | 1,40 | 0,00 | 1,40 | 0,00 | 1,40 | 0,00 | 1,40 | 0,00 | 1,40 | 0,00 |
| 1,47 | 0,01 | 1,47 | 0,00 | 1,47 | 0,00 | 1,47 | 0,00 | 1,47 | 0,00 | 1,47 | 0,00 |
| 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 |
| 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 |
| 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 |
| 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 |
| 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 |
| 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 |
| 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 |
| 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 |
| 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 |
| 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 |
| 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 |
| 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 |
| 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 |
| 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 |
| 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 |
| 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 |
| 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 |
| 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 |
| 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 |
| 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 |
| 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 |
| 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 |
| 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 |
| 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 |
| 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 |
| 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 |
| 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 |

Tabla 20. Distribución de tamaño de burbujas para el CaLS a pH=6

| CaLS pH=6 | | | | | | | | | |
|-----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| 50 mg/L | | 100 mg/L | | 200 mg/L | | 400 mg/L | | 800 mg/L | |
| d32 (mm) | 2,24 | d32 (mm) | 1,41 | d32 (mm) | 1,13 | d32 (mm) | 1,19 | d32 (mm) | 1,08 |
| d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) |
| mm | %/1 | mm | %/1 | mm | %/1 | mm | %/1 | mm | %/1 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,10 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,10 | 0,00 |
| 0,20 | 0,00 | 0,20 | 0,00 | 0,20 | 0,00 | 0,20 | 0,00 | 0,20 | 0,00 |
| 0,30 | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,27 | 0,00 |
| 0,40 | 0,00 | 0,40 | 0,00 | 0,40 | 0,00 | 0,40 | 0,00 | 0,35 | 0,09 |
| 0,50 | 0,00 | 0,50 | 0,00 | 0,50 | 0,00 | 0,50 | 0,00 | 0,41 | 0,18 |
| 0,60 | 0,00 | 0,60 | 0,01 | 0,60 | 0,03 | 0,60 | 0,03 | 0,51 | 0,39 |
| 0,70 | 0,00 | 0,70 | 0,04 | 0,70 | 0,15 | 0,65 | 0,13 | 0,61 | 0,76 |
| 0,80 | 0,01 | 0,80 | 0,12 | 0,80 | 0,54 | 0,71 | 0,45 | 0,71 | 1,20 |
| 0,90 | 0,02 | 0,90 | 0,30 | 0,90 | 1,32 | 0,80 | 0,92 | 0,81 | 1,59 |
| 1,00 | 0,03 | 1,00 | 0,62 | 1,00 | 2,20 | 0,91 | 1,52 | 0,91 | 1,74 |
| 1,10 | 0,06 | 1,10 | 1,05 | 1,10 | 2,47 | 1,01 | 1,94 | 1,01 | 1,59 |
| 1,20 | 0,11 | 1,20 | 1,48 | 1,20 | 1,88 | 1,12 | 1,94 | 1,10 | 1,20 |
| 1,30 | 0,17 | 1,30 | 1,72 | 1,30 | 0,97 | 1,21 | 1,51 | 1,20 | 0,76 |
| 1,40 | 0,26 | 1,40 | 1,66 | 1,40 | 0,34 | 1,31 | 0,98 | 1,31 | 0,40 |
| 1,50 | 0,37 | 1,50 | 1,32 | 1,50 | 0,08 | 1,41 | 0,45 | 1,50 | 0,09 |
| 1,60 | 0,50 | 1,60 | 0,87 | 1,60 | 0,01 | 1,60 | 0,07 | 1,60 | 0,02 |
| 1,70 | 0,63 | 1,70 | 0,48 | 1,70 | 0,00 | 1,70 | 0,01 | 1,70 | 0,00 |
| 1,80 | 0,76 | 1,80 | 0,21 | 1,80 | 0,00 | 1,80 | 0,00 | 1,80 | 0,00 |
| 1,90 | 0,87 | 1,90 | 0,08 | 1,90 | 0,00 | 1,90 | 0,00 | 1,90 | 0,00 |
| 2,00 | 0,93 | 2,00 | 0,02 | 2,00 | 0,00 | 2,00 | 0,00 | 2,00 | 0,00 |
| 2,10 | 0,95 | 2,10 | 0,01 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 |
| 2,20 | 0,91 | 2,20 | 0,00 | 2,20 | 0,00 | 2,20 | 0,00 | 2,20 | 0,00 |
| 2,30 | 0,83 | 2,30 | 0,00 | 2,30 | 0,00 | 2,30 | 0,00 | 2,30 | 0,00 |
| 2,40 | 0,71 | 2,40 | 0,00 | 2,40 | 0,00 | 2,40 | 0,00 | 2,40 | 0,00 |
| 2,50 | 0,57 | 2,50 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 2,50 | 0,00 |
| 2,60 | 0,44 | 2,60 | 0,00 | 2,60 | 0,00 | 2,60 | 0,00 | 2,60 | 0,00 |
| 2,70 | 0,32 | 2,70 | 0,00 | 2,70 | 0,00 | 2,70 | 0,00 | 2,70 | 0,00 |
| 2,80 | 0,22 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 |
| 2,90 | 0,14 | 2,90 | 0,00 | 2,90 | 0,00 | 2,90 | 0,00 | 2,90 | 0,00 |
| 3,00 | 0,09 | 3,00 | 0,00 | 3,00 | 0,00 | 3,00 | 0,00 | 3,00 | 0,00 |
| 3,10 | 0,05 | 3,10 | 0,00 | 3,10 | 0,00 | 3,10 | 0,00 | 3,10 | 0,00 |
| 3,20 | 0,03 | 3,20 | 0,00 | 3,20 | 0,00 | 3,20 | 0,00 | 3,20 | 0,00 |
| 3,30 | 0,01 | 3,30 | 0,00 | 3,30 | 0,00 | 3,30 | 0,00 | 3,30 | 0,00 |
| 3,40 | 0,01 | 3,40 | 0,00 | 3,40 | 0,00 | 3,40 | 0,00 | 3,40 | 0,00 |
| 3,50 | 0,00 | 3,50 | 0,00 | 3,50 | 0,00 | 3,50 | 0,00 | 3,50 | 0,00 |
| 3,60 | 0,00 | 3,60 | 0,00 | 3,60 | 0,00 | 3,60 | 0,00 | 3,60 | 0,00 |
| 3,70 | 0,00 | 3,70 | 0,00 | 3,70 | 0,00 | 3,70 | 0,00 | 3,70 | 0,00 |
| 3,80 | 0,00 | 3,80 | 0,00 | 3,80 | 0,00 | 3,80 | 0,00 | 3,80 | 0,00 |
| 3,90 | 0,00 | 3,90 | 0,00 | 3,90 | 0,00 | 3,90 | 0,00 | 3,90 | 0,00 |
| 4,00 | 0,00 | 4,00 | 0,00 | 4,00 | 0,00 | 4,00 | 0,00 | 4,00 | 0,00 |
| 4,10 | 0,00 | 4,10 | 0,00 | 4,10 | 0,00 | 4,10 | 0,00 | 4,10 | 0,00 |
| 4,20 | 0,00 | 4,20 | 0,00 | 4,20 | 0,00 | 4,20 | 0,00 | 4,20 | 0,00 |
| 4,30 | 0,00 | 4,30 | 0,00 | 4,30 | 0,00 | 4,30 | 0,00 | 4,30 | 0,00 |
| 4,40 | 0,00 | 4,40 | 0,00 | 4,40 | 0,00 | 4,40 | 0,00 | 4,40 | 0,00 |
| 4,50 | 0,00 | 4,50 | 0,00 | 4,50 | 0,00 | 4,50 | 0,00 | 4,50 | 0,00 |
| 4,60 | 0,00 | 4,60 | 0,00 | 4,60 | 0,00 | 4,60 | 0,00 | 4,60 | 0,00 |
| 4,70 | 0,00 | 4,70 | 0,00 | 4,70 | 0,00 | 4,70 | 0,00 | 4,70 | 0,00 |
| 4,80 | 0,00 | 4,80 | 0,00 | 4,80 | 0,00 | 4,80 | 0,00 | 4,80 | 0,00 |

Tabla 21. Distribución de tamaño de burbujas para el CaLS a pH=9

| CaLS pH=9 | | | | | | | | | |
|-----------|-------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| 50 mg/L | | 100 mg/L | | 200 mg/L | | 400 mg/L | | 800 mg/L | |
| d32 (mm) | 2,235 | d32 (mm) | 1,72 | d32 (mm) | 1,33 | d32 (mm) | 1,19 | d32 (mm) | 1,01 |
| d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) |
| mm | %1 | mm | %1 | mm | %1 | mm | %1 | mm | %1 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,10 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,10 | 0,00 |
| 0,20 | 0,00 | 0,20 | 0,00 | 0,20 | 0,00 | 0,20 | 0,00 | 0,20 | 0,02 |
| 0,30 | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,30 | 0,06 |
| 0,40 | 0,00 | 0,40 | 0,00 | 0,40 | 0,00 | 0,40 | 0,00 | 0,40 | 0,16 |
| 0,50 | 0,01 | 0,50 | 0,00 | 0,50 | 0,01 | 0,50 | 0,00 | 0,60 | 0,44 |
| 0,60 | 0,02 | 0,60 | 0,00 | 0,60 | 0,02 | 0,60 | 0,03 | 0,70 | 0,92 |
| 0,70 | 0,03 | 0,70 | 0,00 | 0,70 | 0,08 | 0,70 | 0,13 | 0,80 | 1,51 |
| 0,80 | 0,04 | 0,80 | 0,00 | 0,80 | 0,22 | 0,80 | 0,41 | 0,90 | 1,93 |
| 0,90 | 0,07 | 0,90 | 0,00 | 0,90 | 0,51 | 0,90 | 0,98 | 1,00 | 1,93 |
| 1,00 | 0,11 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 0,95 | 1,00 | 1,71 | 1,10 | 1,50 |
| 1,10 | 0,16 | 1,10 | 0,01 | 1,10 | 1,44 | 1,10 | 2,19 | 1,20 | 0,92 |
| 1,20 | 0,22 | 1,20 | 0,06 | 1,20 | 1,77 | 1,20 | 2,05 | 1,29 | 0,43 |
| 1,30 | 0,30 | 1,30 | 0,24 | 1,30 | 1,77 | 1,30 | 1,42 | 1,30 | 0,38 |
| 1,40 | 0,39 | 1,40 | 0,66 | 1,40 | 1,44 | 1,40 | 0,72 | 1,40 | 0,16 |
| 1,50 | 0,48 | 1,50 | 1,34 | 1,50 | 0,95 | 1,50 | 0,27 | 1,50 | 0,06 |
| 1,60 | 0,58 | 1,60 | 2,01 | 1,60 | 0,51 | 1,60 | 0,07 | 1,60 | 0,02 |
| 1,70 | 0,67 | 1,70 | 2,20 | 1,70 | 0,22 | 1,70 | 0,01 | 1,70 | 0,00 |
| 1,80 | 0,74 | 1,80 | 1,77 | 1,80 | 0,08 | 1,80 | 0,00 | 1,80 | 0,00 |
| 1,90 | 0,78 | 1,90 | 1,05 | 1,90 | 0,02 | 1,90 | 0,00 | 1,90 | 0,00 |
| 2,00 | 0,80 | 2,00 | 0,46 | 2,00 | 0,01 | 2,00 | 0,00 | 2,00 | 0,00 |
| 2,10 | 0,78 | 2,10 | 0,15 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 |
| 2,20 | 0,74 | 2,20 | 0,03 | 2,20 | 0,00 | 2,20 | 0,00 | 2,20 | 0,00 |
| 2,30 | 0,67 | 2,30 | 0,01 | 2,30 | 0,00 | 2,30 | 0,00 | 2,30 | 0,00 |
| 2,40 | 0,58 | 2,40 | 0,00 | 2,40 | 0,00 | 2,40 | 0,00 | 2,40 | 0,00 |
| 2,50 | 0,48 | 2,50 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 2,50 | 0,00 |
| 2,60 | 0,39 | 2,60 | 0,00 | 2,60 | 0,00 | 2,60 | 0,00 | 2,60 | 0,00 |
| 2,70 | 0,30 | 2,70 | 0,00 | 2,70 | 0,00 | 2,70 | 0,00 | 2,70 | 0,00 |
| 2,80 | 0,22 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 |
| 2,90 | 0,16 | 2,90 | 0,00 | 2,90 | 0,00 | 2,90 | 0,00 | 2,90 | 0,00 |
| 3,00 | 0,11 | 3,00 | 0,00 | 3,00 | 0,00 | 3,00 | 0,00 | 3,00 | 0,00 |
| 3,10 | 0,07 | 3,10 | 0,00 | 3,10 | 0,00 | 3,10 | 0,00 | 3,10 | 0,00 |
| 3,20 | 0,04 | 3,20 | 0,00 | 3,20 | 0,00 | 3,20 | 0,00 | 3,20 | 0,00 |
| 3,30 | 0,03 | 3,30 | 0,00 | 3,30 | 0,00 | 3,30 | 0,00 | 3,30 | 0,00 |
| 3,40 | 0,02 | 3,40 | 0,00 | 3,40 | 0,00 | 3,40 | 0,00 | 3,40 | 0,00 |
| 3,50 | 0,01 | 3,50 | 0,00 | 3,50 | 0,00 | 3,50 | 0,00 | 3,50 | 0,00 |
| 3,60 | 0,00 | 3,60 | 0,00 | 3,60 | 0,00 | 3,60 | 0,00 | 3,60 | 0,00 |
| 3,70 | 0,00 | 3,70 | 0,00 | 3,70 | 0,00 | 3,70 | 0,00 | 3,70 | 0,00 |
| 3,80 | 0,00 | 3,80 | 0,00 | 3,80 | 0,00 | 3,80 | 0,00 | 3,80 | 0,00 |
| 3,90 | 0,00 | 3,90 | 0,00 | 3,90 | 0,00 | 3,90 | 0,00 | 3,90 | 0,00 |
| 4,00 | 0,00 | 4,00 | 0,00 | 4,00 | 0,00 | 4,00 | 0,00 | 4,00 | 0,00 |
| 4,10 | 0,00 | 4,10 | 0,00 | 4,10 | 0,00 | 4,10 | 0,00 | 4,10 | 0,00 |
| 4,20 | 0,00 | 4,20 | 0,00 | 4,20 | 0,00 | 4,20 | 0,00 | 4,20 | 0,00 |
| 4,30 | 0,00 | 4,30 | 0,00 | 4,30 | 0,00 | 4,30 | 0,00 | 4,30 | 0,00 |
| 4,40 | 0,00 | 4,40 | 0,00 | 4,40 | 0,00 | 4,40 | 0,00 | 4,40 | 0,00 |
| 4,50 | 0,00 | 4,50 | 0,00 | 4,50 | 0,00 | 4,50 | 0,00 | 4,50 | 0,00 |
| 4,60 | 0,00 | 4,60 | 0,00 | 4,60 | 0,00 | 4,60 | 0,00 | 4,60 | 0,00 |
| 4,70 | 0,00 | 4,70 | 0,00 | 4,70 | 0,00 | 4,70 | 0,00 | 4,70 | 0,00 |
| 4,80 | 0,00 | 4,80 | 0,00 | 4,80 | 0,00 | 4,80 | 0,00 | 4,80 | 0,00 |

Tabla 22. Distribución de tamaño de burbujas para el NaLS a pH=6

| NaLS pH=6 | | | | | | | | | |
|-----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| 50 mg/L | | 100 mg/L | | 200 mg/L | | 400 mg/L | | 800 mg/L | |
| d32 (mm) | 1,72 | d32 (mm) | 1,23 | d32 (mm) | 1,06 | d32 (mm) | 0,85 | d32 (mm) | 0,49 |
| d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) |
| mm | %1 | mm | %1 | mm | %1 | mm | %1 | mm | %1 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 |
| 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,03 |
| 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,22 |
| 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,01 | 0,28 | 0,94 |
| 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,03 | 0,35 | 2,42 |
| 0,42 | 0,00 | 0,42 | 0,00 | 0,42 | 0,01 | 0,42 | 0,11 | 0,42 | 3,81 |
| 0,49 | 0,00 | 0,49 | 0,00 | 0,49 | 0,04 | 0,49 | 0,31 | 0,49 | 3,68 |
| 0,56 | 0,00 | 0,56 | 0,00 | 0,56 | 0,11 | 0,56 | 0,74 | 0,56 | 2,18 |
| 0,63 | 0,00 | 0,63 | 0,00 | 0,63 | 0,27 | 0,63 | 1,40 | 0,63 | 0,79 |
| 0,70 | 0,00 | 0,70 | 0,01 | 0,70 | 0,55 | 0,70 | 2,13 | 0,70 | 0,18 |
| 0,77 | 0,00 | 0,77 | 0,04 | 0,77 | 0,98 | 0,77 | 2,61 | 0,77 | 0,02 |
| 0,84 | 0,01 | 0,84 | 0,15 | 0,84 | 1,49 | 0,84 | 2,57 | 0,84 | 0,00 |
| 0,91 | 0,02 | 0,91 | 0,41 | 0,91 | 1,96 | 0,91 | 2,03 | 0,91 | 0,00 |
| 0,98 | 0,04 | 0,98 | 0,91 | 0,98 | 2,20 | 0,98 | 1,29 | 0,98 | 0,00 |
| 1,05 | 0,09 | 1,05 | 1,61 | 1,05 | 2,13 | 1,05 | 0,66 | 1,05 | 0,00 |
| 1,12 | 0,17 | 1,12 | 2,31 | 1,12 | 1,77 | 1,12 | 0,27 | 1,12 | 0,00 |
| 1,19 | 0,29 | 1,19 | 2,65 | 1,19 | 1,27 | 1,19 | 0,09 | 1,19 | 0,00 |
| 1,26 | 0,47 | 1,26 | 2,46 | 1,26 | 0,78 | 1,26 | 0,02 | 1,26 | 0,00 |
| 1,33 | 0,70 | 1,33 | 1,83 | 1,33 | 0,41 | 1,33 | 0,01 | 1,33 | 0,00 |
| 1,40 | 0,97 | 1,40 | 1,09 | 1,40 | 0,19 | 1,40 | 0,00 | 1,40 | 0,00 |
| 1,47 | 1,23 | 1,47 | 0,53 | 1,47 | 0,07 | 1,47 | 0,00 | 1,47 | 0,00 |
| 1,54 | 1,45 | 1,54 | 0,20 | 1,54 | 0,02 | 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 |
| 1,61 | 1,58 | 1,61 | 0,06 | 1,61 | 0,01 | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 |
| 1,68 | 1,58 | 1,68 | 0,02 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 |
| 1,75 | 1,47 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 |
| 1,82 | 1,27 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 |
| 1,89 | 1,01 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 |
| 1,96 | 0,74 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 |
| 2,03 | 0,50 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 |
| 2,10 | 0,32 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 |
| 2,17 | 0,18 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 |
| 2,24 | 0,10 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 |
| 2,31 | 0,05 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 |
| 2,38 | 0,02 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 |
| 2,45 | 0,01 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 |
| 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 |
| 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 |
| 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 |
| 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 |
| 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 |
| 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 |
| 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 |
| 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 |
| 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 |
| 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 |
| 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 |
| 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 |
| 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 |

Tabla 23. Distribución de tamaño de burbujas para el NaLS a pH=9.

| NaLS pH=9 | | | | | | | | | |
|-----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| 50 mg/L | | 100 mg/L | | 200 mg/L | | 400 mg/L | | 800 mg/L | |
| d32 (mm) | 1,79 | d32 (mm) | 1,25 | d32 (mm) | 1,05 | d32 (mm) | 0,88 | d32 (mm) | 0,59 |
| d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) | d | f(x) |
| mm | %1 | mm | %1 | mm | %1 | mm | %1 | mm | %1 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 |
| 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 |
| 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,01 |
| 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,01 | 0,28 | 0,10 |
| 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,03 | 0,35 | 0,80 |
| 0,42 | 0,00 | 0,42 | 0,00 | 0,42 | 0,01 | 0,42 | 0,11 | 0,42 | 2,18 |
| 0,49 | 0,00 | 0,49 | 0,00 | 0,49 | 0,05 | 0,49 | 0,30 | 0,49 | 6,70 |
| 0,56 | 0,01 | 0,56 | 0,00 | 0,56 | 0,13 | 0,56 | 0,67 | 0,56 | 3,80 |
| 0,63 | 0,02 | 0,63 | 0,01 | 0,63 | 0,30 | 0,63 | 1,23 | 0,63 | 2,40 |
| 0,70 | 0,03 | 0,70 | 0,05 | 0,70 | 0,61 | 0,70 | 1,88 | 0,70 | 0,90 |
| 0,77 | 0,05 | 0,77 | 0,13 | 0,77 | 1,05 | 0,77 | 2,37 | 0,77 | 0,35 |
| 0,84 | 0,08 | 0,84 | 0,30 | 0,84 | 1,57 | 0,84 | 2,47 | 0,84 | 0,06 |
| 0,91 | 0,12 | 0,91 | 0,61 | 0,91 | 2,01 | 0,91 | 2,13 | 0,91 | 0,01 |
| 0,98 | 0,18 | 0,98 | 1,05 | 0,98 | 2,21 | 0,98 | 1,51 | 0,98 | 0,00 |
| 1,05 | 0,26 | 1,05 | 1,57 | 1,05 | 2,10 | 1,05 | 0,89 | 1,05 | 0,00 |
| 1,12 | 0,36 | 1,12 | 2,01 | 1,12 | 1,71 | 1,12 | 0,43 | 1,12 | 0,00 |
| 1,19 | 0,48 | 1,19 | 2,21 | 1,19 | 1,20 | 1,19 | 0,17 | 1,19 | 0,00 |
| 1,26 | 0,61 | 1,26 | 2,10 | 1,26 | 0,72 | 1,26 | 0,06 | 1,26 | 0,00 |
| 1,33 | 0,75 | 1,33 | 1,71 | 1,33 | 0,37 | 1,33 | 0,02 | 1,33 | 0,00 |
| 1,40 | 0,88 | 1,40 | 1,20 | 1,40 | 0,17 | 1,40 | 0,00 | 1,40 | 0,00 |
| 1,47 | 1,00 | 1,47 | 0,72 | 1,47 | 0,06 | 1,47 | 0,00 | 1,47 | 0,00 |
| 1,54 | 1,08 | 1,54 | 0,37 | 1,54 | 0,02 | 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 |
| 1,61 | 1,13 | 1,61 | 0,17 | 1,61 | 0,01 | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 |
| 1,68 | 1,14 | 1,68 | 0,06 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 |
| 1,75 | 1,09 | 1,75 | 0,02 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 |
| 1,82 | 1,01 | 1,82 | 0,01 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 |
| 1,89 | 0,90 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 |
| 1,96 | 0,77 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 |
| 2,03 | 0,63 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 |
| 2,10 | 0,50 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 |
| 2,17 | 0,38 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 |
| 2,24 | 0,28 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 |
| 2,31 | 0,19 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 |
| 2,38 | 0,13 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 |
| 2,45 | 0,08 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 |
| 2,52 | 0,05 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 |
| 2,59 | 0,03 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 |
| 2,66 | 0,02 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 |
| 2,73 | 0,01 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 |
| 2,80 | 0,01 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 |
| 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 |
| 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 |
| 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 |
| 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 |
| 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 |
| 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 |
| 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 |
| 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 |

Tabla 24. Distribución de tamaño de burbujas para el KLS a pH=6.

| KLS pH=6 | | | | | | | | | |
|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| 50 ppm | | 100 ppm | | 200 ppm | | 400 ppm | | 800 ppm | |
| d32 (mm) | 1,64 | d32 (mm) | 1,06 | d32 (mm) | 0,90 | d32 (mm) | 0,49 | d32 (mm) | 0,48 |
| d | f(x) |
| mm | %1 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,05 |
| 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,03 | 0,14 | 0,22 |
| 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,22 | 0,21 | 0,72 |
| 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,94 | 0,28 | 1,68 |
| 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,01 | 0,35 | 2,42 | 0,35 | 2,80 |
| 0,42 | 0,00 | 0,42 | 0,01 | 0,42 | 0,04 | 0,42 | 3,81 | 0,42 | 3,32 |
| 0,49 | 0,00 | 0,49 | 0,04 | 0,49 | 0,15 | 0,49 | 3,68 | 0,49 | 2,80 |
| 0,56 | 0,00 | 0,56 | 0,11 | 0,56 | 0,41 | 0,56 | 2,18 | 0,56 | 1,68 |
| 0,63 | 0,00 | 0,63 | 0,27 | 0,63 | 0,91 | 0,63 | 0,79 | 0,63 | 0,72 |
| 0,70 | 0,01 | 0,70 | 0,55 | 0,70 | 1,61 | 0,70 | 0,18 | 0,70 | 0,22 |
| 0,77 | 0,02 | 0,77 | 0,98 | 0,77 | 2,31 | 0,77 | 0,02 | 0,77 | 0,05 |
| 0,84 | 0,05 | 0,84 | 1,49 | 0,84 | 2,65 | 0,84 | 0,00 | 0,84 | 0,01 |
| 0,91 | 0,09 | 0,91 | 1,96 | 0,91 | 2,46 | 0,91 | 0,00 | 0,91 | 0,00 |
| 0,98 | 0,16 | 0,98 | 2,20 | 0,98 | 1,83 | 0,98 | 0,00 | 0,98 | 0,00 |
| 1,05 | 0,27 | 1,05 | 2,13 | 1,05 | 1,09 | 1,05 | 0,00 | 1,05 | 0,00 |
| 1,12 | 0,42 | 1,12 | 1,77 | 1,12 | 0,53 | 1,12 | 0,00 | 1,12 | 0,00 |
| 1,19 | 0,61 | 1,19 | 1,27 | 1,19 | 0,20 | 1,19 | 0,00 | 1,19 | 0,00 |
| 1,26 | 0,83 | 1,26 | 0,78 | 1,26 | 0,06 | 1,26 | 0,00 | 1,26 | 0,00 |
| 1,33 | 1,06 | 1,33 | 0,41 | 1,33 | 0,02 | 1,33 | 0,00 | 1,33 | 0,00 |
| 1,40 | 1,27 | 1,40 | 0,19 | 1,40 | 0,00 | 1,40 | 0,00 | 1,40 | 0,00 |
| 1,47 | 1,41 | 1,47 | 0,07 | 1,47 | 0,00 | 1,47 | 0,00 | 1,47 | 0,00 |
| 1,54 | 1,48 | 1,54 | 0,02 | 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 |
| 1,61 | 1,44 | 1,61 | 0,01 | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 |
| 1,68 | 1,32 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 |
| 1,75 | 1,12 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 |
| 1,82 | 0,90 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 |
| 1,89 | 0,67 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 |
| 1,96 | 0,47 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 |
| 2,03 | 0,30 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 |
| 2,10 | 0,19 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 |
| 2,17 | 0,11 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 |
| 2,24 | 0,06 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 |
| 2,31 | 0,03 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 |
| 2,38 | 0,01 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 |
| 2,45 | 0,01 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 |
| 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 |
| 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 |
| 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 |
| 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 |
| 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 |
| 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 |
| 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 |
| 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 |
| 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 |
| 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 |
| 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 |
| 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 |
| 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 |

Tabla 25. Distribución de tamaño de burbujas para el KLS a pH=9.

| KLS pH=9 | | | | | | | | | |
|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| 50 ppm | | 100 ppm | | 200 ppm | | 400 ppm | | 800 ppm | |
| d32 (mm) | 1,64 | d32 (mm) | 1,23 | d32 (mm) | 0,90 | d32 (mm) | 0,48 | d32 (mm) | 0,47 |
| d | f(x) |
| mm | %/1 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,01 |
| 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,14 | 0,08 |
| 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,06 | 0,21 | 0,44 |
| 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,52 | 0,28 | 1,50 |
| 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,01 | 0,35 | 2,28 | 0,35 | 3,12 |
| 0,42 | 0,00 | 0,42 | 0,01 | 0,42 | 0,04 | 0,42 | 4,65 | 0,42 | 3,99 |
| 0,49 | 0,00 | 0,49 | 0,02 | 0,49 | 0,15 | 0,49 | 4,40 | 0,49 | 3,12 |
| 0,56 | 0,00 | 0,56 | 0,05 | 0,56 | 0,41 | 0,56 | 1,94 | 0,56 | 1,50 |
| 0,63 | 0,00 | 0,63 | 0,11 | 0,63 | 0,91 | 0,63 | 0,40 | 0,63 | 0,44 |
| 0,70 | 0,01 | 0,70 | 0,22 | 0,70 | 1,61 | 0,70 | 0,04 | 0,70 | 0,08 |
| 0,77 | 0,02 | 0,77 | 0,41 | 0,77 | 2,31 | 0,77 | 0,00 | 0,77 | 0,01 |
| 0,84 | 0,05 | 0,84 | 0,67 | 0,84 | 2,65 | 0,84 | 0,00 | 0,84 | 0,00 |
| 0,91 | 0,09 | 0,91 | 1,00 | 0,91 | 2,46 | 0,91 | 0,00 | 0,91 | 0,00 |
| 0,98 | 0,16 | 0,98 | 1,35 | 0,98 | 1,83 | 0,98 | 0,00 | 0,98 | 0,00 |
| 1,05 | 0,27 | 1,05 | 1,64 | 1,05 | 1,09 | 1,05 | 0,00 | 1,05 | 0,00 |
| 1,12 | 0,42 | 1,12 | 1,80 | 1,12 | 0,53 | 1,12 | 0,00 | 1,12 | 0,00 |
| 1,19 | 0,61 | 1,19 | 1,78 | 1,19 | 0,20 | 1,19 | 0,00 | 1,19 | 0,00 |
| 1,26 | 0,83 | 1,26 | 1,60 | 1,26 | 0,06 | 1,26 | 0,00 | 1,26 | 0,00 |
| 1,33 | 1,06 | 1,33 | 1,30 | 1,33 | 0,02 | 1,33 | 0,00 | 1,33 | 0,00 |
| 1,40 | 1,27 | 1,40 | 0,95 | 1,40 | 0,00 | 1,40 | 0,00 | 1,40 | 0,00 |
| 1,47 | 1,41 | 1,47 | 0,63 | 1,47 | 0,00 | 1,47 | 0,00 | 1,47 | 0,00 |
| 1,54 | 1,48 | 1,54 | 0,38 | 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 | 1,54 | 0,00 |
| 1,61 | 1,44 | 1,61 | 0,20 | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,00 |
| 1,68 | 1,32 | 1,68 | 0,10 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 | 1,68 | 0,00 |
| 1,75 | 1,12 | 1,75 | 0,04 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 | 1,75 | 0,00 |
| 1,82 | 0,90 | 1,82 | 0,02 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 1,82 | 0,00 |
| 1,89 | 0,67 | 1,89 | 0,01 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 | 1,89 | 0,00 |
| 1,96 | 0,47 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,96 | 0,00 |
| 2,03 | 0,30 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 | 2,03 | 0,00 |
| 2,10 | 0,19 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 | 2,10 | 0,00 |
| 2,17 | 0,11 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 | 2,17 | 0,00 |
| 2,24 | 0,06 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 2,24 | 0,00 |
| 2,31 | 0,03 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 2,31 | 0,00 |
| 2,38 | 0,01 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 | 2,38 | 0,00 |
| 2,45 | 0,01 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 | 2,45 | 0,00 |
| 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 0,00 |
| 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 |
| 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 | 2,66 | 0,00 |
| 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 | 2,73 | 0,00 |
| 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 | 2,80 | 0,00 |
| 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 | 2,87 | 0,00 |
| 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 | 2,94 | 0,00 |
| 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 | 3,01 | 0,00 |
| 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 | 3,08 | 0,00 |
| 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 | 3,15 | 0,00 |
| 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 | 3,22 | 0,00 |
| 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 | 3,29 | 0,00 |
| 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,00 |

ANEXO N° 04: Datos para la Recuperación de agua

Tabla 26. Datos de recuperación de agua versus concentración de MIBC a pH=9

| MIBC pH=9 | |
|------------|-----------------------|
| Conc, mg/L | Rec. de agua 5 min, g |
| 3 | 176 |
| 8 | 199 |
| 10 | 205 |
| 12 | 246 |
| 15 | 217 |
| 20 | 246 |
| 50 | 900 |
| 100 | 1500 |

Tabla 27. Datos de recuperación de agua versus concentración de CaLS a pH=6 y pH=9

| CaLS pH=6 | | CaLS pH=9 | |
|------------|-----------------------|------------|-----------------------|
| Conc, mg/L | Rec. de agua 5 min, g | Conc, mg/L | Rec. de agua 5 min, g |
| 100 | 183.94 | 100 | 174.92 |
| 200 | 185.33 | 200 | 183.69 |
| 400 | 190.03 | 400 | 185.34 |
| 800 | 190.76 | 800 | 195.36 |

Tabla 28. Datos de recuperación de agua versus concentración de NaLS a pH=6 y pH=9

| NaLS pH=6 | | NaLS pH=9 | |
|------------|-----------------------|------------|-----------------------|
| Conc, mg/L | Rec. de agua 5 min, g | Conc, mg/L | Rec. de agua 5 min, g |
| 100 | 152.77 | 100 | 178.25 |
| 200 | 180.75 | 200 | 158.46 |
| 400 | 231.49 | 400 | 204.13 |
| 800 | 644.565 | 800 | 418.01 |

Tabla 29. Datos de recuperación de agua versus concentración de KLS a pH=6 y pH=9

| KLS pH=6 | | KLS pH=9 | |
|------------|-----------------------|------------|-----------------------|
| Conc, mg/L | Rec. de agua 5 min, g | Conc, mg/L | Rec. de agua 5 min, g |
| 100 | 199.13 | 100 | 167.81 |
| 200 | 272.93 | 200 | 207.03 |
| 400 | 757.4 | 400 | 764.66 |
| 800 | 1228.11 | 800 | 1223.95 |