



UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
*Cuna de héroes, crisol de pensadores*

**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO MAESTRÍA EN  
CIENCIAS DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**"MEDICIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO DE AGUA DE  
MAR SOBRE UNA SUPERFICIE DE PIRITA EMPLEANDO  
UN COLECTOR TIPO XANTATO Y ESPUMANTE MIBC"**

# **TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA:**

**Ing. Ludwig Neftali Cruz Sanchez**

**ASESORES:**

**Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamontes**

**Dra. Alicia Aguilar Corona**



**CONACYT**

*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*

Morelia Michoacán, Junio de 2017

## DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado principalmente a mi familia, ya que sin su apoyo nada de esto sería posible.

En primer lugar, a mis padres Humberto y Evelin, ya que son el mejor ejemplo a seguir y me han demostrado todo su apoyo a lo largo de este camino de superación personal e intelectual, por su ejemplo de perseverancia y cariño incondicional, por impulsarme para alcanzar mis sueños y plantear mis metas, porque a pesar de los problemas que han surgido en este tiempo me han demostrado que lo importante es ser feliz. Siempre tienen una parte de mi corazón.

A mi hermana Sthephany y mi sobrino Daniel, que con su cariño me han hecho ver que nada importa más que el amor que recibes de quien da lo mejor de sí. Complementan mi felicidad.

A mi esposa Daniela, que en esta nueva etapa de nuestra vida ha demostrado entereza ante las adversidades y me ha servido como ejemplo de paciencia y perseverancia, y para la nueva vida que se gesta dentro de ella ya que sirve de motivación para conseguir lo que nos proponemos. Por ellos doy todo incondicionalmente.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco hoy y siempre a mi familia.

Agradezco a mis asesores: Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamontes y la Dra. Alicia Aguilar Corona por la disposición, la confianza, ayuda, su apoyo y comprensión brindada durante este tiempo.

Agradezco al Posgrado de Ingeniería Mecánica y a sus profesores por la dedicación, su excelente trabajo y el tiempo que me brindaron.

Agradezco a mis amigos de la facultad por el apoyo y lealtad, por compartir los ratos felices y las angustias, los tiempos libres y los tiempos difíciles.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo monetario recibido bajo el programa de posgrados de calidad.

## RESUMEN

Este trabajo se centra en el estudio de la interface sólido-líquido-aire de una muestra de pirita y agua de mar. Mediante estudios interfaciales de ángulo de contacto se establecieron las condiciones que favorecieran una mejor recuperación de pirita empleando agua de mar, a la cual se le adicionó surfactantes tipo colector y espumante que se emplean en procesos de flotación en la industria de hidrometalurgia.

El proceso de recuperación de minerales por flotación generalmente se realiza utilizando agua dulce, sin embargo existen yacimientos minerales que no se encuentran cerca de una fuente natural de agua dulce ya que están situados en áreas desérticas donde el recurso hídrico más cercano es el agua de mar. Esto hace que los costos de producción se eleven debido a la escases del recurso, o que no sean explotadas en su totalidad, por lo que es necesario generar estudios que nos permitan aprovechar los recursos disponibles en el área. Recientemente se ha mostrado un interés en el empleo de agua de mar como una alternativa para reducir el uso de agua dulce en las plantas de metalurgia.

La diversidad de factores involucrados en el proceso de recuperación de minerales hace más complejo su estudio, es por ello que se parte de estudios fundamentales de tensión superficial y ángulo de contacto para conocer las propiedades del agua de mar y su mojabilidad sobre superficies de pirita. Primeramente, se caracterizó el agua de mar y se comparó con valores obtenidos en soluciones salinas o agua desionizada. Para el agua de mar se obtuvieron principalmente valores de conductividad, tensión superficial y su composición química mediante Emisión Atómica por Plasma. La muestra de pirita se caracterizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido y Difracción de rayos X. Al variar las condiciones experimentales se modifican las propiedades de la interface líquido-sólido y con ello la mojabilidad del agua de mar sobre la superficie de pirita se ve afectada. Los valores obtenidos en ángulo de contacto permiten determinar la mojabilidad del

agua de mar o el grado de hidrofobicidad que presenta la superficie de pirita. Estudios previos han mostrado valores de recuperación de pirita al variar la concentración de diferentes espumantes y colectores, así como variaciones en pH (López Valdivieso et al., 2004 y 2005). Este último factor influye en la formación de diferentes especies químicas sobre la superficie de pirita y modifica directamente la flotación del mineral. Tanto la concentración de espumante y colector, así como las condiciones de pH fueron consideradas en el estudio de ángulo de contacto entre agua de mar y pirita.

Una vez que se determinaron las condiciones que favorecen una mayor hidrofobicidad de la pirita al aumentar el ángulo de contacto entre el agua de mar y la superficie de pirita, se realizaron experimentos de microflotación. Los resultados de la microflotación permitieron cuantificar el porcentaje de recuperación de la pirita empleando agua de mar.

Los resultados de este estudio muestran un alto porcentaje de recuperación de pirita empleando agua de mar, apoyando que es factible el reemplazar el uso de agua potable por agua de mar dentro de los procesos de recuperación de minerales por flotación en las plantas de Hidrometalurgia.

Palabras clave: Ángulo de contacto, mojabilidad, espumante, colector, microflotación.

## **ABSTRACT**

This work focuses on the study of a solid-liquid-air interface from a pyrite sample and seawater. Through interfacial studies of contact angle, the favorable conditions to obtain a better recovery of pyrite using seawater were established, while surfactants such as collector and frother used in flotation processes in the hydrometallurgy industry were added to seawater.

The mineral recovery process usually uses fresh water, nevertheless, there are some mines that are not close to any fresh water resource because are situated in deserted areas where the only water resource is seawater. This increase the costs of production and limits the full recovery of mineral, because of that is important to generate studies to look for alternatives and take advantage of the available resources. Recently there has been an interest in the use of seawater as an alternative to reduce the use of fresh water in hidrometallurgy plants.

The variety of factors involved in the mineral recovery process makes its study more complex, therefore we started on fundamental studies of surface tension and contact angle to establish seawater properties and the wettability of seawater on pyrite surfaces. First, the seawater was characterized and it was compared either with the values obtained from saline solutions or deionized water. Mainly values of conductivity and surface tension were obtained for seawater, and its chemical composition was obtained by Plasma Atomic Emission Spectroscopy. The pyrite sample was characterized by Scanning Electron Microscopy and X-ray Diffraction.

The properties of the liquid-solid interface are modified when the experimental conditions change, and therefore the wettability of seawater on the pyrite surface is affected. The value obtained from the contact angle represents the wettability of seawater, i.e. the degree of hydrophobicity of the pyrite surface.

Previous studies have shown recovery values of pyrite by varying the concentration of different frothers and collectors, as well as variations on pH (López Valdivieso et al., 2004 and 2005). This last factor influences the formation of different chemical species on the pyrite surface, and this directly modifies the mineral's flotation. In the study of the contact angle of seawater on pyrite different conditions of pH and frother and collector concentrations were considered.

Once the favorable conditions to obtain a greater hydrophobicity of the pyrite were determined by increasing the contact angle of seawater on the pyrite surface, then the microflotation experiments were performed. The results of the microflotation experiments allowed to quantify the pyrite recovery percentage using seawater.

The results of this study showed a high pyrite recovery percentage using seawater, supporting that it is feasible to replace the use of fresh water by seawater in the mineral recovery processes by flotation at Hydrometallurgy plants.

Keywords: Contact angle, wettability, frother, collector, microflotation.

# ÍNDICE

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS .....	II
RESUMEN .....	III
ABSTRACT .....	V
ÍNDICE .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	1
ÍNDICE DE TABLAS .....	3
ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....	4
CAPITULO 1 .....	5
INTRODUCCIÓN .....	5
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
1.2 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA .....	7
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	10
1.4 HIPÓTESIS .....	11
1.5 OBJETIVOS .....	12
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
1.6 MARCO TEÓRICO.....	13
1.6.1 FENÓMENOS SUPERFICIALES .....	13
1.6.2 SUPERFICIE, INTERFACE E INTERFASE .....	13
1.6.3 MOJABILIDAD .....	14
1.6.4 TENSIÓN SUPERFICIAL .....	16
1.6.5 CAPILARIDAD .....	17
1.6.6 ADSORCIÓN.....	20
1.6.7 ADHESIÓN.....	23
1.6.8 FACTORES QUE AFECTAN A LOS FENÓMENOS SUPERFICIALES.	24
1.6.9 TEORÍA DLVO (DERYAGIN–LANDAU–VERWEY–OVERBEEK).....	25
1.6.10 SURFACTANTE O TENSOACTIVOS .....	29
1.6.11 MÉTODOS DE MEDICION DE TENSIÓN SUPERFICIAL .....	30
1.6.12 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO .....	31
1.6.13 FLOTACIÓN DE MINERALES .....	33



1.6.14 MICROFLOTACIÓN .....	38
1.6.15 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO .....	39
1.6.16 DIFRACCIÓN DE RAYOS X .....	41
CAPÍTULO 2 .....	43
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	43
2.1 MATERIALES Y EQUIPOS .....	43
2.2 PROCEDIMIENTO .....	45
2.3 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE PIRITA .....	46
2.4 EMPLEO DEL SOFTWARE PARA ÁNGULO DE CONTACTO .....	47
CALIBRACIÓN DEL TESIÓMETRO .....	48
2.5 MEDICIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO .....	49
2.6 ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ATÓMICA POR PLASMA.....	52
2.7 MEDICIONES DE MICROFLOTACIÓN .....	53
2.8 PARÁMETROS DE AJUSTE.....	54
CAPITULO 3 .....	58
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	58
3.1 DETERMINACIÓN QUÍMICA DE LA PIRITA Y EL AGUA DE MAR .....	59
3.1.1 ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO .....	60
3.1.2 ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X .....	60
3.1.3 ANALISIS POR EMISIÓN ATÓMICA DE PLASMA.....	61
3.2 CONDUCTIVIDAD.....	62
3.3 TENSIÓN SUPERFICIAL.....	65
3.3.1 TENSIÓN SUPERFICIAL DE AGUA DE MAR Y SOLUCIONES SALINAS A VARIANDO SU CONCENTRACION DE NACL. ....	66
3.3.2 TENSIÓN SUPERFICIAL DEL AGUA DE MAR CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DEL ESPUMANTE MIBC.....	69
3.3.3 TENSIÓN SUPERFICIAL DEL AGUA DE MAR CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DEL COLECTOR XIBS.....	71
3.3.4 TENSIÓN SUPERFICIAL A CONCENTRACIÓN FIJA DE COLECTOR Y ESPUMANTE CON VARIACIÓN EN EL PH. ....	72
3.4 ÁNGULO DE CONTACTO .....	73
3.4.1 ÁNGULO DE CONTACTO CON SOLUCIONE SALINAS .....	74
3.4.2 ÁNGULO DE CONTACTO DE AGUA DE MAR SOBRE PIRITA A DIFERENTES PH.....	78

3.4.3	ÁNGULO DE CONTACTO DE AGUA DE MAR SOBRE PIRITA A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE COLECTOR.....	80
3.4.4	ÁNGULO DE CONTACTO DE AGUA DE MAR SOBRE PIRITA A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESPUMANTE. ....	81
3.4.5	ÁNGULO DE CONTACTO DE AGUA DE MAR SOBRE PIRITA VARIANDO PH A CONCENTRACIÓN FIJA DE ESPUMANTE Y COLECTOR. ....	83
3.5	MICROFLOTACIÓN .....	84
4	CONCLUSIONES.....	86
4.1	PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO.....	88
4.2	LIMITACIONES ENCONTRADAS DURANTE EL ESTUDIO .....	88
	ACCIONES DE DIFUSIÓN.....	89
	BIBLIOGRAFÍA .....	92

# ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPITULO 1

Figura 1.0 Flotabilidad de la pirita con  $1 \times 10^{-4}$  mol/l de Xantato Isopropílico de Sodio en función del pH en ausencia y presencia de varias concentraciones de dextrina.

Figura 1.1 Esquema geométrico de la región interfacial [1]. p. 44

Figura 1.2 Contacto trifásico sólido-líquido-fluido. p. 15

Figura 1.3 Esquema de la fuerza que actúa sobre una molécula del líquido según su proximidad a la superficie [2]. p. 16

Figura 1.4 Dispositivo representativo para explicar la manera de calcular la energía superficial [2]. p. 16

Figura 1.5 Diagrama de la fuerza de capilaridad y las fuerzas que intervienen en el proceso. p.18

Figura 1.6 (A) Comparación entre adhesión por capilaridad y (B) cohesión. p. 18

Figura 1.7 Representación del proceso de adsorción. p. 20

Figura 1.8 Representación del proceso de adsorción eléctrica. p. 21

Figura 1.9 Representación del proceso de adsorción física. p. 22

Figura 1.10 Representación del proceso de adsorción química. p. 23

Figura 1.11 Esquema del ángulo de contacto aparente contra el verdadero, debido a una histéresis en la medición del ángulo de contacto. p. 25

Figura 1.12 Gráfico que muestra el efecto neto de las fuerzas de atracción y repulsión según la teoría DLVO. p. 28

Figura 1. 13 Estructura molecular de un tensoactivo anfifílico. p. 29

Figura 1.14 Diámetros representativos para calcular la tensión superficial mediante el método de la gota pendiente. p. 30

Figura 1.15 Esquema de la gota sésil [3]. p. 31

Figura 1.16 Esquema de un goniómetro [3]. p. 32

Figura 1.17 (A) Gota de aceite cautiva en agua, colocada debajo de la fase sólida. (B) Gota de agua cautiva en aceite, colocada sobre la fase sólida. p. 33

Figura 1.18 Celda Denver usada en la industria para la extracción selectiva de minerales por flotación de espumas. p. 36

Figura 1.19 Celda Hallimond usada en la microflotación de minerales. p. 39

Figura 1.20 Diagrama interno del funcionamiento del MEB [4]. p. 41

Figura 1.21 Proceso de determinación de la estructura de una molécula por cristalografía de rayos X [5]. p. 42

## CAPITULO 2

Figura 2.1 Panel de control del software Attension Theta. p. 47

- Figura 2.2 Balín de 4 mm enfocado en la ventana de calibración del software. p. 48
- Figura 2.3 (A) Celda de aislamiento cubierta con Parafilm. (B) Lente nivelados con nivel de burbuja. p. 50
- Figura 2.4 Método para nivelar la muestra de pirita sobre un plano. p. 51
- Figura 2.5 Imagen de captura de una gota con el Software Attention Theta. p. 51
- Figura 2.6 Sistema de filtrado de agua de mar. p. 52
- Figura 2.7 Pirita en solución ácida antes de las 48 h y pirita digerida al transcurrir las 48 h. p. 53
- Figura 2.8 Gráfica del Ángulo de Contacto vs Volumen de la gota para una solución al 6 % w/w de NaCl. p. 55
- Figura 2.9 Gráfica del Ángulo de Contacto vs Tiempo de una gota de agua des-ionizada sobre pirita en un tiempo 250 s – 350 s. p. 56

## CAPITULO 3

- Figura 3.1 (A). Resultado de los principales componentes de la muestra de pirita analizada. (B). Imagen de las tres muestras de pirita analizadas bajo el MEB. p. 60
- Figura 3.2 Resultado del análisis de difracción de rayos X. p. 61
- Figura 3.4 Gráfica de Conductividad vs Concentración de NaCl en el rango de 5 – 25 % en fracción de peso. p. 64
- Figura 3.5 Conductividad de soluciones de NaCl vs %Concentración w/w 1-6% de NaCl, el 0% corresponde al agua desionizada. p. 65
- Figura 3.6 Tensión superficial vs concentración NaCl [%w/w] rango de 5%-25% w/w. p. 67
- Figura 3.7 Tensión superficial vs % concentración w/w de NaCl 1%-6% w/w, el 0% corresponde al agua desionizada. p. 68
- Figura 3.8 Tensión superficial vs concentración de espumante MIBC en agua de mar. p. 70
- Figura 3.9 Tensión superficial vs concentración de colector XIBS. p. 71
- Figura 3.10 Tensión superficial a un valor fijo de colector XIBS y colector MIBC empleando agua de mar. p. 73
- Figura 3.11 Ángulo de Contacto vs % concentración NaCl [% w/w] rango de 5 % - 25 % w/w. p. 76
- Figura 3.12 Gráfica del Ángulo de Contacto vs concentración NaCl [% w/w] en un rango de 1 % - 6 %, el 0 % corresponde al agua desionizada. p. 77
- Figura 3.13 Comparación del ángulo de contacto a diferentes pH usando agua de mar y agua desionizada sobre pirita (FeS<sub>2</sub>). p. 79
- Figura 3.14 Ángulo de contacto a diferentes concentraciones de XIBS usando agua de mar a pH 7 sobre una superficie de pirita (FeS<sub>2</sub>), el 0% corresponde al valor del agua de mar sin colector. p. 81
- Figura 3.15 Ángulo de Contacto a diferentes concentraciones de MIBC usando agua de mar a pH 7 sobre pirita (FeS<sub>2</sub>). p. 82

Figura 3.16 Ángulo de contacto usando agua de mar y agua desionizada a diferentes pH con una concentración de 14 mg/L de espumante MIBC y  $1 \times 10^{-4}$  M de colector Xantato. p. 83

Figura 3.17 Flotación de pirita con agua de mar a un pH de 5. p. 85

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPITULO 2

Tabla 1.1 Resumen del efecto de las cargas de atracción y repulsión actuando sobre una partícula. p. 28

### CAPITULO 2

Tabla 2.1 Descripción de las funciones de los botones del menú principal del software Attention Theta. pp. 47-48

Tabla 2.2 Elementos químicos analizados en las muestras de pirita y el agua de mar. p. 53

### CAPITULO 3

Tabla 3.1. Resultado de la composición química del agua de mar analizada por el equipo de emisión atómica de plasma. p. 61

Tabla 3.2 Conductividad medida en las soluciones con concentración 5 - 25 % w/w de NaCl y el valor obtenido para el agua de mar. p. 63

Tabla 3.3 Conductividad para soluciones salinas con concentración de 1 - 6 % w/w de NaCl. p.63

Tabla 3.4 Valores medidos para la tensión superficial en soluciones salinas 5 - 25 % w/w, agua desionizada y agua de mar. p. 66

Tabla 3.5 Valores medidos para la tensión superficial en soluciones salinas 1 % - 6 % w/w, agua desionizada y agua de mar. p. 67

Tabla 3.6 Ángulo de contacto del agua desionizada, agua de mar y soluciones salinas en el rango de 5 % - 25 % w/w sobre una superficie de pirita. p. 75

Tabla 3.7 Ángulo de contacto del agua desionizada, agua de mar y soluciones salinas en el rango de 1 % - 6 % w/w sobre una superficie de pirita. p. 75

Tabla 3.8 Ángulo de contacto a diferentes pH con agua desionizada y agua de mar. p. 79

Tabla 3.9 Porcentaje de recuperación usando agua desionizada a diferentes pH con una concentración de 14 mg/L de espumante MIBC y  $1 \times 10^{-4}$  mol/L de Xantato. p. 84

Tabla 3.10. Porcentaje de recuperación usando agua de mar a diferentes pH con una concentración de 14 mg/L de espumante MIBC y  $1 \times 10^{-4}$  mol/L de Xantato. p. 85

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$\theta$	Ángulo de contacto
S	Conductividad
$\sigma$	Tensión superficial
R	Porcentaje de Recuperación
$\theta_A$	Ángulo de contacto acumulativo
W <sub>r</sub>	Peso del mineral recuperado
W <sub>c</sub>	Peso de las colas
$\gamma_{SF}$	Tensión interfacial entre el sólido y el fluido
$\gamma_{LS}$	Tensión interfacial entre el líquido y el sólido
$\theta_L$	Ángulo entre el sólido y el líquido
$\theta_F$	Ángulo entre el sólido y el fluido
$\gamma$	Energía superficial
P <sub>o</sub>	Presión atmosférica
$\rho_v$	Densidad del aire
$\rho_L$	Densidad del líquido
g	Gravedad (9.81 m/s)
h	Altura
r <sub>c</sub>	Radio del capilar
r <sub>m</sub>	Radio del menisco
r	Radio de la gota
C <sub>s</sub>	Concentración de sal
C <sub>E</sub>	Concentración de espumante
C <sub>C</sub>	Concentración de colector
XIBS	Colector Xantato Isobutilico de Sodio
MIBC	Espumante Metil Isobutil Carbinoil

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las bases que fundamentan el trabajo realizado, se parte del planteamiento del problema y una ligera introducción del estado de arte respecto al estudio de sustitución de agua potable por agua dulce en el proceso de flotación selectiva de minerales. Por otro lado, se justifica estudio del presente trabajo así como los objetivos planteados en esta investigación, finalmente se analizan los temas necesarios para dar un marco teórico de referencia para los resultados obtenidos.

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de recuperación de minerales por flotación generalmente se realiza utilizando agua dulce, sin embargo existen yacimientos minerales que no se encuentran cerca de una fuente natural de agua dulce ya que están situados en áreas desérticas donde el recurso hídrico más cercano es el agua de mar los que hace que los costos de producción se eleven debido a la escases del recurso o que no sean explotadas en su totalidad por lo que es necesario generar estudios que nos permitan aprovechar los recursos disponibles en el área .

Con el uso de agua de mar en el proceso de recuperación de minerales por flotación se hace necesario generar un estudio que nos proporcione el comportamiento de la mojabilidad y la espuma, factores esenciales para la recuperación de minerales, ya que el agua de mar posee diferente tensión superficial con respecto al agua dulce, debido a los iones libres que presenta y por lo tanto diferente mojabilidad sobre el mineral que se desea extraer. Además de la diferente composición química y agentes microbiológicos que difieren a las del agua dulce.

La complejidad de los factores involucrados durante la recuperación de minerales limita su estudio, por lo tanto, se partirá de estudios de medición de tensión superficial, posteriormente ángulo de contacto y finalmente microflotación que nos proporcionará información fundamental para conocer la mojabilidad del agua de mar sobre superficies de pirita y encontrar la factibilidad del uso del agua de mar en el proceso.



## 1.2 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

El estudio de alternativas al uso de agua potable en los procesos de flotación selectiva de minerales es relativamente reciente ya que debido a la escases de recursos hídricos cercanos a las plantas de hidrometalurgia de reciente aparición, es necesario buscar maneras de aprovechar al máximo el agua, ya sea reutilizando el agua del proceso o como en el trabajo propuesto usando agua de mar como una alternativa al uso del agua dulce, algunos de las publicaciones que nos aportan antecedentes sobre el presente trabajo, se muestran abajo:

*Bo Wang et al. (2014)*. Analizan cómo el efecto de las soluciones salinas afecta el proceso de flotación de minerales debido a los iones liberados por el NaCl, de lo anterior se decide analizar el efecto que tiene soluciones salinas a diferentes concentraciones en la mojabilidad de la superficie de pirita.

*Koval et al. (2014)*. Realiza mediciones de ángulo de contacto de piezas provenientes de diferentes yacimientos de mineral aplicando varios tipos de colectores, lo que podemos corroborar en este trabajo es que el ángulo de contacto disminuye lo que nos permitió tomar el criterio de trabajar con valores fijos de  $1 \times 10^{-4}$  M de concentración de Xantato Isobutílico de Sodio (XIBS).

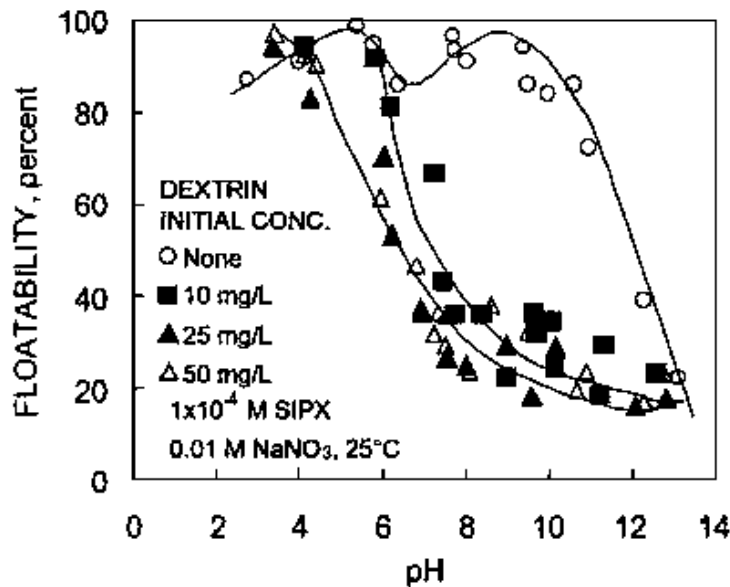
*Wenyong Liu et al. (2013)*. Realizan una revisión de cómo la calidad del agua afecta el proceso de recuperación de minerales todo ello derivado de la disminución de recursos hídricos para el ahorro del consumo de agua en el proceso. Derivado de lo anterior es que se buscan alternativas al uso de agua potable y razón por la cual este trabajo busca incursionar en la implementación de agua de mar como sustituto del agua dulce en las plantas de hidrometalurgia.

*Chau, T.T. et al. (2009)*. Revisa las causas que modifican la mojabilidad y el efecto que acarrea en el proceso de recuperación de minerales por flotación, derivado de éste artículo es que se decide estudiar el efecto principalmente desde la

perspectiva de mojabilidad y el efecto que éste tiene en los porcentajes de recuperación de pirita en los experimentos realizados.

*López Valdivieso et al. (2005).* Revisa el efecto del pH sobre la superficie de pirita y las especies químicas que alteran la hidrofobicidad de la pirita cuando ha sido oxidada debido a la presencia de hidróxidos, debido a esto, se tiene especial cuidado en controlar el pH de las soluciones y se verifica que efectivamente a altos pH la pirita se vuelve menos hidrofóbica.

*López Valdivieso et al. (2004).* Estudia la flotación de Pirita en función del pH a una concentración de Xantato XIBS y dextrina como depresor, lo que sirve de base para que en este trabajo se mida el ángulo de contacto variando la concentración de espumante tipo MIBC y la concentración de colector tipo Xantato XIBS sobre superficie de pirita.



**Figura 1.0** Flotabilidad de la pirita con  $1 \times 10^{-4}$  mol/l de Xantato Isopropílico de Sodio en función del pH en ausencia y presencia de varias concentraciones de dextrina.

Y si comparamos los resultados de los experimentos de flotación realizados en este trabajo contra los encontrados por Valdivieso, podemos concluir que los resultados son congruentes con los porcentajes de recuperación.

Norma ASTM por sus siglas en inglés de American Society for Testing and Materials donde se indica un procedimiento para preparar agua de mar artificial, de tal documento se tomaron los elementos que se buscan en el agua de mar para el análisis de espectrometría atómica.

Esta investigación busca aplicar las ciencias interfaciales para validar que el agua de mar es una alternativa viable como remplazo en las plantas metalúrgicas que recuperan mineral mediante flotación selectiva además de abrir el campo de investigación sobre las repercusiones de la aplicación del agua de mar para dicho proceso, insumo de agentes químicos y porcentajes de recuperación.

Por otra parte también se busca disminuir el consumo de agua dulce que puede ser aprovechado directamente para el consumo humano además de poder tomar ventaja del recurso más abundante en la superficie de la tierra como lo es el agua de mar aunado a la conservación del medio circundante.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

El gran consumo de agua por las industrias metalúrgica para la extracción de minerales por flotación hace necesario buscar alternativas para minimizar el consumo del líquido.

Para el caso en que se desea reemplazar por agua de mar, es necesario realizar estudios de caracterización, ya que actualmente existen pocos trabajos que caractericen las propiedades de la interface de las burbujas de aire en sistemas de recuperación de minerales por flotación utilizando agua de mar, por eso en este trabajo se realizaran una serie de experimentos a fin de cuantificar dichas propiedades.

Con dicho trabajo se busca comparar la factibilidad del uso de agua de mar en lugar del agua además de contribuir a reducir los costos de operación de las plantas de hidrometalurgia.

Por otro lado, se propone realizar trabajo experimental a escala que no ponga en riesgo la productividad y costos de operación en plantas industriales en hidrometalurgia.

## 1.4 HIPÓTESIS

Caracterizando las propiedades interfaciales de mojabilidad del sistema de tres fases: aire, agua de mar y mineral, variando las concentraciones tanto de espumante como colector y modificando el pH, se pueden determinar las condiciones del sistema que permitan una mejor recuperación de mineral por flotación. Y con ello poder contribuir en estudios de factibilidad del reemplazo de agua dulce por agua de mar durante la recuperación de minerales en procesos de flotación.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar el grado de mojabilidad del agua de mar sobre una superficie de mineral pirita  $\text{FeS}_2$  en presencia del espumante MIBC y colector XIBS y estudiar cómo esta propiedad modifica la recuperación de pirita por flotación.

### 1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Construir una celda experimental para la medición de ángulo de contacto.
2. Medir la conductividad y la tensión superficial de las diferentes soluciones salinas y el agua de mar.
3. Medir la tensión superficial de espumante y colector a varias concentraciones usando agua de mar.
4. Caracterizar la mojabilidad de agua de mar sobre pirita mediante mediciones de ángulo de contacto y compararla con agua desionizada.
5. Medir el ángulo de contacto del agua de mar sobre pirita a diferentes pH.
6. Medir el ángulo de contacto del agua de mar sobre pirita a diferentes concentraciones de espumante MIBC y colector Xantato XIBS.

## 1.6 MARCO TEÓRICO

### 1.6.1 FENÓMENOS SUPERFICIALES

Los estados de la materia mantienen propiedades físico-químicas y termodinámicas bien definidas, sin embargo, nuevas propiedades surgen cuando dos estados o fases de la materia se encuentran en contacto, la línea límite de contacto recibe el nombre de interface y los fenómenos asociados a esta línea se conocen como “fenómenos interfaciales”, entre ellos se encuentran *la tensión superficial, la capilaridad, la mojabilidad, la adsorción y la adhesión*. Todos estos fenómenos están relacionados entre sí y se basan en el desequilibrio energético que existe en la superficie del material, lo que conocemos como energía superficial.

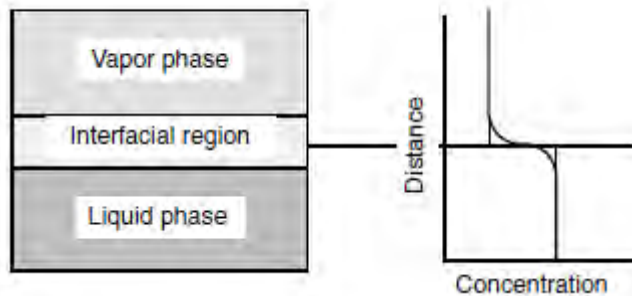
### 1.6.2 SUPERFICIE, INTERFACE E INTERFASE

Los términos superficie, interface e interfase, comúnmente se usan de manera indistinta para representar el límite entre dos fases macroscópicas de un sistema heterogéneo, a pesar de que hay diferencias entre estos términos.

Desde el punto de vista microscópico, una superficie es una capa delgada de dimensiones atómicas o moleculares que constituye la frontera entre dos fases (gas/sólido y gas/liquido) a la que se atribuyen propiedades fisicoquímicas ideales y dichas propiedades difieren a las de la materia en el seno de cada fase, desde el punto de vista macroscópico es la interface entre aire/sólido y aire/líquido.

La interface no es una superficie bidimensional de volumen nulo, sino que posee un espesor finito y las moléculas en ese volumen finito están sometidas a un campo de fuerzas distinto al que están sometidas las moléculas en el seno del material. En la Figura 1.1 Se muestra un sistema constituido por dos fases: agua en estado líquido y el agua en estado vapor (gaseoso). La frontera entre las dos fases es la superficie del agua que está en contacto con su vapor, y entre las dos

fases existe una región tridimensional intermedia. A esta región tridimensional se le denomina interfase (Israelachvili, 2011).



**Figura 1.1 Esquema geométrico de la región interfacial [1].**

Despreciando el efecto de la gravedad se puede considerar que la densidad de la fase líquida y la densidad de la fase vapor son constantes en sus respectivas fases. En la región intermedia, la densidad varía continuamente de la fase líquida a la fase vapor. Esta región caracterizada por una densidad variable es la interfase.

### **1.6.3 MOJABILIDAD**

La Mojabilidad se define como "la tendencia de un fluido a extenderse o adherirse a una superficie sólida en presencia de otros fluidos inmiscibles." En un sistema sólido/líquido/gas, la mojabilidad es una medida de la preferencia del sólido por el líquido o por el gas.

La mojabilidad es uno de los fenómenos de superficie y representa la interacción sólido-líquido; este parámetro depende de las fuerzas intermoleculares de los materiales en contacto; la fuerza de adhesión entre el líquido y el sólido provoca que el líquido se extienda por la superficie, mientras que la de cohesión del líquido hacen que éste se abulte y tienda a evitar la superficie. También está muy relacionada con la capilaridad, porque algunas sustancias disueltas en el agua pueden modificar su tensión superficial y por lo tanto su mojabilidad.

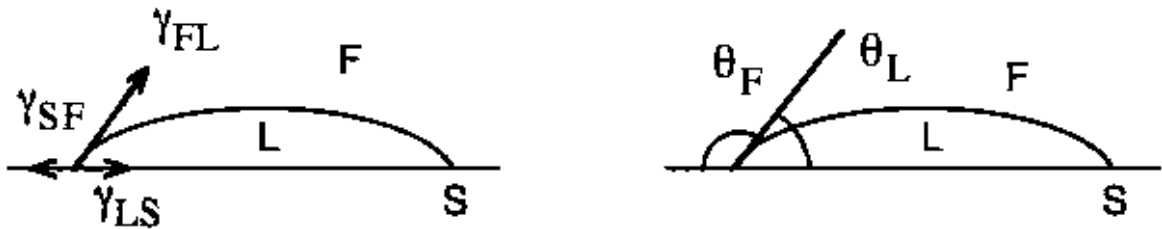


Cuando se coloca una gota de líquido L sobre la superficie de un sólido S y el sistema está sumergido en un fluido F, la gota del líquido se extiende hasta donde el contacto trifásico presenta un equilibrio, tal equilibrio fue propuesto por Young y se presenta en la siguiente ecuación:

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{FL} \cos \theta_L \quad (1)$$

$$\text{O bien } \gamma_{SF} + \gamma_{FL} \cos \theta_F = \gamma_{LS} \quad (2)$$

El símbolo  $\gamma$  representa la energía libre interfacial por unidad de área y está seguido por los dos índices de las fases correspondientes. En presencia de tres fases inmiscibles existe una línea de contacto trifásico; a lo largo de esta línea de contacto las tensiones ejercen fuerzas perpendicularmente a la línea de contacto y tangentes a las interfaces correspondientes. El equilibrio se expresa por lo tanto como un balance vectorial en un plano perpendicular a la línea de contacto trifásico (véase Figura 1.2).



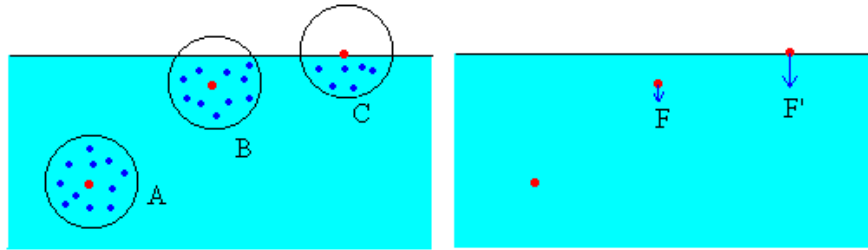
**Figura 1.2 Contacto trifásico sólido-líquido-fluido**

Esta ecuación es válida al suponer una superficie homogénea y no porosa, con esta suposición las tensiones  $\gamma_{SF}$  y  $\gamma_{LS}$  son vectores que apuntan en direcciones opuestas,  $\theta_L$  es el ángulo de contacto entre el líquido L y el sólido S, el cual se denomina a veces  $\theta_{LS}$ . En cuanto a  $\theta_F$  o  $\theta_{FS}$  es el ángulo de contacto entre el fluido F y el sólido S.

### 1.6.4 TENSIÓN SUPERFICIAL

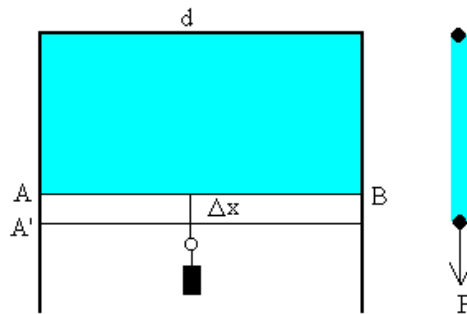
En física se denomina tensión superficial de un líquido a la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área.

La tensión superficial se debe a que las fuerzas que afectan a cada molécula son diferentes en el interior del líquido y en la superficie. Así, en el seno de un líquido cada molécula está sometida a fuerzas de atracción que en promedio se anulan. Esto permite que la molécula tenga una energía bastante baja. Sin embargo, en la superficie hay una fuerza neta hacia el interior del líquido (véase esquema de la Figura 1.3).



**Figura 1.3 Esquema de la fuerza que actúa sobre una molécula del líquido según su proximidad a la superficie [2].**

Se puede determinar la energía superficial debida a la cohesión mediante el dispositivo de la Figura 1.4.



**Figura 1.4 Dispositivo representativo para explicar la manera de calcular la energía superficial [2].**

Supongamos una lámina de jabón queda adherida a un alambre doblada en doble ángulo recto y a un alambre deslizante AB. Para evitar que la lámina se contraiga por efecto de las fuerzas de cohesión, es necesario aplicar una fuerza  $F$  al alambre deslizante.

La fuerza  $F$  es independiente de la longitud  $x$  de la lámina. Si desplazamos el alambre deslizante una longitud  $\Delta x$ , las fuerzas exteriores han realizado un trabajo  $F\Delta x$ , que se habrá invertido en incrementar la energía interna del sistema. Como la superficie de la lámina cambia en  $\Delta S = 2d\Delta x$  (el factor 2 se debe a que la lámina tiene dos caras), lo que supone que parte de las moléculas que se encontraban en el interior del líquido se han trasladado a la superficie recién creada, con el consiguiente aumento de energía (Chandra A.P., 2009).

Si llamamos a  $\gamma$  la energía por unidad de área, se verificará que:

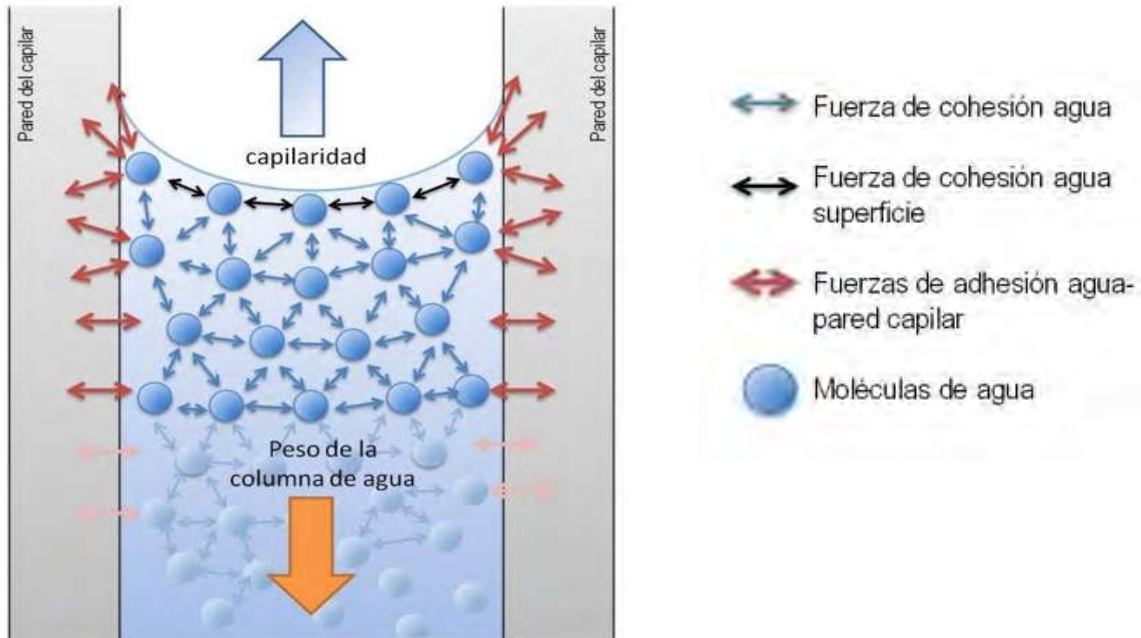
$$F\Delta x = \gamma\Delta S \quad (3)$$

$$\text{O bien } \gamma = \frac{F}{2d} \quad (4)$$

La energía superficial por unidad de área o tensión superficial se mide en  $\text{J/m}^2$  o en  $\text{N/m}$ .

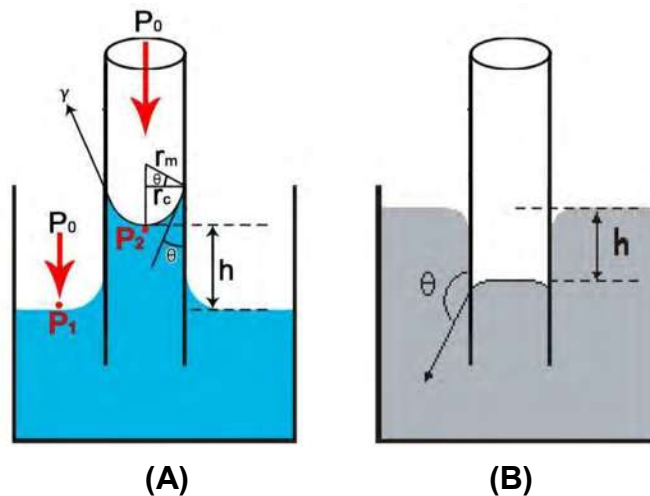
### 1.6.5 CAPILARIDAD

Es una propiedad de los líquidos que depende de su tensión superficial (la cual, a su vez, depende de la cohesión o fuerza intermolecular del líquido) que le otorga la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar (véase *Figura 1.5*).



**Figura 1.5** Diagrama de la fuerza de capilaridad y las fuerzas que intervienen en el proceso.

Cuando un líquido sube por un tubo capilar, es debido a que la fuerza de cohesión, es menor a la fuerza de adhesión de este líquido con el material del tubo (es un líquido que moja). El líquido sube hasta que la tensión superficial es equilibrada. Este es el caso del agua, *Figura 1.6 (A)*.



**Figura 1.6 (A)** Comparación entre adhesión por capilaridad y (B) cohesión.

Sin embargo, cuando la cohesión entre las moléculas de un líquido es más potente que la adhesión al capilar (como el caso del mercurio), la tensión superficial hace que el líquido descienda a un nivel inferior y su superficie es convexa, Figura 1.6 (B).

El balance de energía es:

$$P1 = P2 \quad (5)$$

$$P_o + \rho_v gh = P_o + \rho_L gh - \frac{2\gamma}{r_c} \quad (6)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del líquido, la relación entre el radio de curvatura del menisco  $r_m$  y el radio del capilar,  $r_c$ , viene dado por  $r_c / r_m = -\cos \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo de contacto entre el menisco y la pared del capilar,  $h$  la altura,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $\gamma$  la tensión interfacial, obteniendo:

$$h = \frac{2 \gamma \cos \theta}{(\rho_L - \rho_v) g r_c} \quad (7)$$

Si el líquido moja:  $\theta < 90^\circ$ ;  $\cos \theta > 0$ ;  $h > 0$  el líquido asciende por el capilar, por el contrario, si  $\theta > 90^\circ$ ;  $\cos \theta < 0$ ;  $h < 0$ , el líquido desciende.

La ecuación anterior se puede simplificar si despreciamos la densidad del gas y se utilizan tubos suficientemente estrechos como para que  $\theta=0^\circ$  (o  $180^\circ$ ):

$$h = \frac{2 \gamma \cos \theta}{(\rho_L) g r_c} \quad (8)$$

### 1.6.6 ADSORCIÓN

La adsorción es un proceso de separación y concentración de uno o más componentes de un sistema sobre una superficie sólida o líquida. Los distintos sistemas heterogéneos en los que puede tener lugar la adsorción son: sólido-líquido, sólido-gas y líquido-gas. Como en otros procesos de este tipo, los componentes se distribuyen selectivamente entre ambas fases.

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). Por ello se considera como un fenómeno superficial. La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama "adsorbato" y la fase impregnada se llama "adsorbente" (véase Figura 1.7).

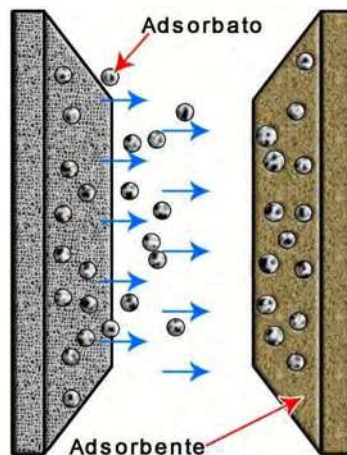


Figura 1.7 Representación del proceso de adsorción.

### TIPOS DE ADSORCIÓN

Cabe distinguir tres tipos de adsorción según sea la atracción entre el soluto y el adsorbato y el adsorbente, sea de *tipo eléctrico*, de *Van der Waals (Adsorción Física)* o de naturaleza *química*.

### 1.6.6.1 ADSORCIÓN ELÉCTRICA

Cae de lleno dentro del intercambio iónico y a menudo se le llama adsorción por intercambio, que es un proceso mediante el cual los iones de una sustancia se concentran en una superficie como resultado de la atracción electrostática en los lugares cargados de la superficie. Para dos adsorbatos iónicos posibles, a igualdad de otros factores, la carga del ion es el factor determinante en la adsorción de intercambio. Para iones de igual carga, el tamaño molecular (radio de solvatación) determina el orden de preferencia para la adsorción.

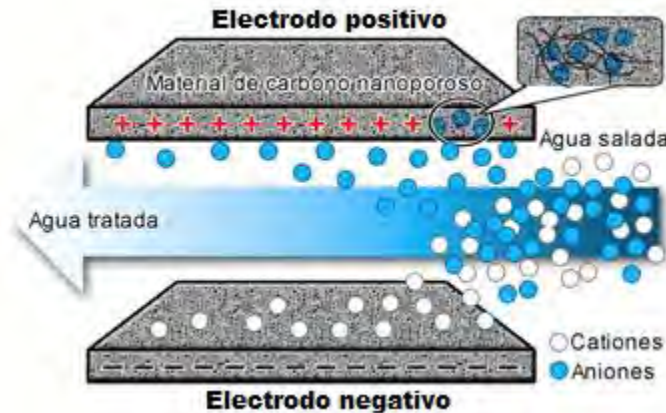


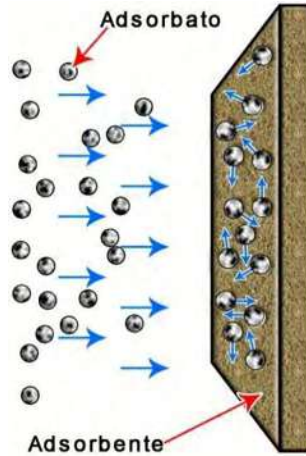
Figura 1.8 Representación del proceso de adsorción eléctrica.

### 1.6.6.2 ADSORCIÓN FÍSICA

La adsorción que tiene lugar debido a las fuerzas de Van der Waals se llama generalmente adsorción física. En este caso, la molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, sino más bien está libre y puede trasladarse dentro de la interfase. Esta adsorción, en general, predomina a temperaturas bajas.

El aumento de la temperatura disminuye considerablemente la adsorción. No se produce adsorción a temperaturas superiores a la temperatura crítica del

adsorbato gaseoso; si la presión del gas tiene valores cercanos a la presión de vapor de equilibrio para el adsorbato líquido, se producirá una adsorción más extensa en capas múltiples.



**Figura 1.9 Representación del proceso de adsorción física.**

#### **1.6.6.1.1 ADSORCIÓN QUÍMICA**

Si el adsorbato sufre una interacción química con el adsorbente, el fenómeno se llama adsorción química, adsorción activa o quimisorción. Las energías de adsorción son elevadas, del orden de las de un enlace químico, debido a que el adsorbato forma unos enlaces fuertes localizados en los centros activos del adsorbente. Esta adsorción suele estar favorecida a una temperatura elevada. La mayor parte de los fenómenos de adsorción son combinaciones de las tres formas de adsorción y, de hecho, no es fácil distinguir entre adsorción física y química.



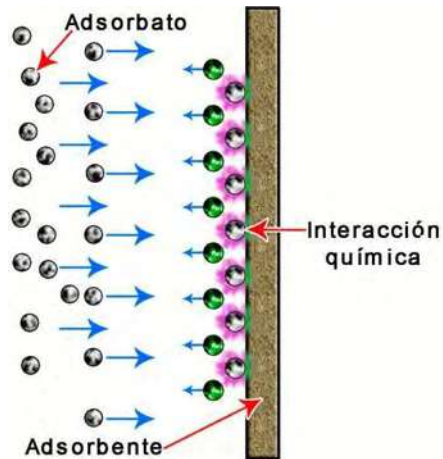


Figura 1.10 Representación del proceso de adsorción química.

### 1.6.7 ADHESIÓN

La adhesión o adherencia es la propiedad de la materia por la cual se juntan dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto, manteniéndose unidas por fuerzas intermoleculares.

No es lo mismo que cohesión que es la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo o entre moléculas similares. La adhesión en cambio, es la interacción entre las superficies de distintos cuerpos.

Tipos de mecanismos de adhesión entre materiales:

- Adhesión mecánica. En este caso, los materiales adhesivos rellenan los huecos o porosidades de las superficies, uniéndose por enclavamiento. Por ejemplo, el velcro.
- Adhesión química: La unión de dos materiales producen un compuesto químico.
- Adhesión dispersiva: Los materiales mantienen su adhesión por las fuerzas de Van der Waals: la atracción entre dos moléculas, cada una de

las cuales tiene regiones de carga positiva y negativa. Este efecto puede ser permanente o temporal, debido al movimiento constante de los electrones en una región.

- Adhesión electrostática: la unión de dos materiales produce una diferencia de potencial, debido a que son materiales conductores de electrones. Esto crea una fuerza electrostática atractiva entre materiales.
- Adhesión difusiva: Dos materiales se adhieren porque las moléculas de ambos son movibles y solubles entre sí.

### **1.6.8 FACTORES QUE AFECTAN A LOS FENÓMENOS SUPERFICIALES.**

Existen factores que modifican los fenómenos interfaciales, es decir, que modifican las propiedades de la interface que se encuentra en contacto con ambas fases, las cuales se enlistan y explican a detalles en la sección siguiente.

#### **1.6.8.1 POLARIDAD**

La polaridad es una propiedad íntimamente asociada a la composición química de un material y que resulta de las fuerzas intermoleculares, siendo éstas las fuerzas superficiales o de carga eléctrica.

Los fenómenos de superficie tales como la mojabilidad son gobernados por una serie de fuerzas superficiales que dependen de las fuerzas intermoleculares, clasificadas como:

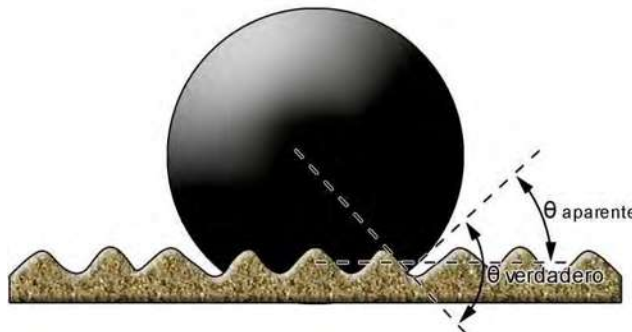
- 1) No específicas (usualmente conocidas como Van der Waals).
- 2) Específicas o de unión tipo puente de hidrógeno.

El valor de la polaridad se infiere de propiedades físicas que sí se pueden medir: constante dieléctrica, momento dipolar o índice de refracción. También puede recurrirse al análisis por espectroscopia, resonancia magnética nuclear o a la cromatografía en fase gaseosa (cromatografía inversa). Algunas de las aplicaciones prácticas de esta propiedad son:

- El estudio de los fenómenos de interacción mineral – fluidos (mojabilidad) en procesos de recuperación de minerales por flotación selectiva.
- El estudio de la estabilidad de emulsiones.

### 1.6.8.2 HISTÉRESIS EN EL ÁNGULO DE CONTACTO

Un problema con la medición del ángulo de contacto es la histéresis, porque se ha demostrado que una gota de líquido puede tener varios ángulos de contacto estables. La *Figura 1.11* muestra el ángulo de contacto aparente medido a partir del plano superficial promedio, y como puede diferir significativamente del ángulo de contacto verdadero en una superficie con inclinación local; este problema puede ser evitado midiendo el ángulo en un cristal único y limpiando rigurosamente la superficie antes de la medición.



**Figura 1.11** Esquema del ángulo de contacto aparente contra el verdadero, debido a una histéresis en la medición del ángulo de contacto.

### 1.6.9 TEORÍA DLVO (DERYAGIN–LANDAU–VERWEY–OVERBEEK)

Las partículas coloidales están sometidas a fuerzas de atracción y repulsión, y existe un balance entre dichas fuerzas. El movimiento Browniano produce colisión

entre las partículas y si las fuerzas de atracción predominan, las partículas se aglomeran después de la colisión. En caso contrario, si las fuerzas de repulsión predominan las partículas permanecen separadas después de la colisión. Las fuerzas de atracción son las de Van der Waals, en tanto que las fuerzas de repulsión provienen de la interacción entre las dobles capas eléctricas que rodean a las partículas.

La estabilidad coloidal está dominada esencialmente por la suma del potencial atractivo de Van der Waals y el potencial repulsivo electrostático. La combinación de ambos potenciales origina un potencial total de interacción en función de la distancia entre dos partículas que se aproximan.

Todas las fuerzas tienen un origen electrostático; las fuerzas entre partículas coloidales se dividen en tres grandes grupos:

- Fuerzas de Van der Waals
- Fuerzas electrostáticas
- Fuerzas entrópicas o estéricas

Las fuerzas entre las partículas coloidales son debidas a la gran cantidad de superficie que existe en estos sistemas. Las interacciones entre partículas coloidales son muy importantes; en particular, debido a estas fuerzas, las partículas coloidales pueden mostrar una gran tendencia a la agregación.

En la Figura 1.12 se representan las energías potenciales de atracción  $V_A$  y de repulsión  $V_R$  en función de la distancia entre las partículas cargadas. De acuerdo con la teoría DLVO (Deryaguin-Landau-Verwey-Oberbeek), la curva que representa la energía total de interacción entre partículas coloidales  $V_T$  (curva continua) es la suma de las curvas de atracción  $V_A$  y repulsión  $V_R$ .

$$V_T = V_A + V_R \quad (9)$$

Esta curva corresponde a una ecuación de tipo exponencial porque la fuerza de repulsión es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia y la fuerza de atracción es también función del inverso de la distancia, pero elevada ésta a un exponente siempre mayor que dos.

En la gráfica de la Figura 1.12 se observa que cuando las partículas se aproximan desde la distancia “e” hasta la distancia “b” deben superar un máximo de repulsión  $V_m$  antes de alcanzar el mínimo de atracción  $V_p$  donde la coagulación es irreversible. La altura de ese máximo  $V_m$  define la estabilidad del sistema que corresponde a un potencial  $Z$  aproximado de 50 mV, de esta forma el sistema se puede considerar estable.

La coagulación reversible o floculación en el mínimo secundario  $V_s$  es débil y reversible porque la energía térmica de partículas muy pequeñas es del mismo orden de magnitud que la energía de este mínimo, y el movimiento Browniano es suficiente para desagregar las partículas. La Tabla 1.1 resume el efecto de las curvas  $V_A$  y  $V_R$  de la Figura 1 en la energía total  $V_T$  y su incidencia en la estabilidad.

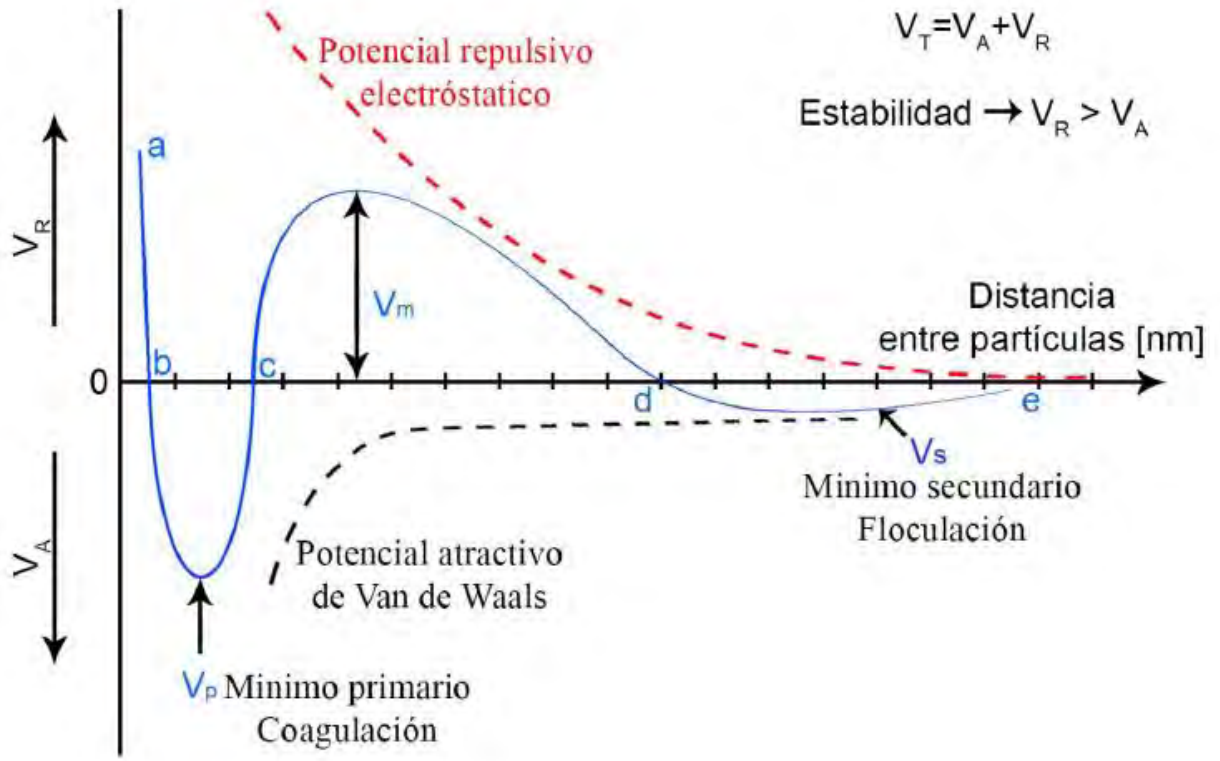


Figura 1.12 Gráfico que muestra el efecto neto de las fuerzas de atracción y repulsión según la teoría DLVO.

Tabla 1.1 Resumen del efecto de las cargas de atracción y repulsión actuando sobre una partícula.

Curva $V_T$	Distancia entre partículas	Curvas $V_A$ y $V_R$	Efecto neto	Efecto en la estabilidad
Tramo $d - V_s - e$ (mínimo secundario $V_s$ )	O-----O	$V_A > V_R$	Atracción	Coagulación reversible
Tramo $c - V_m - d$ (máximo $V_m$ )	O-----O	$V_A < V_R$	Repulsión	Si $\zeta = 50$ mV, sistema estable
Tramo $b - V_p - c$ (mínimo primario $V_p$ )	O-----O	$V_A > V_R$	Atracción	Coagulación irreversible
Tramo a - b	O---O	$V_A < V_R$	Repulsión	

### 1.6.10 SURFACTANTE O TENSOACTIVOS

Un surfactante o agente activo en la superficie, también conocido como tensoactivo, es una especie química que es activa en la interfase entre dos fases, como por ejemplo un detergente, que es activo en la interfase entre las fases hidrófila e hidrófoba. El detergente se acumula en la interfase y modifica la tensión superficial. La tensión superficial disminuye cuando un soluto se acumula en la interfase, siendo el soluto en este caso el agente tensoactivo. En la Figura 1.13 se muestra la estructura molecular de un tensoactivo anfifílico: es una molécula que tiene un extremo hidrofílico y otro hidrofóbico, este último generalmente conformado por una cadena hidrocarbonada (Laskowski, J. S. et al. 2013).

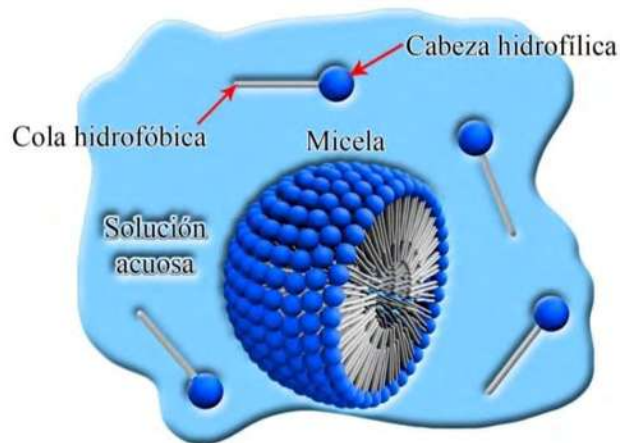


Figura 1. 13 Estructura molecular de un tensoactivo anfifílico.

### 1.6.11 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TENSIÓN SUPERFICIAL

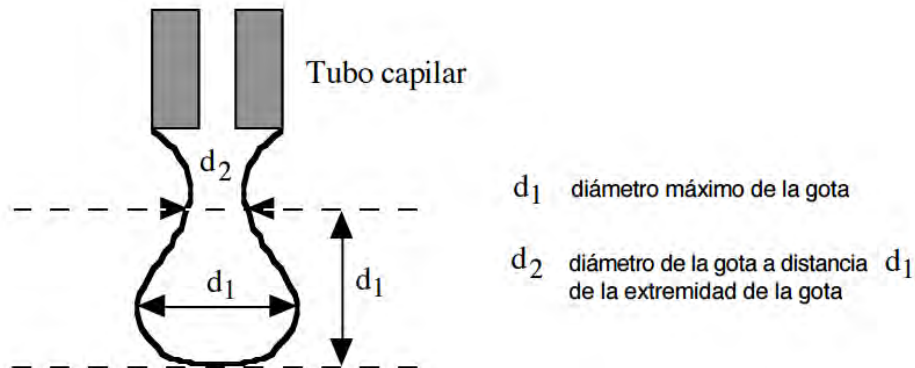
Existen numerosos métodos para la medición de la tensión superficial e interfacial; la tensión superficial es una fuerza por unidad de longitud y la unidad usual es la dina/cm en el sistema cgs o mN/m en el Sistema Internacional mks. Los métodos tradicionales se describen a continuación.

#### MÉTODO DE LA GOTA PENDIENTE

Cuando se deja colgar una gota de un gotero se produce una geometría de equilibrio entre la fuerza de gravedad que tiende a estirar la gota y la fuerza de tensión que tiende a encogerla.

La medida de los diámetros  $d_1$  y  $d_2$  definidos en la *Figura 1.14* permite hallar la tensión interfacial mediante los nomogramas de Andreas, Hauser (Saleger et al., 2005)

Este método es relativamente simple, ya que exige solamente medir dos longitudes, lo cual se hace fácilmente con un telemicroscopio o sobre una fotomacrografía. Sin embargo, se requiere una cierta destreza experimental para formar una gota estable (en general con una bureta micrométrica) y mantenerla libre de oscilación.



**Figura 1.14** Diámetros representativos para calcular la tensión superficial mediante el método de la gota pendiente.



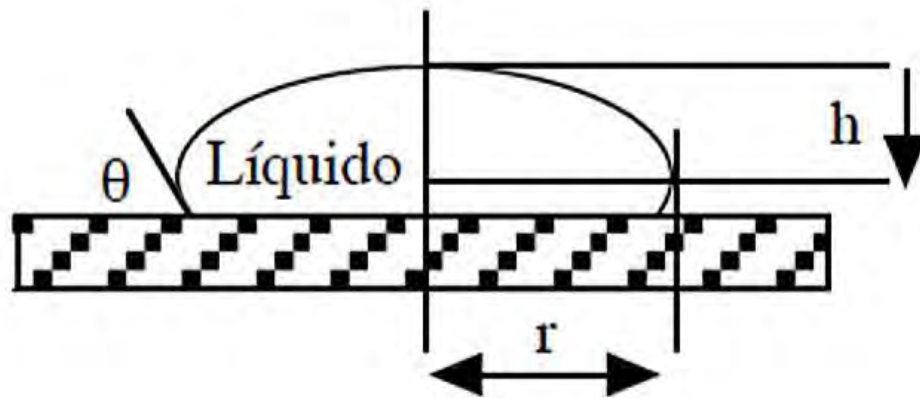
El método se aplica para tensiones intermedias, ya que es poco preciso para tensiones muy altas en donde la gota es esencialmente esférica o para tensiones muy bajas en donde la gota tiende a descolgarse ( $\sigma < 0,01$  dina/cm).

### 1.6.12 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO

Existen numerosos métodos para la medición del ángulo de contacto, siendo el ángulo que surge al momento de colocar un fluido sobre una superficie sólida y la unidad usual para reportarlos con los grados ( $^{\circ}$ ). Los métodos más comunes se describen a continuación.

#### 1.6.12.1 MÉTODO DE LA GOTA SÉSIL

Cuando la tensión es particularmente baja se coloca la gota contra una superficie sólida, *Figura 1.15*.



**Figura 1.15** Esquema de la gota sésil [3].

Si la gota es suficientemente aplastada ( $r \gg h$ ), entonces la curvatura en la extremidad superior o inferior ("polo") es esencialmente cero, y la distancia  $h$  del "polo" al "ecuador" es independiente del diámetro de la gota. En tal caso se puede deducir la tensión superficial o interfacial por una relación del tipo:

$$\gamma = \frac{1}{2} \Delta \rho g h^2 \quad (10)$$

Donde  $\Delta \rho$  es la diferencia de densidades entre fluidos.

Si la gota no está completamente aplastada se puede usar una fórmula más exacta como.

$$\gamma = \frac{1}{2} \Delta \rho g h^2 \left[ 1 + 0.61 \frac{h}{r} \left( 1 - \frac{4h^2}{r^2} \right) \right] \quad (11)$$

Por supuesto que este método implica disponer de una superficie no mojada por el fluido de la gota, lo que no es difícil en la práctica si se dispone de vidrio, metal o teflón.

Las condiciones de aplicación de la fórmula anterior (gota aplastada) se logran cuando la tensión es baja y la gota pequeña, o cuando la gota es relativamente grande pero la tensión es alta.

Esta medición también se puede hacer con un goniómetro, Figura 1.16, el método es por tanto apropiado para un rango bastante amplio de valores de tensión, y se aplica con la misma facilidad para tensión superficial como para tensión interfacial. El aparato requiere una celda térmica (lo que permite trabajar a alta temperatura) y un dispositivo de telemedición de longitud montado sobre un banco óptico.

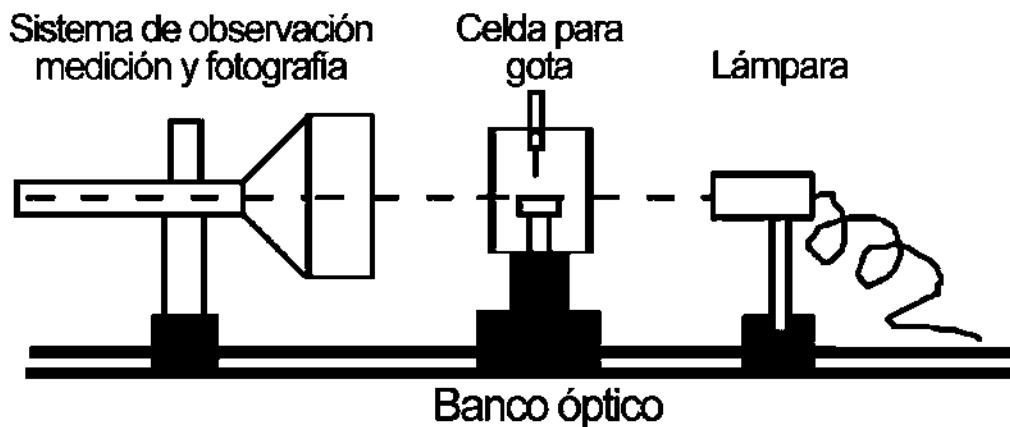


Figura 1.16 Esquema de un goniómetro [3].

### 1.6.12.2 MÉTODO DE LA BURBUJA CAUTIVA

Su estudio se realiza igual que el método de gota sésil, pero con la diferencia de que es un sistema Sólido/Líquido1/Líquido2.

Se coloca la gota dentro de un fluido, contra una superficie sólida como lo indican las Figuras 1.17 (A) y (B), por lo cual el nombre de “cautiva” y el que quede abajo o arriba la gota, va a depender de la diferencia de densidad de los fluidos del sistema.

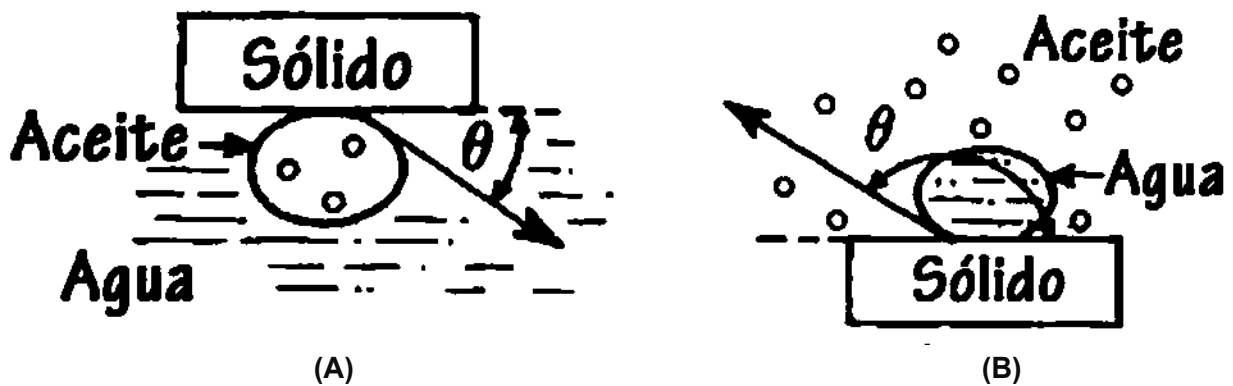


Figura 1.17 (A) Gota de aceite cautiva en agua, colocada debajo de la fase sólida. (B) Gota de agua cautiva en aceite, colocada sobre la fase sólida.

El goniómetro es el mismo equipo que se usa para el método de la gota sésil y de la gota pendiente; además este tipo de aparato permite en general medir también el ángulo de contacto.

### 1.6.13 FLOTACIÓN DE MINERALES

La flotación por espumas es un proceso físico - químico de la concentración de minerales finamente molidos. El proceso comprende el tratamiento químico de una pulpa de mineral a fin de crear condiciones favorables para la adhesión de ciertas partículas de minerales a las burbujas de aire. Tiene por objeto la separación de especies minerales, divididos a partir de una pulpa acuosa, aprovechando sus

propiedades de afinidad (hidrofílico) o repulsión (hidrofóbico) por el agua. Las especies valiosas o útiles constituyen una fracción menor del mineral, mientras que las especies no valiosas o estériles constituyen la mayor parte.

El carácter hidrofílico o de afinidad hace que estas partículas se mojen, permanezcan en suspensión en la pulpa, para finalmente sedimentarse. El carácter hidrofóbico o de repulsión evita el mojado de las partículas minerales favoreciendo su adhesión a las burbujas y ascender, algunos minerales tienen en forma natural estas propiedades, pero pueden mejorarse mediante los reactivos de flotación (Wills B.A, 2006).

### **1.6.13. 1 CONCENTRADO**

La Mineralurgia está constituida básicamente de dos etapas principales que son: La liberación de los minerales valiosos de la ganga (Mineralurgia I – Triturado y Molienda), y Separación de estos minerales valiosos de la ganga, que comúnmente se le conoce como Concentración.

La mineralurgia está relacionada principalmente con los métodos físicos de concentración, los cuales pueden ser:

- **Propiedades ópticas** (color, brillo, fluorescencia, etc.), radiactivas, etc., conocido desde muy antiguo como pallaqueo o escogido a mano.
- **Diferencias en gravedad específica** de los minerales, que se le conoce normalmente como concentración gravimétrica. Utiliza el movimiento diferencial de los minerales debido a los efectos de masa, por lo general en corrientes hidráulicas.
- **Diferentes propiedades superficiales** de los minerales que se le conoce como flotación de espumas, donde la pulpa se acondiciona con varios reactivos químicos, que hacen a los minerales valiosos ávidos por el aire (hidrofóbicos o aerofílicos) y que el resto de los minerales los minerales

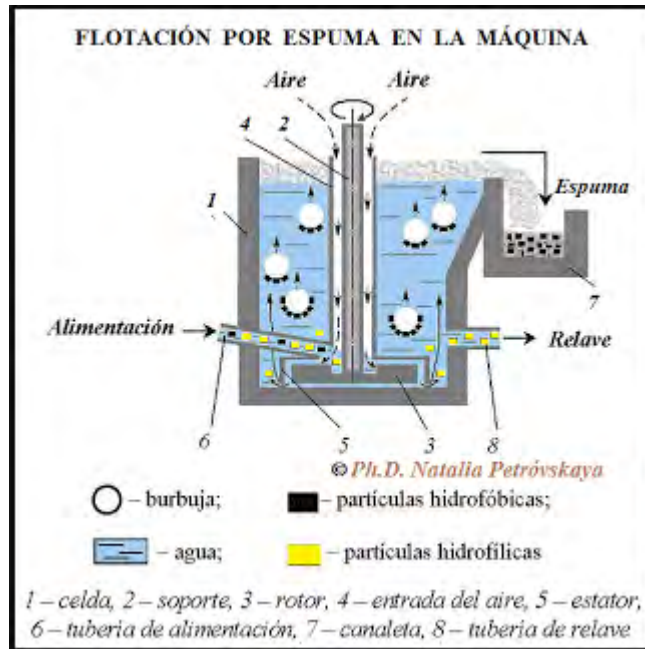
tengan más avidez por el agua y rechacen al aire (aerofóbicos o hidrofílicos). Esto da lugar a una separación selectiva por transferencia de los minerales valiosos a las burbujas de aire que forman la espuma flotante sobre la superficie de la pulpa, la cual se extrae como concentrado.

- **Propiedades magnéticas** de los minerales, que se le conoce como concentración magnética.
- **Propiedades de conductividad eléctrica** que se define como concentración electrostática.

### 1.6.13. 2 FLOTACIÓN DE ESPUMAS

Se puede definir a la flotación de espumas como un proceso mineralógico - químico cinético, o también, la flotación de minerales en espumas es un proceso físico-químico, cuyo objeto es la separación de especies minerales valiosas de las no valiosas, a través del uso de la adhesión selectiva de burbujas de aire a las partículas minerales valiosas (Fuerstenau, 2007).

En un proceso de concentración de minerales ideal, la mena mineral se divide en un concentrado enriquecido con el componente útil o valioso y una cola o relave con los minerales que componen la ganga. Por su parte, la estabilidad de la burbuja dependerá del espumante agregado al proceso de flotación. El proceso de flotación de espumas se lleva a cabo en una máquina denominada Celda de Flotación.



**Figura 1.18 Celda Denver usada en la industria para la extracción selectiva de minerales por flotación de espumas.**

### 1.6.13. 3 MECANISMOS DE FLOTACIÓN DE ESPUMAS

El proceso de flotación está basado sobre las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los sólidos a separar. Se trata fundamentalmente de un fenómeno de comportamiento de los sólidos frente al agua, o sea, de mojabilidad de los sólidos.

Los metales nativos, sulfuros de metales o especies tales como grafito, carbón bituminoso, talco y otros, son poco mojables por el agua y se llaman minerales hidrofóbicos naturales.

Los minerales que son óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros son hidrofílicos, o sea, mojables por el agua.

Además, los minerales hidrofóbicos son aerofílicos, es decir, tienen gran afinidad por las burbujas de aire, mientras que los minerales hidrofílicos son aerofóbicos, o sea, no se adhieren normalmente a ellas.

- **Minerales Hidrofílicos.**- Son mojables por el agua, constituidos por: óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros, que generalmente representan la mayoría de los minerales estériles o ganga. Haciendo que se mojen, permanezcan en suspensión en la pulpa para finalmente hundirse.
- **Minerales Hidrofóbicos.** - Son aquellos que no son mojables o son poco mojables por el agua, dentro de ellos tenemos: Los metales nativos, sulfuros de metales o especies tales como: Grafito, carbón bituminoso, talco y otros, haciendo de que evite el mojado de las partículas minerales, que pueden adherirse a las burbujas de aire y ascender

#### 1.6.13. 4 TIPOS DE FLOTACIÓN.

Los tipos de flotación pueden ser:

- Flotación de espumas.
- Flotación por películas.
- Flotación por aceites.

Siendo de mayor aplicación en la actualidad, la flotación de espumas, que a su vez puede ser clasificada en:

- **Flotación directa**, cuando en la espuma se tiene al mineral valioso concentrado y en la pulpa el mineral de ganga como relave.

- **Flotación reversa o inversa**, cuando en las espumas se capta a la ganga y en la pulpa queda el mineral considerado de valor como relave que es recuperado posteriormente.

También puede clasificarse en:

- **Flotación bulk o colectiva**, en la cual se obtiene en un concentrado todos los minerales valiosos contenidos en la mena y un relave con el material sin valor o ganga.
- **Flotación selectiva o diferencial**, la cual por la acción selectiva de los reactivos permite obtener en un concentrado un sólo mineral valioso.

Entiéndase por selectividad a la fijación preferencial del colector o reactivo heteropolar en la superficie de un determinado mineral valioso.

#### 1.6.14 MICROFLOTACIÓN

La microflotación es un proceso de extracción de micropartículas, especialmente microorganismos y coloides que se adhieren a microburbujas de un tamaño alrededor de los 40  $\mu\text{m}$ . El instrumento adecuado para realizar microflotación es un tubo de vidrio llamado Hallimond puesto que con unos cuantos gramos de mineral se pueden realizar varias pruebas de análisis y llevarlo a gran escala.

La parte superior de la celda es un tubo de vidrio doblado con un ramal vertical justo encima del doblado, la parte inferior de la celda consiste en una caja de vidrio con un sinter adherido al fondo con un tamaño de poro uniforme de no menos de 40  $\mu\text{m}$ , por el sinter se hace pasar gas nitrógeno para formar microburbujas y para el acondicionamiento de la pulpa se utiliza un vaso de precipitado y un agitador magnético.



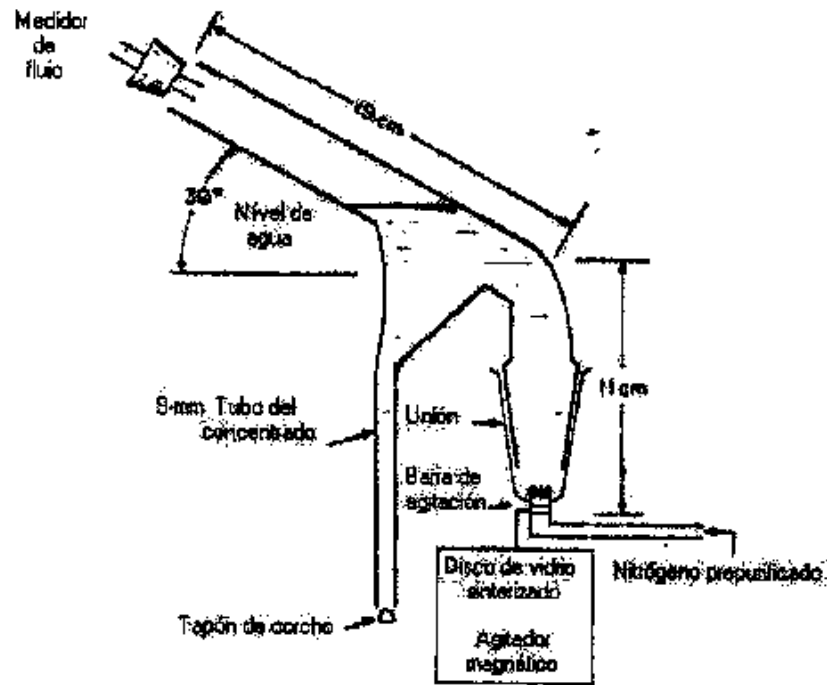


Figura 1.19 Celda Hallimond usada en la microflotación de minerales.

### 1.6.15 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

El Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) o también conocido como SEM (del inglés Scanning Electron Microscope) es una técnica de microscopía electrónica capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia. Utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen.

Los MEB poseen una gran profundidad de campo, que permite enfocar a la vez gran parte de la muestra. También producen imágenes de alta resolución, de forma que las características más ínfimas de la muestra pueden ser examinadas con gran amplificación. La preparación de las muestras es relativamente fácil ya que la mayoría de los MEB sólo requieren que éstas sean conductoras. La muestra generalmente se recubre con una capa de carbono o una capa delgada de un metal, como el oro o el cobre, para darle carácter conductor. Posteriormente,

se barre la superficie con electrones acelerados que viajan a través del cañón. Un detector formado por lentes basadas en electroimanes, mide la cantidad e intensidad de los electrones que devuelve la muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones mediante imagen digital.

## **FUNCIONAMIENTO**

En el microscopio electrónico de barrido es necesario acelerar los electrones en un campo eléctrico, para aprovechar de esta manera su comportamiento ondulatorio, lo cual se lleva a cabo en la columna del microscopio, donde se aceleran mediante una diferencia de potencial que puede ir desde 50 hasta 30 000 voltios. Los electrones acelerados por un voltaje pequeño se utilizan para muestras muy sensibles, como podrían ser las muestras biológicas sin preparación adicional o muestras muy aislantes. Los voltajes elevados se utilizan para muestras metálicas, ya que éstas en general no sufren daños como las biológicas y de esta manera se aprovecha la menor longitud de onda para tener una mejor resolución. Los electrones acelerados salen del cañón, y se enfocan mediante las lentes condensadora y objetiva, cuya función es reducir la imagen del filamento, de manera que incida en la muestra un haz de electrones lo más pequeño posible (para así tener una mejor resolución). Con las bobinas deflectoras se barre este fino haz de electrones sobre la muestra, punto por punto y línea por línea.

Cuando el haz incide sobre la muestra, se producen muchas interacciones entre los electrones del mismo haz y los átomos de la muestra; puede haber, por ejemplo, electrones que reboten como las bolas de billar. Por otra parte, la energía que pierden los electrones al "chocar" contra la muestra puede hacer que otros electrones salgan despedidos (electrones secundarios), y producir rayos X, electrones Auger, etc. El más común de éstos es el que detecta electrones secundarios, y es con el que se hacen la mayoría de las imágenes de microscopios de barrido.

También podemos adquirir la señal de rayos X que se produce cuando se desprenden estos mismos de la muestra, y posteriormente hacer un análisis espectrográfico de la composición de la muestra.

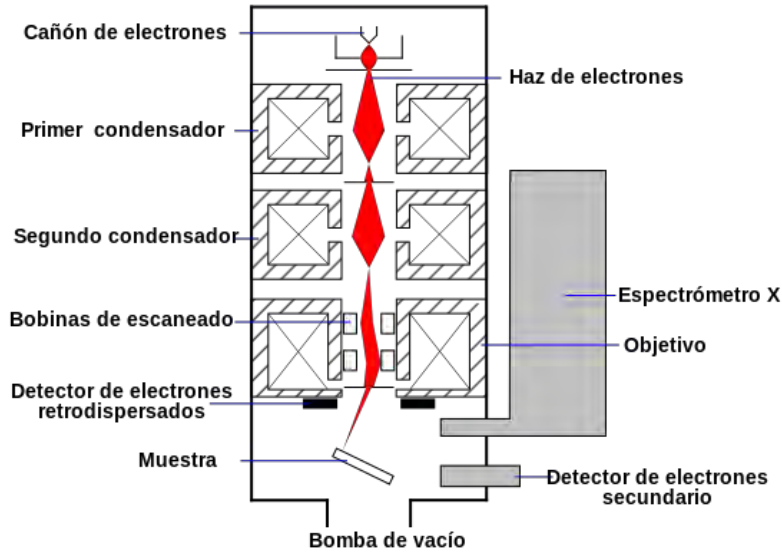


Figura 1.20 Diagrama interno del funcionamiento del MEB [4].

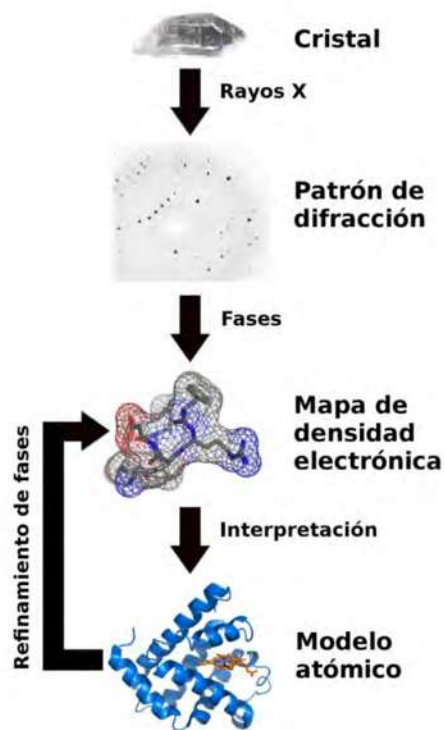
### 1.6.16 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La cristalografía de rayos X o difracción de rayos X es una técnica experimental para el estudio y análisis de materiales, basada en el fenómeno de difracción de los rayos X por sólidos en estado cristalino.

Los rayos X son difractados por los electrones que rodean los átomos por ser su longitud de onda del mismo orden de magnitud que el radio atómico. El haz de rayos X emergente tras esta interacción contiene información sobre la posición y tipo de átomos encontrados en su camino. Los cristales, gracias a su estructura periódica, dispersan elásticamente los haces de rayos X en ciertas direcciones y los amplifican por interferencia constructiva, originando un patrón de difracción. Existen varios tipos de detectores especiales para observar y medir la intensidad y posición de los rayos X difractados, y su análisis posterior por

métodos matemáticos permite obtener una representación a escala atómica de los átomos y moléculas del material estudiado.

Max von Laue realizó los primeros experimentos de cristalografía de rayos X en 1912. Von Laue, William Henry Bragg y William Lawrence Bragg desarrollaron inicialmente la teoría de difracción de cristales, tarea a la que pronto se sumaron otros científicos. A lo largo del siglo XX tuvieron lugar varios avances teóricos y técnicos, como la aparición de los superordenadores y el uso de sincrotrones para la producción de rayos X, que incrementaron la capacidad del método para determinar las propiedades estructurales de todo tipo de moléculas: sales, materiales inorgánicos complejos, proteínas y hasta componentes celulares como los ribosomas. Es posible trabajar con monocristales o con polvo microcristalino, consiguiéndose diferentes datos en ambos casos: para las aplicaciones que requieren solo una caracterización precisa de los parámetros de la red cristalina, puede ser suficiente la difracción de rayos X por polvo; para una dilucidación precisa de las posiciones atómicas es preferible trabajar con monocristales.



**Figura 1.21** Proceso de determinación de la estructura de una molécula por cristalografía de rayos X [5].

# CAPÍTULO 2

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta sección se presentan los materiales y procedimientos seguidos para la medición de tensión superficial, ángulo de contacto y microflotación. En primer lugar, el capítulo presenta el procedimiento sistemático de pulido y acabado superficial de la muestra de pirita, enseguida se da una breve explicación del software Attention Theta CAM que se usó para las mediciones de tensión superficial y ángulo de contacto, posteriormente se explica la preparación de las muestras de agua y pirita para procesarlas en los equipos de espectrometría atómica por plasma y difracción de rayos X. Por último se ajustan los parámetros de volumen y tiempo de estabilidad de la gota que se coloca sobre la superficie de pirita y que nos permite garantizar una mejor repetividad en los resultados.

### 2.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales usados en los experimentos fueron:

- Xantato Isobutilico de Sodio (XIBS) proporcionado por la empresa Alkemin S. de R.L de C.V. Se seleccionó este colector debido a que los Xantatos son los más comúnmente usados en la flotación de minerales sulfurosos, particularmente el XIBS ya que el ion sodio es el que se disocia y no agrega otro tipo de ion al agua de mar.
- Espumante Metil Isobutil Carbinoil (MIBC) proporcionado por la empresa Alkemin S. de R.L de C.V. Se seleccionó ya que es comúnmente usado en soluciones donde existe alto contenido de sales.
- Ácido clorhídrico HCl.
- Ácido Nitrico HNO<sub>3</sub>.
- Ácido Flourhidrico HF.

- Mineral Pirita ( $\text{FeS}_2$ ) proporcionado por el Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH. Se seleccionó la pirita ya que es el sulfuro metálico más abundante en la naturaleza y se utiliza como mena de hierro y es el mineral más usado para la obtención de ácido sulfúrico por su elevado contenido de azufre.
- Filtros Wathman.
- Paños pulidores para tamaño de grano de  $1\mu$ .
- Pasta de diamante con tamaño de grano de  $1\mu$ .

Los equipos empleados para caracterizar las muestras fueron:

- Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMSNH.
- Equipo de Difracción de Rayos X del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMSNH.
- Equipo de Emisión Atómica de Plasma del Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH.
- Sistema de Filtración del Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH.
- Pulidora Metalográfica del Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH.
- Un pHmetro marca Horiba modelo Navi@ del Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH.
- Un tensiómetro Attention Theta CAM 200 Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH.
- Celda de aislamiento de vidrio creada en el Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH.

## 2.2 PROCEDIMIENTO

Un tensiómetro Attention Theta CAM 200 fue usado para obtener los ángulos de contacto de las diferentes soluciones. Las mediciones fueron realizadas a una temperatura ambiente de aproximadamente 20°C, se utilizó un pHmetro marca Horiba, modelo Navi@ para medir el pH de las soluciones. Las soluciones con el pH modificado se prepararon con agua desionizada con una conductividad < 1mS/cm y un pH de 7.5 y agua de mar con un pH original de 8.4. Se usaron soluciones de HCl y NaOH para disminuir y aumentar el pH respectivamente, las soluciones con Xantato se prepararon usando Xantato Isobutílico de Sodio (XIBS) proporcionados por la empresa Alkemin S. de R.L de C.V. así como el espumante Metil Isobutil Carbinol (MIBC). La pirita fue previamente pulida siguiendo el procedimiento que se describe en la sección siguiente.

Se usó espectrometría de emisión atómica por plasma para conocer la composición química del agua de mar, y de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ). El agua de mar fue previamente filtrada y se preparó una dilución de 1/1000 ppm con agua desionizada como diluyente, la pirita fue pulverizada y digerida en una solución de HCl-HNO<sub>3</sub>-HF, posteriormente se diluyó en agua desionizada para poder procesarla en el equipo de espectrometría.

Para los experimentos de microflotación se usó una celda hallimond auxiliado de un agitador magnético e inyección de nitrógeno para la recuperación de pirita ( $\text{FeS}_2$ ).

## 2.3 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE PIRITA.

La preparación de la superficie de pirita consiste en desbaste y pulido.

El desbaste se efectúa manualmente sobre papel abrasivo y una superficie plana, al pasar de un abrasivo a otro, debe girarse la muestra 90 grados y desbastar hasta que se borren por completo las huellas del abrasivo anterior, teniendo siempre el cuidado de lavar la probeta con agua abundante.

Es necesario usar únicamente agua para el desbaste ya que el uso de alcohol o acetona pueden afectar la hidrofobicidad del mineral y con ello modificar el valor reportado de ángulo de contacto.

Se debe pasar la probeta de mineral por toda la serie de abrasivos: 150, 220, 280, 320, 400, 500, y 600, 700, 1000, 1200, 1500 y 2000, eliminar algún abrasivo retarda la operación en vez de acelerarla. Al final del desbaste, la muestra debe lavarse con agua abundante para evitar que las partículas del abrasivo o del metal en la etapa del desbaste pase a la pulidora.

Posteriormente la muestra de mineral pasa al proceso de pulido, el pulido tiene por objeto, eliminar las rayas finas producidas en la última operación del desbaste y conseguir una superficie sin rayas y con alto pulimento a espejo.

Para realizar el pulido, se apoya la cara desbastada de la muestra sobre un paño de terciopelo embebido con una suspensión de polvo de diamante en aceite mineral con tamaño de grano de 1 micra fijado a un disco que gira.

La presión a aplicar sobre la muestra, deberá ser tal que se logre hacer desaparecer en unos pocos minutos las rayas del último papel abrasivo 2000 cuidando de no excederse en la presión para evitar desgarrar el paño o rayar la superficie.



Finalmente, la muestra se enjuaga con abundante agua desionizada para eliminar los restos de la solución con polvo de diamante, posteriormente se aplica alcohol con algodón sobre la superficie para eliminar cualquier resto de grasa propia de la solución con polvo de diamante, y se vuelve a enjuagar con abundante agua desionizada, se repite el proceso hasta dejar completamente limpia la superficie las veces que sean necesarias. Para secar el mineral se sopletea con aire comprimido.

## 2.4 EMPLEO DEL SOFTWARE PARA ÁNGULO DE CONTACTO

El software CAM 2008 está compuesto por 7 menús principales mostrados en la Figura 2.1 con los que se puede operar el sistema para obtener las imágenes y a partir de ellas los valores de tensión superficial y ángulo de contacto.

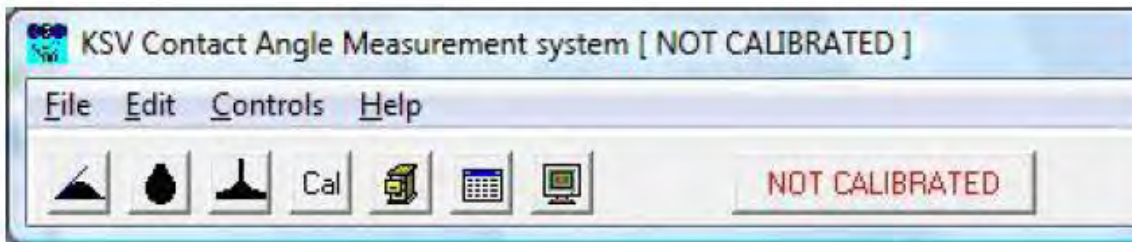









Figura 2.1 Panel de control del software Attention Theta

La función que realiza cada botón se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 2.1 Descripción de las funciones de los botones del menú principal del software Attention Theta.**

	Comenzar un nuevo experimento de ángulo de contacto.
	Comenzar un nuevo experimento de gota pendiente.
	Comenzar un nuevo experimento de ángulo de menisco.

	Comenzar una nueva calibración.
	Acceso a la base de datos de experimentos.
	Editar la base de datos.
	Configuraciones de la cámara

## CALIBRACIÓN DEL TESIÓMETRO

Es necesario calibrar el tensiómetro antes de comenzar a capturar imágenes para medir el ángulo de contacto y tensión superficial lo cual se logra usando un objeto de referencia como medida patrón para un enfoque determinado. Para el caso del tensiómetro se usa un balín de 4 mm de diámetro (previamente limpiado con alcohol y secado con aire comprimido) el cuál debe ser enfocado con nitidez sobre la pantalla como se presenta en la Figura 2.2.

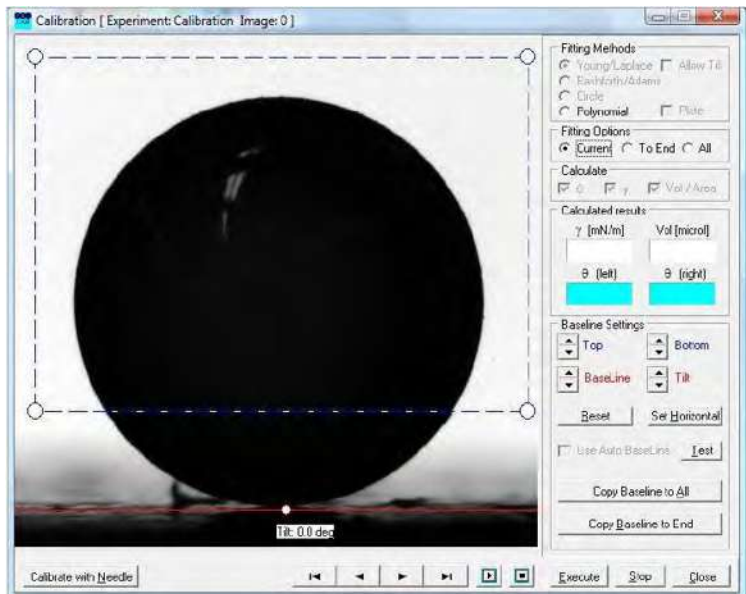


Figura 2.2 Balín de 4 mm enfocado en la ventana de calibración del software.

Una vez enfocada la imagen del balín, se presiona el botón “CAL” para iniciar una nueva calibración, la línea base de color rojo se coloca lo más cerca de donde se encuentra la superficie de apoyo del balín. El marco punteado en color azul, debe cubrir  $\frac{3}{4}$  del balín hacia la parte superior, finalmente se presiona el botón “EXECUTE”.

El botón “EXECUTE” realiza el ajuste de la curva sobre la superficie del balín y con ellos se logra la calibración del sistema. Ya que la calibración se realizó a un enfoque predeterminado por el usuario, no se debe mover el enfoque de la cámara una vez iniciados los experimentos ya que eso garantiza que las mediciones resulten confiables, en caso de mover el enfoque, se debe comenzar el procedimiento de calibración desde el inicio.

## **2.5 MEDICIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO.**

Para garantizar que las agujas no presenten contaminantes que modifiquen los valores de tensión superficial y ángulo de contacto, se sigue un proceso de inocuidad cuidadoso que consiste en hervir por cinco minutos las agujas en agua desionizada para posteriormente secarlas con aire comprimido y almacenarlas en un lugar seco hasta la próxima prueba.

Antes de comenzar cada experimento es necesario validar que las agujas aun cuando ya han sido limpiadas, no presenten algún contaminante o residuo por lo que antes de cada experimento se realizaron tres mediciones de tensión superficial usando agua desionizada a temperatura ambiente y se comparan los resultados con los mostrados en la tabla internacional de tensión superficial de agua (Vargaftik et al., 1983). Si los valores caen dentro del rango a la temperatura indicada, se considera que la aguja es adecuada para realizar los experimentos.

En primer lugar y siguiendo las recomendaciones para la medición de ángulo de contacto (Drelich, 2013), hay que generar una celda de aislamiento que nos

permita generar una condición de vapor saturado que rodee nuestro sistema además de aislarlo de perturbaciones exteriores tales como corrientes de aire o partículas de polvo que modifiquen los valores reales del ángulo de contacto Figura 2.3 (A).

Por otra parte un aspecto importante a considerar para realizar mediciones de ángulo de contacto es nivelar el lente de la cámara del tensiómetro de tal manera que quede completamente horizontal y con ello evitar errores de paralelismo con la superficie a mojar. Esto se logra con un nivel de burbuja (ver Figura 2.3B).



(A)



(B)

**Figura 2.3 (A) Celda de aislamiento cubierta con Parafilm. (B) Lente nivelados con nivel de burbuja.**

Una de las partes más importantes para la medición, es nivelar de manera completamente horizontal, la superficie sobre la cual se colocará la gota, al igual que en el paso anterior, lo podemos lograr con un nivel de burbuja, sólo que en este caso, es necesario nivelar un plano, por lo que se deben nivel en dos ejes perpendiculares como se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2.4 Método para nivelar la muestra de pirita sobre un plano.

Finalmente se calibra, enfoca y ajustan los parámetros del tensiómetro para poder obtener la imagen y a partir de ella el cálculo del ángulo de contacto. Cabe mencionar que el ángulo de contacto reportado es el ángulo dentro de la gota o ángulo interno.

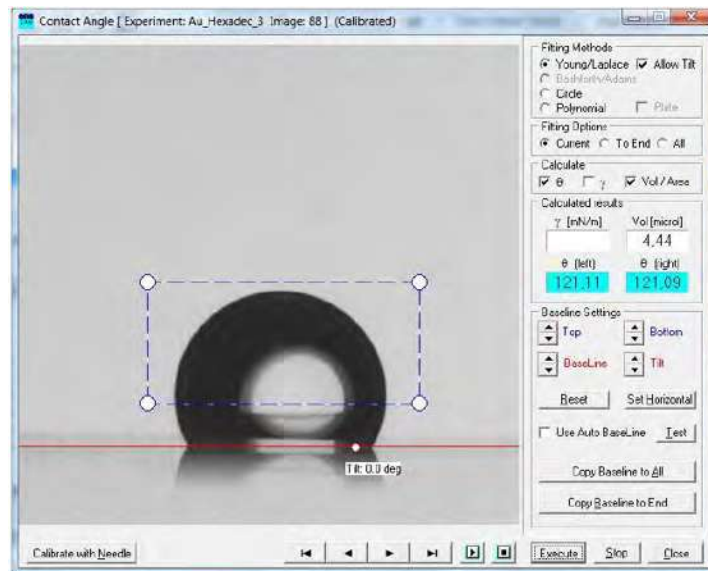


Figura 2.5 Imagen de captura de una gota con el Software Attention Theta.

El software, al momento de capturar la imagen, lo que hace es encontrar la “línea base” que es la línea donde la gota hace contacto con la superficie sólida, posteriormente calcula el ángulo mediante el análisis de la imagen y lo almacena en una base de datos que posteriormente se puede usar para su procesamiento.

## 2.6 ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ATÓMICA POR PLASMA.

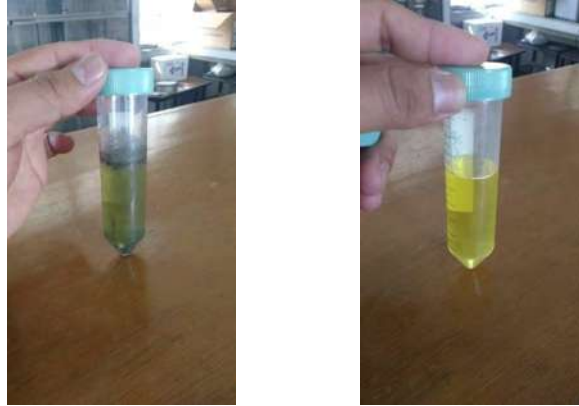
El equipo de emisión atómica tiene la limitante de solamente analizar muestras líquidas con bajas concentraciones de los elementos a analizar por lo tanto y previo a analizar tanto el agua de mar como la pirita, se deben realizar diluciones de agua de mar y para el caso de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) se debe digerir en una solución ácida y con ello obtener una dilución de pirita.

Para el caso del agua de mar, se filtra el agua para eliminar cualquier contaminante que pueda dañar el capilar el equipo (Figura 2.6), como se desconoce la concentración de sus componentes se realizan diluciones 1/1000 y 1/10000 para poder procesarlos en el equipo.



**Figura 2.6 Sistema de filtrado de agua de mar.**

Para analizar la pirita, se digirieron 0.25g de Pirita pulverizada en una solución aforada a 30 ml con 9 ml de  $\text{HCl}$  + 3 ml de  $\text{HNO}_3$  + 2 ml de  $\text{HF}$  durante 48 h (véase Figura 2.7). Posteriormente se realizaron diluciones 1/1000 y 1/10000 previamente filtradas para procesarlas en el equipo de emisión atómica de plasma.



**Figura 2.7 Pirita en solución ácida antes de las 48 h y pirita digerida al transcurrir las 48 h.**

Además, se deben preparar diluciones con las soluciones patrones para tener un valor de referencia en el equipo, para el caso de todos los patrones exceptuando el Oro y la plata las diluciones se prepararon 10 ppm mientras, el oro y la plata se prepararon a 3 ppm. Los componentes químicos buscados en las muestras fueron los siguientes en base al documento de la ASTM “Standar Practice for the Prepration of Substitute Ocean Water”:

**Tabla 2.2 Elementos químicos analizados en las muestras de pirita y el agua de mar.**

Pirita	Agua de Mar
Fe-Cu-Zn-Pb-Cr-Au	Ca-Mg-Na-Ag-K-Sr-Ba-Cu-Zn-Pb-Mn

## 2.7 MEDICIONES DE MICROFLOTACIÓN

En la medición de microflotación se utilizó el mineral de pirita. Como ya se mencionó los reactivos utilizados para la microflotación fueron el colector Xantato Isobutílico de sodio y el espumante MIBC. La experimentación para la microflotación consistió en mezclar 1.5 g de partículas de mineral, el tamaño de partícula fue de 38  $\mu\text{m}$ , con 150 ml de agua destilada en un vaso de precipitado de

250 ml. Se agitó durante 2 min con un agitador magnético y enseguida agregó el colector agitándose durante 3 minutos más. Después agregó el espumante y finalmente se agitó durante 3 minutos. Una vez que tuvimos la pulpa acondicionada, se introduce en la celda de flotación por 10 minutos y se hace pasar nitrógeno con un caudal de 10 ml/min.

Una vez transcurrido un lapso de los 10 min, la muestra del material recuperado y las colas o residuos se extraen y se filtran. Las muestras de cola y recuperado se secan por separado en un lapso de 24 h. Los resultados mostrados en secciones posteriores son los pesos secos del concentrado de mineral y las colas.

$$R = \frac{W_r}{W_r + W_c} \times 100 \quad (12)$$

Donde R es el porcentaje de recuperación,  $W_r$  es el peso del recuperado y  $W_c$  es el peso de las colas.

## 2.8 PARÁMETROS DE AJUSTE.

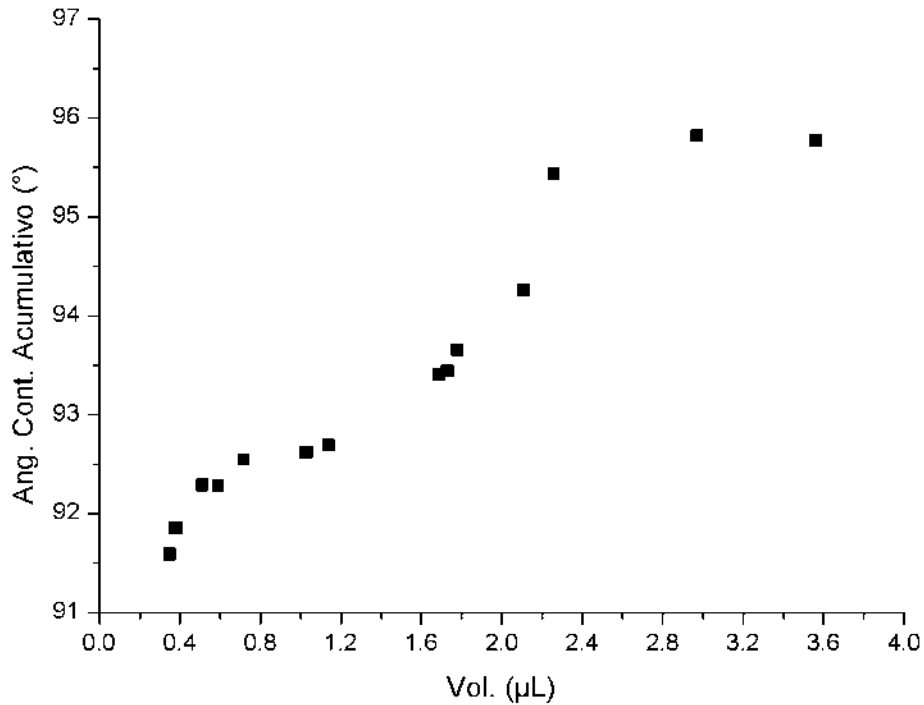
Durante los experimentos de medición del ángulo de contacto entre una superficie de pirita pulida y soluciones salinas, se detectaron variaciones en el ángulo de contacto con respecto al tamaño de la gota, por lo que se realizaron una serie de mediciones con diferentes volúmenes de gota, los cuales se muestran en la Figura 2.8.

La gráfica muestra el ángulo de contacto acumulativo que se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ángulo de contacto acumulativo} = \frac{\sum_1^n \text{Ángulo de contacto a diferente volumen}}{n} \quad (13)$$

n = número de mediciones de ángulo de contacto a un volumen dado





**Figura 2.8** Gráfica del Ángulo de Contacto vs Volumen de la gota para una solución al 6 % w/w de NaCl.

Como se observa en la gráfica de la Figura 2.8. La tendencia del ángulo es que a medida que el tamaño de la gota disminuye de igual manera sucede con el ángulo de contacto. Como Drelich et al. Sugieren es que una de las causas posibles por las que se da esta variación en el ángulo de contacto puede ser el movimiento de la aguja al depositar la gota sobre la superficie, lo que perturba la gota y genera irreversibilidades que la gota es incapaz de absorber generando un ángulo de avance. A partir de los resultados obtenidos se decidió trabajar con tamaños de gota de alrededor de los 3  $\mu\text{L}$  en donde se observa que el ángulo de contacto presenta pequeñas variaciones con respecto al volumen de la gota y no ha alcanzado un valor de volumen lo suficientemente alto en donde empiecen a dominar los efectos de gravedad.

Por otro lado, también fue necesario establecer un tiempo en el cual el ángulo de contacto. Se graficó el ángulo de contacto de una gota de agua desionizada con

volumen de 3.5  $\mu\text{L}$  sobre la superficie de pirita en función del tiempo, desde la deposición de la gota sobre la superficie, de lo anterior se obtiene la Gráfica 2.

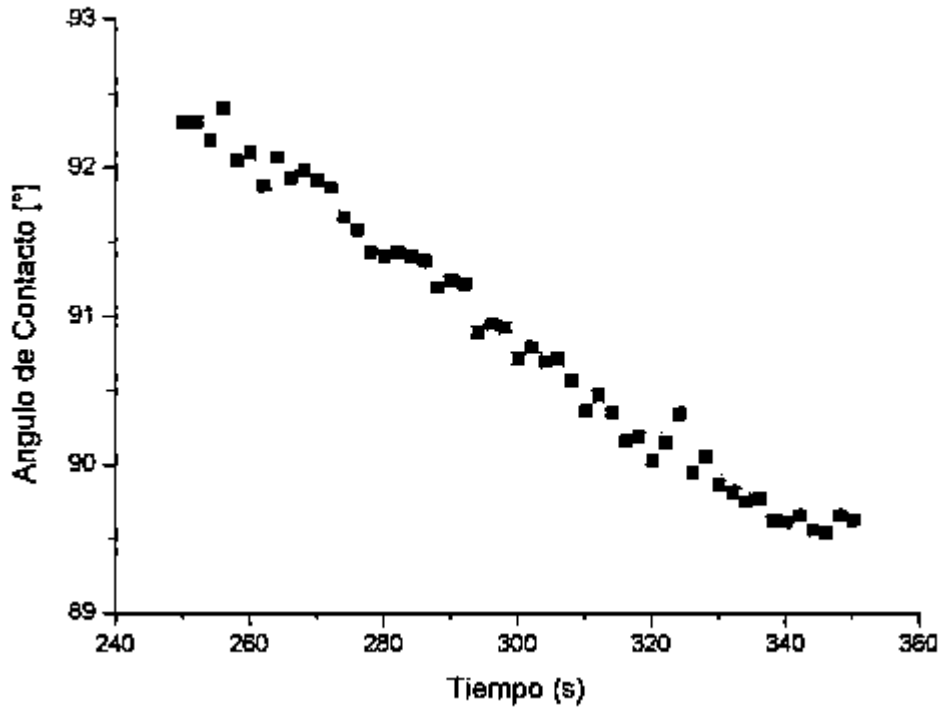


Figura 2.9 Gráfica del Ángulo de Contacto vs Tiempo de una gota de agua des-ionizada sobre pirita en un tiempo 250 s – 350 s.

De la gráfica de la Figura 2.9, se pueden observar (pequeñas variaciones en el ángulo de contacto con respecto al tiempo como se puede apreciar en el valor de la pendiente de la línea de ajuste, cuyas causas pueden ser un cambio de volumen de la gota generado por un “tipo de ángulo de retroceso” (Drelich et al., 1992), o por una pérdida de masa que representa un 4% del volumen de la gota, variaciones encontradas aun cuando se han seguido las recomendaciones dadas por Drelich para una buena repetitividad en las mediciones de ángulo de contacto (Drelich, 2013).

De acuerdo a la gráfica, la ecuación que nos permite predecir el ángulo de contacto en función del tiempo para las condiciones establecidas en los experimentos es la siguiente:

$$\theta = 99.98 - 0.03t \quad (14)$$

Donde  $t$  es el tiempo en segundos y  $\theta$  es el ángulo de contacto.

Derivado de lo observado en estos experimentos de ajuste de parámetros, se decide trabajar con tamaños de gota de  $3.5 \mu\text{L}$  y se deja estabilizar la gota sobre la superficie) durante 300s antes de cada medición.

## CAPITULO 3

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados de los experimentos que se efectuaron para determinar la factibilidad del remplazo del agua por agua de mar en la recuperación selectiva de pirita.

En el primer apartado se determina la composición química de la pirita mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) que nos permite conocer la homogeneidad en la superficie y con ello validar que se presenta una superficie químicamente homogénea, de la misma manera, se efectuó un análisis con difracción de rayos X que permite determinar la composición química dentro del cristal de pirita que se usó para los experimentos de microflotación.

Para el agua de mar, se analizaron los componentes en base a la norma ASTM D1141-98 (Reaprobada en 2003) sobre los componentes presenten en el agua de mar estándar donde se pudo corroborar la existencia de iones Sodio (Na) y Calcio (Ca) como los más abundantes en el agua de mar.

Se determinó la conductividad de las soluciones salinas para poder encontrar la salinidad del agua de mar y con ello comparar si el efecto del ion sodio por ser el más abundante en el agua de mar, es el que modifica de manera significativa la flotabilidad de la pirita.

Por otra parte, se midió la tensión superficial del agua de mar y se comparó con los valores de tensión superficial de soluciones salinas. Se obtuvieron también los

valores de tensión superficial del agua de mar en presencia de colector Xantato XIBS y espumante MIBC.

Una vez determinada la tensión superficial, se midió el ángulo de contacto sobre la superficie de pirita a diferentes condiciones experimentales. La primera serie de experimentos solamente analiza el efecto del ion sodio sobre la superficie a varias concentraciones de NaCl. En una segunda serie de experimentos se estudia el efecto del pH sobre el ángulo de contacto usando agua de mar y agua desionizada. Por otra parte se analizó el efecto del espumante MIBC y el colector XIBS sobre la superficie de pirita a un pH fijo donde se obtiene un mayor valor en el ángulo de contacto de los experimentos precedentes. Posteriormente se realizaron experimentos a distintos valores de pH a una concentración fija de colector y Xantato y con ello determinar si el efecto del pH combinando ambos reactivos es significativo.

Finalmente se realizaron experimentos de microflotación donde se calculó el porcentaje de recuperación para ciertos valores de pH tanto en agua de mar como en agua desionizada comparando sus resultados. Se observó una relación entre el ángulo de contacto y el porcentaje de recuperación de mineral pirita que favorece la viabilidad del empleo de agua de mar en los procesos de flotación selectiva.

### **3.1 DETERMINACIÓN QUÍMICA DE LA PIRITA Y EL AGUA DE MAR**

Para poder caracterizar químicamente el agua de mar y la pirita se usaron tres técnicas: Análisis MEB, Difracción de Rayos X y Análisis de Emisión Atómica de Plasma, con el fin de garantizar que los experimentos se han realizado sobre un cristal de pirita con bajas impurezas y conocer la composición química del agua de mar usada en los experimentos para relacionarla con la norma de la ASTM sobre la composición de agua sintética de mar.

### 3.1.1 ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Del análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se obtiene la Figura 3.1A, donde se puede observar que los principales máximos corresponden al azufre (S), al hierro (Fe), el cobre (Cu), oxígeno (O) y calcio (Ca). El oxígeno puede representar la presencia de óxidos formados en la superficie de pirita y se sabe que el calcio es un contaminante frecuente en la pirita. Cabe mencionar que la presencia de cobre se debe a que las muestras fueron recubiertas con cobre para obtener una capa conductora de electrones y generar la imagen de la superficie.

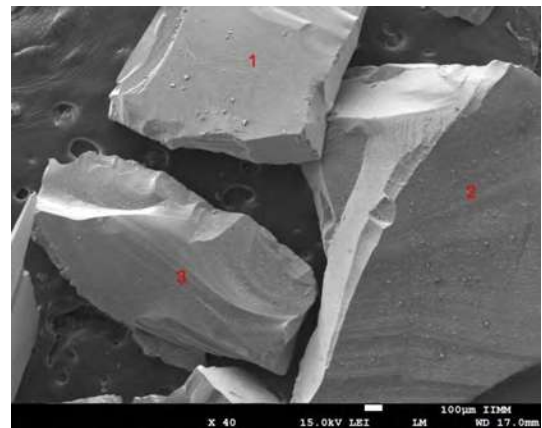
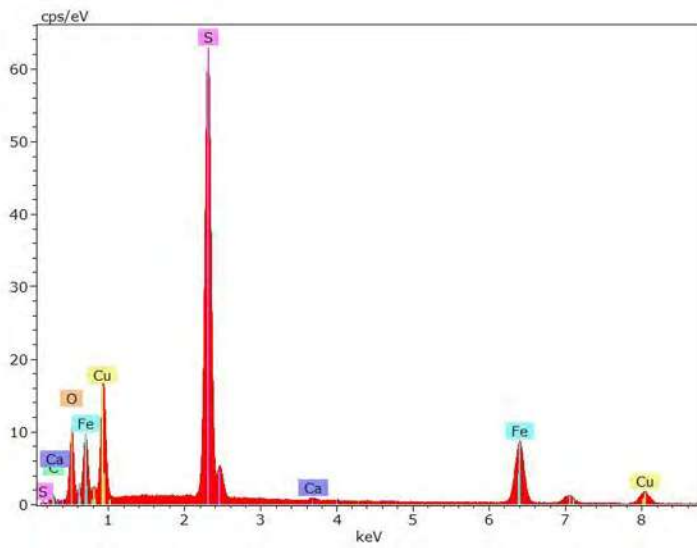
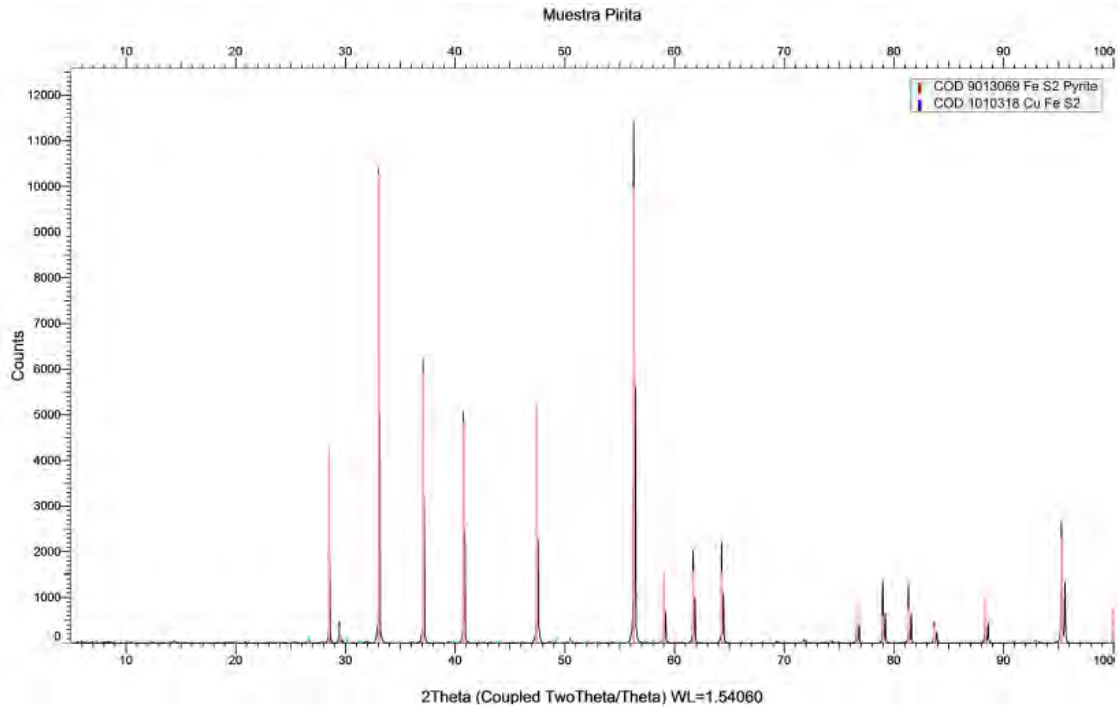


Figura 3.1 (A). Resultado de los principales componentes de la muestra de pirita analizada. (B). Imagen de las tres muestras de pirita analizadas bajo el MEB.

### 3.1.2 ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El procesamiento de la pirita en el equipo de difracción de rayos X nos permitió caracterizar la composición química de la pirita desde la perspectiva de los minerales y fases cristalinas presentes en la muestra, a diferencia del equipo MEB que nos brinda los elementos químicos presentes. Los resultados obtenidos por el equipo nos permiten comprobar que el principal mineral de la muestra

efectivamente es la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), esto se visualiza en los principales máximos obtenidos y que coinciden con el patrón de difracción de la pirita, ver Figura 3.2.



**Figura 3.2 Resultado del análisis de difracción de rayos X.**

### 3.1.3 ANALISIS POR EMISIÓN ATÓMICA DE PLASMA

El análisis de emisión atómica, nos proporcionó la composición química del agua de mar, que se reportan en la Tabla 3.1. Ya que el equipo de emisión atómica analiza solamente elementos puros, los elementos que se buscaron fueron en base a lo reportado en la norma ASTM D1141-98 (Reaprobada en 2003) y que se muestra en la Figura 3.3.

**Tabla 3.1. Resultado de la composición química del agua de mar analizada por el equipo de emisión atómica de plasma.**

Composición química del agua de mar por emisión atómica de plasma [ g/l ]										
Zn	Sr	Cu	Mn	Pb	Ba	K	Na	Mg	Ca	Ag
0.0062	0.0049	0.0035	0.0009	0.0000	0.0020	0.586	9.1761	1.2061	0.3594	0.0106

De la tabla anterior se observa que los principales cationes presentes en el agua de mar son los de sodio, magnesio y calcio. Al comparar con la tabla de composición química de agua sintética de mar proporcionada por la ASTM se puede visualizar que los principales compuestos corresponden de manera proporcional, al cloruro de sodio NaCl, cloruro de magnesio MgCl<sub>2</sub> y cloruro de calcio CaCl<sub>2</sub>.


 D 1141 – 98 (2003)

TABLE X1.1 Chemical Composition of Substitute Ocean Water <sup>A,B</sup>

Compound	Concentration, g/l
NaCl	24.53
MgCl <sub>2</sub>	5.20
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.09
CaCl <sub>2</sub>	1.16
KCl	0.695
NaHCO <sub>3</sub>	0.201
KBr	0.101
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.027
SrCl <sub>2</sub>	0.025
NaF	0.003
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0000994
Mn(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	0.0000340
Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0000308
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0000096
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0000066
AgNO <sub>3</sub>	0.0000049

<sup>A</sup>Chlorinity of this substitute ocean water is 19.38.

<sup>B</sup>The pH (after adjustment with 0.1 N NaOH solution) is 8.2.

Figura 3.3 Composición química del agua sintética de mar de la ASTM.

### 3.2 CONDUCTIVIDAD

Se prepararon soluciones salinas con NaCl y se midió su conductividad junto con una muestra de agua de mar. Ya que es un parámetro que ayuda a determinar la salinidad de la muestra de agua de mar y su equivalente en una solución con NaCl, en la Tabla 3.2 se muestra el valor para la conductividad para concentraciones en fracción de peso w/w en pasos de 5 % hasta el 25 % w/w.



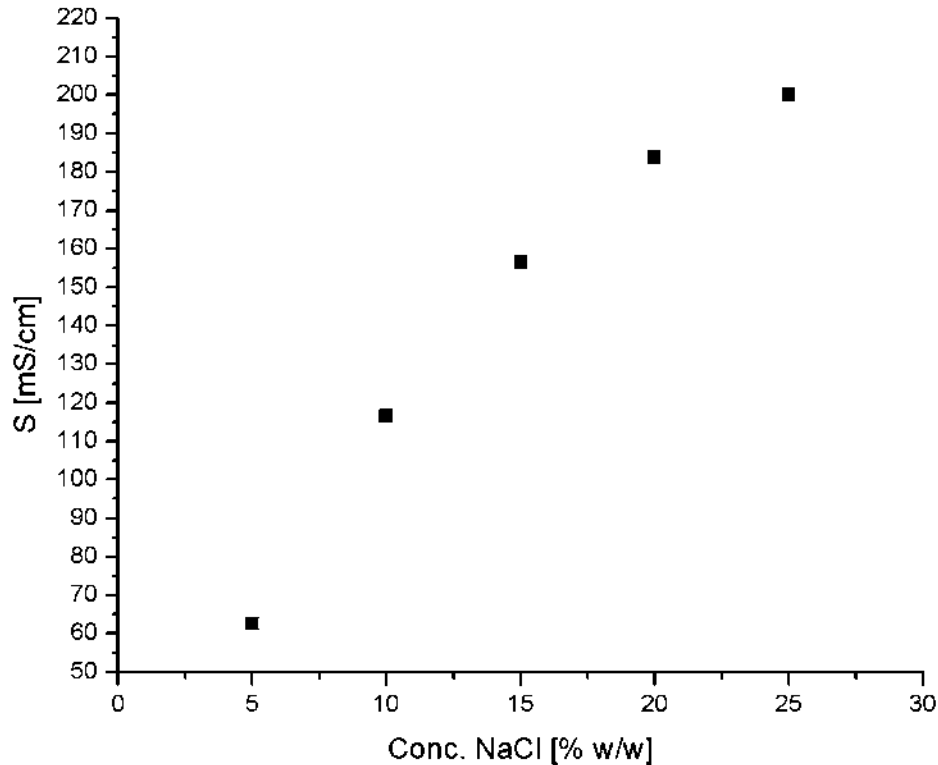
**Tabla 3.2 Conductividad medida en las soluciones con concentración 5 - 25 % w/w de NaCl y el valor obtenido para el agua de mar.**

<b>Concentración NaCl [% w/w]</b>	<b>Conductividad [mS/cm]</b>
Agua desionizada	< 1
5	62.5
10	116.6
15	156.4
20	183.8
25	200
Agua Mar	43.3

**Tabla 3.3 Conductividad para soluciones salinas con concentración de 1 - 6 % w/w de NaCl.**

<b>Concentración NaCl [% w/w]</b>	<b>Conductividad [mS/cm]</b>
Agua desionizada	< 1
1	14.93
2	28.9
3	41.6
4	53.7
5	62.5
6	76.4

En la Tabla 3.2 se puede observar que el valor de la conductividad del agua de mar cae dentro del rango de soluciones salinas del 1 % al 6 % w/w de concentración del NaCl. Posteriormente se refinaron las concentraciones en paso de 1 % w/w hasta el 6 % w/w para encontrar el valor que más se aproxime a la conductividad de la muestra de agua de mar. En la Tabla 3.3, se puede ver que la salinidad del agua de mar cae dentro de un rango del 3 % al 4 % en fracción de peso.

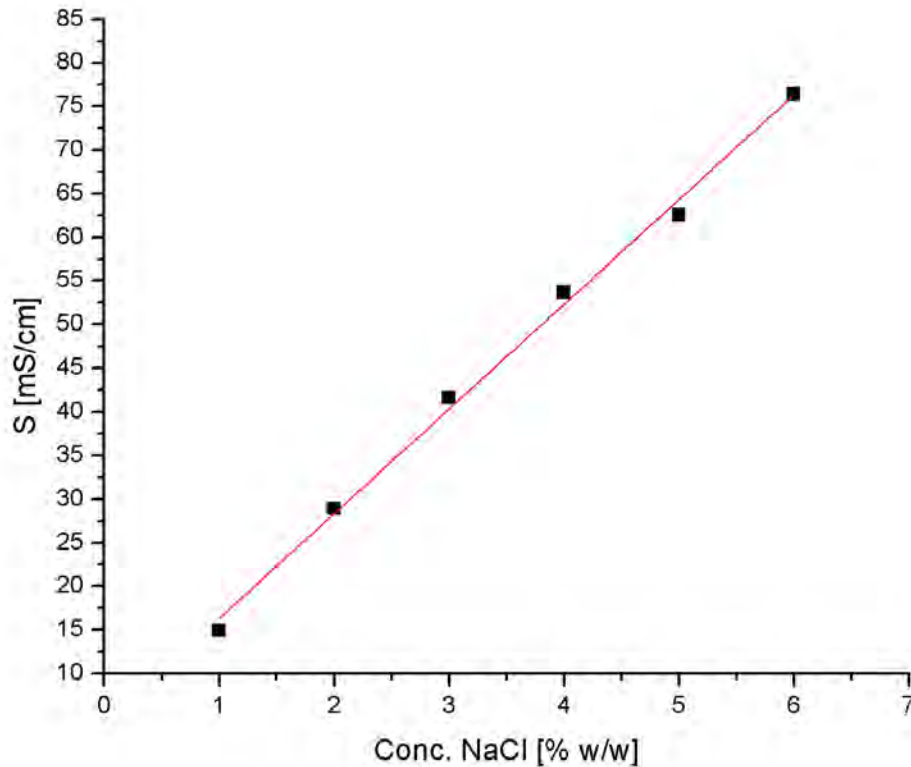


**Figura 3.4 Gráfica de Conductividad vs Concentración de NaCl en el rango de 5 – 25 % en fracción de peso.**

En la Figura 3.4 se muestran los valores de la conductividad contra porcentaje de concentración de NaCl en el rango del 5 % – 25 % en fracción de peso, se observa que al disolver el NaCl, se genera una solución electrolítica que permite el paso de una corriente eléctrica debido a los iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y los iones de cloro ( $\text{Cl}^-$ ) por lo que al aumentar la cantidad de NaCl en las soluciones salinas, la conductividad aumenta, como se puede visualizar en las Figuras 3.4 y 3.5.

En la gráfica de la Figura 3.5 se muestra el comportamiento de la conductividad con respecto a la concentración de NaCl. La conductividad de agua de mar obtenida fue de 43.3 mS/cm y correspondería a un valor en la concentración de

NaCl dentro del rango de 3 % – 4 % en fracción de peso de la concentración de NaCl



**Figura 3.5 Conductividad de soluciones de NaCl vs %Concentración w/w 1-6% de NaCl, el 0% corresponde al agua desionizada.**

La ecuación de ajuste para los datos de la gráfica de la Figura 3.5 está descrita por la ecuación siguiente:

$$S = 4.31 + 12.01C_s \quad (15)$$

Donde S es el valor de la conductividad que presenta un comportamiento lineal con  $C_s$  la concentración de cloruro de sodio en fracción de peso.

### 3.3 TENSIÓN SUPERFICIAL

La tensión superficial es un parámetro que nos permite conocer cuanta fuerza se requiere para incrementar el área superficial de un fluido, dicho parámetro es

importante porque nos permite caracterizar la interface de la burbuja, es decir la interface agua de mar y aire.

En esta sección se analizará el efecto del aumento de la concentración de colector y el espumante directamente en la tensión superficial de una muestra de agua de mar.

### 3.3.1 TENSIÓN SUPERFICIAL DE AGUA DE MAR Y SOLUCIONES SALINAS A VARIANDO SU CONCENTRACIÓN DE NaCl.

Se obtuvo el valor de tensión superficial del agua de mar y se comparó con los valores obtenidos para diferentes concentraciones de soluciones de NaCl ya que se desea observar si presenta una relación entre las soluciones y el ángulo de contacto (G. Bournival et al. 2012). Las mediciones para diferentes concentraciones salinas se realizaron en el rango de 5 % – 25 % w/w de la concentración de NaCl y corresponden a las concentraciones empleadas para las mediciones de conductividad.

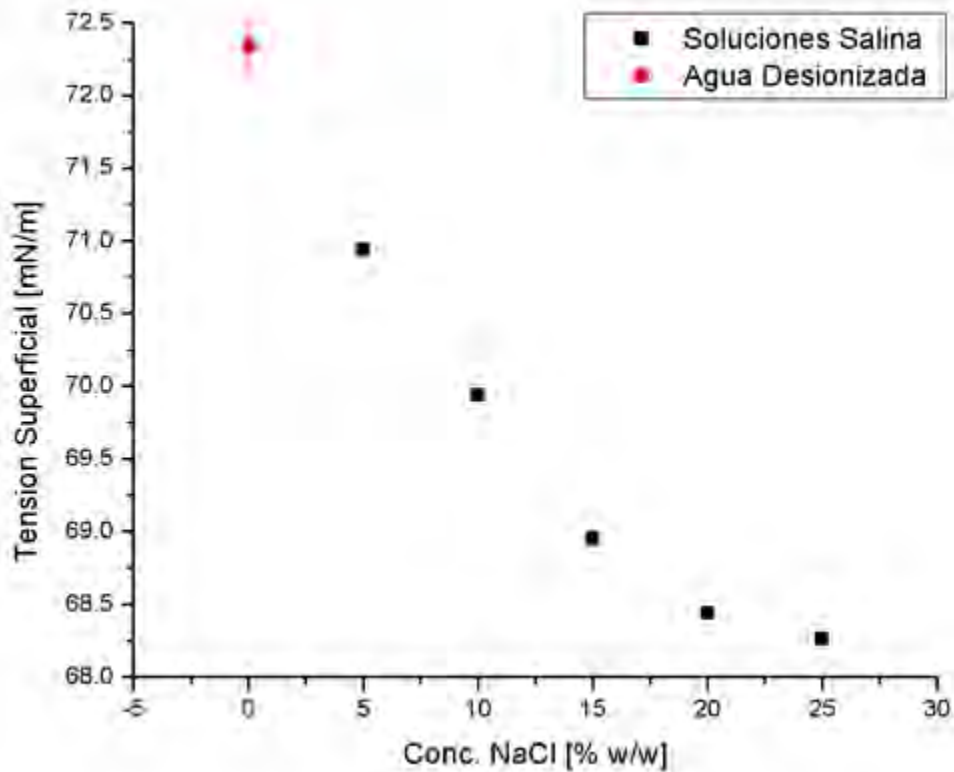
Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5 y la gráfica de la variación de la tensión superficial con la concentración de NaCl se muestran en las Figuras 3.6 y 3.7.

**Tabla 3.4 Valores medidos para la tensión superficial en soluciones salinas 5 - 25 % w/w, agua desionizada y agua de mar.**

<b>Concentración NaCl [% w/w]</b>	<b>Tensión Superficial [mN/m]</b>	<b>Desviación estándar [mN/m]</b>
Agua desionizada	72.34	0.29
5	70.94	0.22
10	69.94	0.04
15	68.95	0.06
20	68.44	0.08
25	68.26	0.09
Agua Mar	71.36	0.02

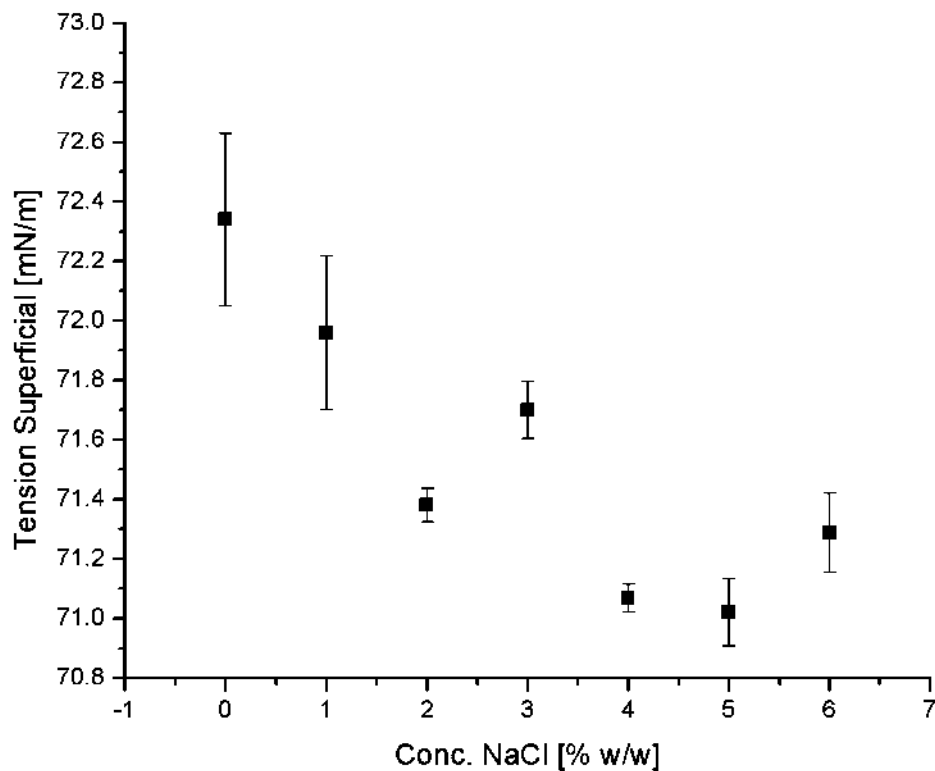
**Tabla 3.5 Valores medidos para la tensión superficial en soluciones salinas 1 % - 6 % w/w, agua desionizada y agua de mar.**

Concentración NaCl [% w/w]	Tensión Superficial [mN/m]	Desviación estándar [mN/m]
Agua desionizada	72.34	0.29
1	71.96	0.26
2	71.38	0.06
3	71.70	0.1
4	71.07	0.05
5	70.94	0.11
6	71.29	0.13
Agua Mar	71.36	0.02



**Figura 3.6 Tensión superficial vs concentración NaCl [%w/w] rango de 5%-25% w/w.**

De la Tabla 3.4 se puede identificar que el valor de la tensión superficial del agua de mar se encuentra en el rango de 1 al 5 % w/w de concentración salina. De manera similar a los resultados de conductividad del agua de mar fue necesario refinar las mediciones en el rango del 1 al 6 % w/w de salmuera y poder identificar un valor cercano a las propiedades inherentes al agua de mar. Los resultados se muestran en la Tabla 3.5 y la Figura 3.7.



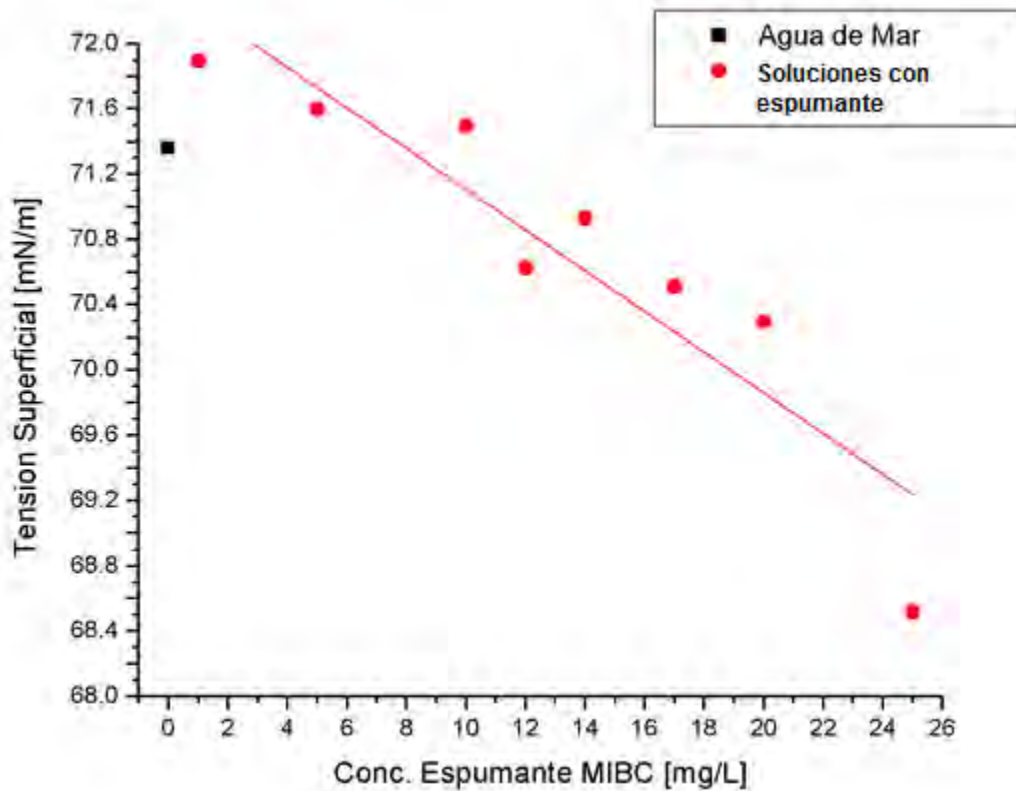
**Figura 3.7 Tensión superficial vs % concentración w/w de NaCl 1%-6% w/w, el 0% corresponde al agua desionizada.**

En la Figura 3.7 se puede visualizar de manera similar a la Figura 3.6, que existe un decremento en la tensión superficial al aumentar la concentración de NaCl. La tensión superficial del agua de mar es similar al obtenido a una concentración del 2 % w/w de NaCl, sin embargo la conductividad obtenida del agua de mar esta

más cercana a la concentración del 3 % w/w. En la siguiente sección se analizará la mojabilidad de las soluciones salinas con NaCl y el agua de mar a través de mediciones de ángulo de contacto, prestando particular atención en si el ion sodio es el elemento determinante en la mojabilidad de la superficie de pirita.

### **3.3.2 TENSIÓN SUPERFICIAL DEL AGUA DE MAR CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DEL ESPUMANTE MIBC.**

Una vez que se midió la tensión superficial del agua de mar, se obtuvieron los valores de tensión superficial variando la concentración del espumante MIBC en agua de mar. Se sabe que la función del tensoactivo es disminuir la tensión superficial de la solución, esta disminución de la tensión superficial permite formar burbujas más estables en el proceso de flotación selectiva de minerales (López Valdivieso et al., 2005). En esta sección se analizará el efecto del espumante a las concentraciones de 1, 5, 10, 12, 14, 17, 20, 25 mg/L en agua de mar y analizar el efecto que tienen dichas concentraciones en la tensión superficial del agua de mar y cuyos valores se presentan en la Figura 3.8.



**Figura 3.8 Tensión superficial vs concentración de espumante MIBC en agua de mar.**

La ecuación que describe la línea de ajuste es:

$$\sigma = 72.35 - 0.125 C_E \quad (16)$$

Donde  $\sigma$  es la tensión superficial y  $C_E$  es la concentración de espumante expresado en [mg/L].

En la gráfica de la Figura 3.8 se observa de manera general de los valores obtenidos experimentalmente al aumentar la concentración de espumante disminuye la tensión superficial. Tal efecto se analizará desde la perspectiva de mojabilidad en la sección siguiente a un valor fijo de pH.



### 3.3.3 TENSIÓN SUPERFICIAL DEL AGUA DE MAR CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DEL COLECTOR XIBS.

En esta sección se analizó el efecto que tiene el aumento en la concentración de colector sobre la tensión superficial del agua de mar, las concentraciones de colector utilizadas en esta sección fueron  $5 \times 10^{-3}$ ,  $1 \times 10^{-2}$ ,  $4 \times 10^{-2}$ ,  $7 \times 10^{-2}$ ,  $1 \times 10^{-1}$ ,  $4 \times 10^{-1}$ ,  $7 \times 10^{-1}$  y 1 mM, los resultados de las mediciones realizadas se presentan en la gráfica de la Figura 3.9.

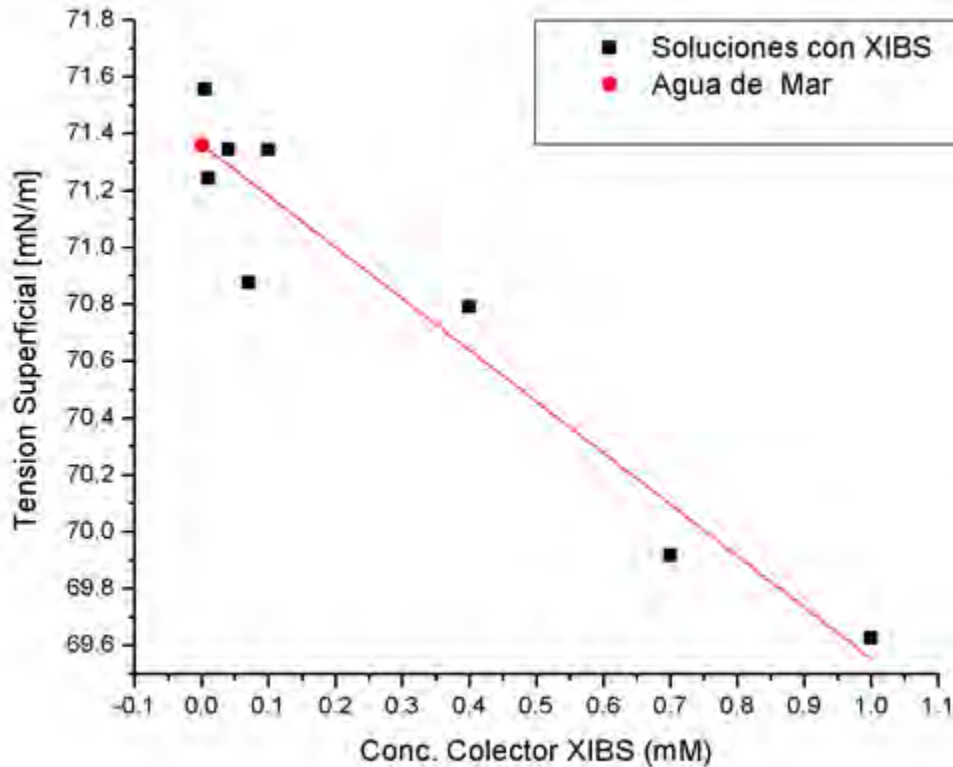


Figura 3.9 Tensión superficial vs concentración de colector XIBS.

La ecuación que describe la línea de ajuste es:

$$\sigma = 71.36 - 1.81 C_c \quad (17)$$

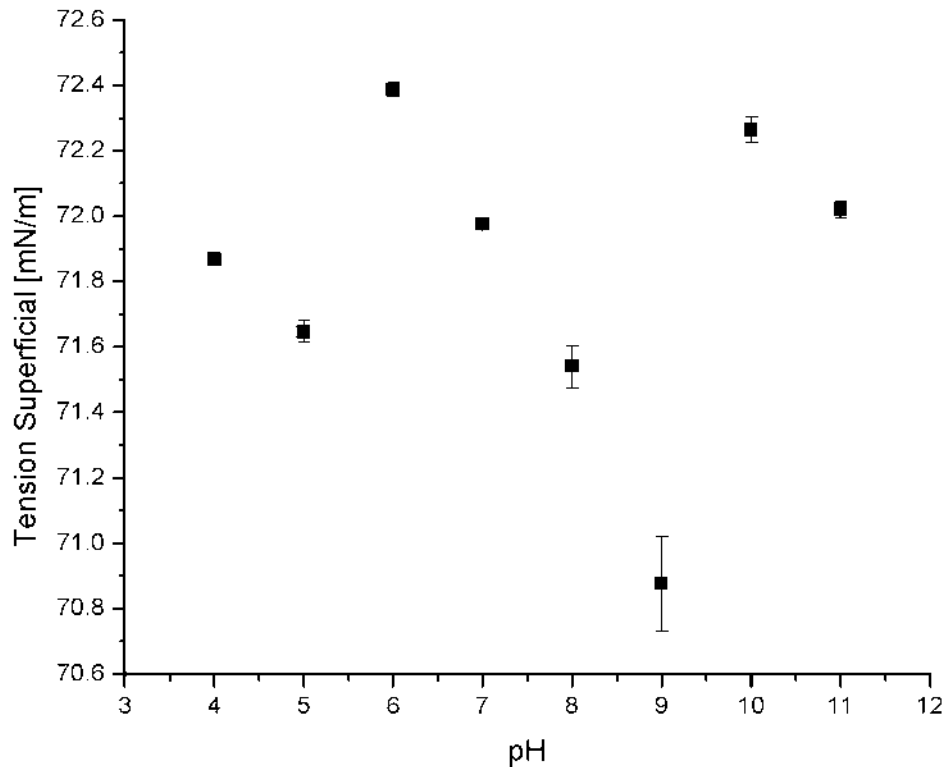
Donde  $\sigma$  es la tensión superficial y  $C_c$  es la concentración del colector expresado en [mM].

De los resultados graficados en la Figura 3.9 se puede observar que la tensión superficial del agua de mar disminuye a medida que aumenta la concentración del colector.

Comparando el efecto del colector y el espumante de manera separado, se pudo observar que el espumante disminuye la tensión superficial del agua de mar en mayor medida que el colector XIBS, esto se puede corroborar con el valor de las pendientes de ambos ajustes, donde la recta indica que la tensión superficial decrece más rápido al aumentar la concentración de espumante que al aumentar la concentración del colector, Esto se debe a que el espumante modifica en mayor medida la interface líquido-gas y el colector modifica en mayor medida la interfaz líquido-sólido. En la sección siguiente se analizará el efecto del colector, pero desde la perspectiva de la mojabilidad.

#### **3.3.4 TENSIÓN SUPERFICIAL A CONCENTRACIÓN FIJA DE COLECTOR Y ESPUMANTE CON VARIACIÓN EN EL pH.**

Una vez que se analizó el efecto por separado del espumante y el colector, se experimentó con ambos modificadores usados en la flotación de minerales y se cuantificó la variación de la tensión superficial a diferentes valores de pH, cuyos resultados se pueden observar en la Figura 3.10.



**Figura 3.10 Tensión superficial a un valor fijo de colector XIBS y colector MIBC empleando agua de mar.**

Se sabe que el pH es un factor importante en los procesos de recuperación de minerales, en este caso como se puede observar en la Figura 3.10, variaciones en el pH del agua de mar genera oscilaciones en los valores de tensión superficial al modificar las fuerzas intermoleculares entre los modificadores de flotación.

### 3.4 ÁNGULO DE CONTACTO

El ángulo de contacto nos proporciona el grado de afinidad de un fluido sobre una superficie sólida, en esta sección, se analizará el efecto de soluciones salinas a diferentes concentraciones sobre una superficie de pirita y cómo la salinidad

modifica la mojabilidad de la superficie de pirita. Se analizará también el efecto del pH y cómo éste influye en la mojabilidad del mineral.

Posteriormente se analizará el efecto por separado del espumante y el colector a un pH fijo buscando la condición experimental que permitan una mejor recuperación de mineral.

Finalmente se estudiará el efecto combinado del espumante y colector a concentraciones fijas, pero con variaciones de pH en agua de mar.

### **3.4.1 ÁNGULO DE CONTACTO CON SOLUCIONE SALINAS**

El ángulo de contacto obtenido del agua desionizada sobre la superficie de pirita, muestra que la pirita es un mineral naturalmente hidrofóbico mostrando un valor promedio de ángulo de contacto de  $96.2^\circ$ . Al momento de agregar NaCl al agua, la pirita muestra menor afinidad a la solución salina, es decir, el ángulo de contacto aumenta con respecto al agua desionizada como ha sido reportado en otros trabajos (Wang et al., 2014), una tendencia similar se puede observar en la Tabla 3.6 y la Figura 3.11.

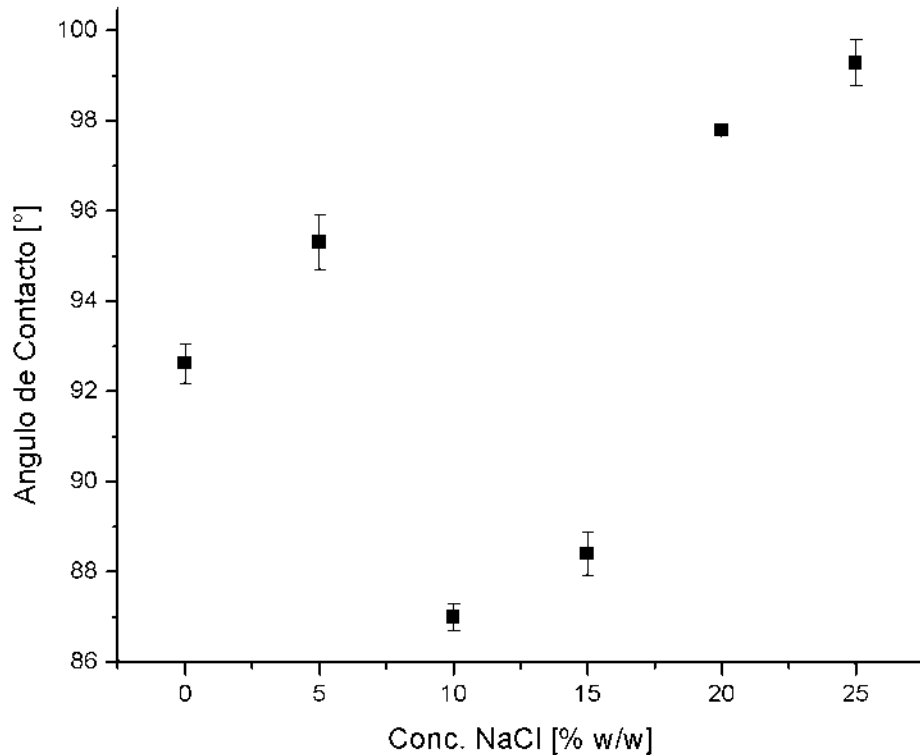
Ese efecto es deseable ya que mientras más hidrofóbico sea el mineral, será más fácil poder extraerlo mediante flotación. Sin embargo, es necesario el empleo de espumante durante el proceso de recuperación, por lo cual es importante saber si los iones liberados por el NaCl siguen siendo benéficos para el proceso o no durante la recuperación.

**Tabla 3.6 Ángulo de contacto del agua desionizada, agua de mar y soluciones salinas en el rango de 5 % - 25 % w/w sobre una superficie de pirita.**

<b>Concentración NaCl [% w/w]</b>	<b>Ángulo promedio (grados)</b>	<b>Desviación Estándar (grados)</b>
Agua desionizada	92.62	1.076
5	94.75	1.495
10	86.99	0.735
15	88.4	1.162
20	97.78	0.254
25	99.28	1.248
Agua Mar	85.52	2.580

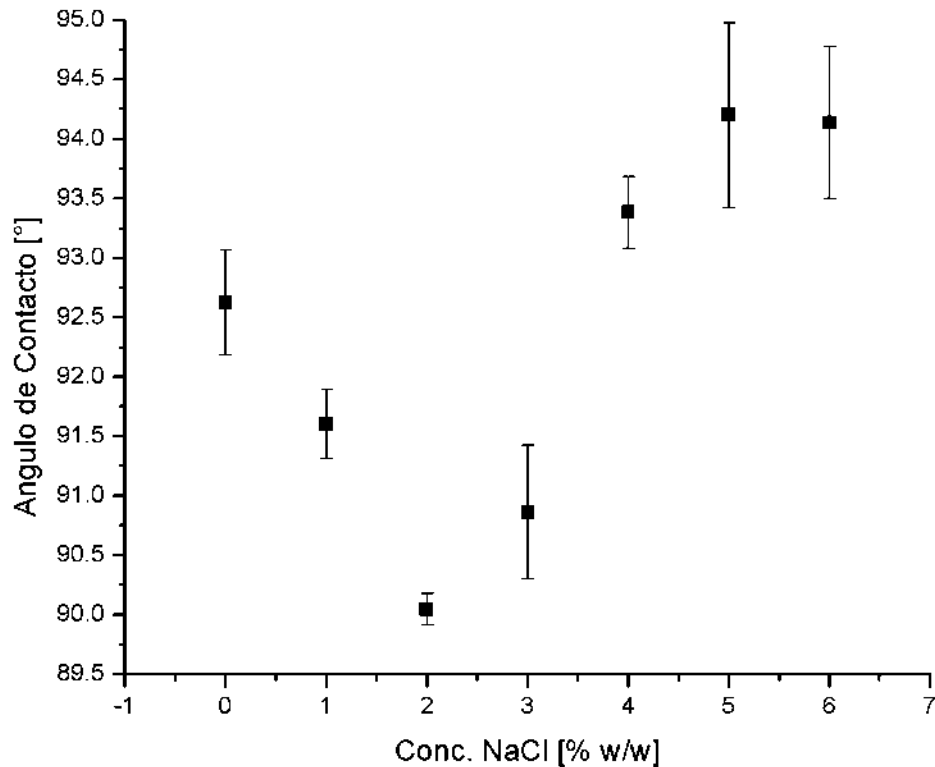
**Tabla 3.7 Ángulo de contacto del agua desionizada, agua de mar y soluciones salinas en el rango de 1 % - 6 % w/w sobre una superficie de pirita.**

<b>Concentración NaCl [% w/w]</b>	<b>Ángulo promedio (grados)</b>	<b>Desviación Estándar (grados)</b>
Agua desionizada	92.62	1.076
1	91.6	0.500
2	90.05	0.232
3	90.86	0.972
4	93.38	0.522
5	94.75	1.346
6	94.14	1.101
Agua Mar	85.52	2.580



**Figura 3.11 Ángulo de Contacto vs % concentración NaCl [% w/w] rango de 5 % - 25 % w/w.**

La Figura 3.11 muestra un comportamiento oscilatorio al aumentar la concentración de cloruro de sodio. Posteriormente se refinó el análisis, en intervalos de 1 % w/w en la concentración de NaCl hasta un valor de 6% w/w. Los resultados en general mostraron un efecto oscilante en el valor del ángulo de contacto con la concentración de NaCl, como se puede observar en las gráficas de las Figuras 3.11 y 3.12. Lo anterior puede ser efecto de la formación de una doble capa eléctrica sobre la superficie de pirita que al ir aumentando la concentración en el electrolito puede ir creciendo el número de capas eléctricas e ir generando inversión de cargas.



**Figura 3.12 Gráfica del Ángulo de Contacto vs concentración NaCl [% w/w] en un rango de 1 % - 6 %, el 0 % corresponde al agua desionizada.**

A partir de la gráfica de la Figura 3.12, se puede observar que en el rango de concentración de 1- 6 % w/w de NaCl, los valores de ángulo de contacto oscilan entre 90° - 95°. Sin embargo, el valor obtenido para el agua de mar fue de 85.5°, no cae dentro de dicho rango para estas concentraciones de NaCl, a diferencia de los resultados obtenidos de conductividad y tensión superficial. Por lo cual podemos suponer que el ion sodio y el ion cloro no son los únicos que influyen en la determinación de la mojabilidad de este mineral.

Con los resultados anteriores se pudo observar que el empleo de soluciones salinas de NaCl como un modelo de agua de mar sintética, no reproduce completamente las modificaciones interfaciales sobre la superficie de pirita tal como la induce el agua de mar. Debido a esto, los estudios siguientes se centran

principalmente en el uso de agua de mar y se comparan con agua desionizada como patrón de referencia.

### **3.4.2 ÁNGULO DE CONTACTO DE AGUA DE MAR SOBRE PIRITA A DIFERENTES pH.**

Uno de los factores más importantes y que más influyen en el proceso de recuperación de minerales es el control de pH en la solución (López Valdivieso et al., 2005). Para estudiar este factor se realizaron experimentos de medición de ángulo de contacto variando el pH en agua de mar y agua desionizada para cuantificar el cambio en la mojabilidad de la superficie de pirita.

Los resultados obtenidos para el ángulo de contacto fueron los siguientes:

Los valores de ángulo de contacto reportados en la Tabla 3.8 muestran que los ángulos de contacto de agua de mar son menores con respecto a los del agua desionizada en el rango de pH 5 a pH 11, esto indica que el agua de mar presenta mayor mojabilidad en la superficie de pirita que el agua desionizada a diferentes valores de pH.

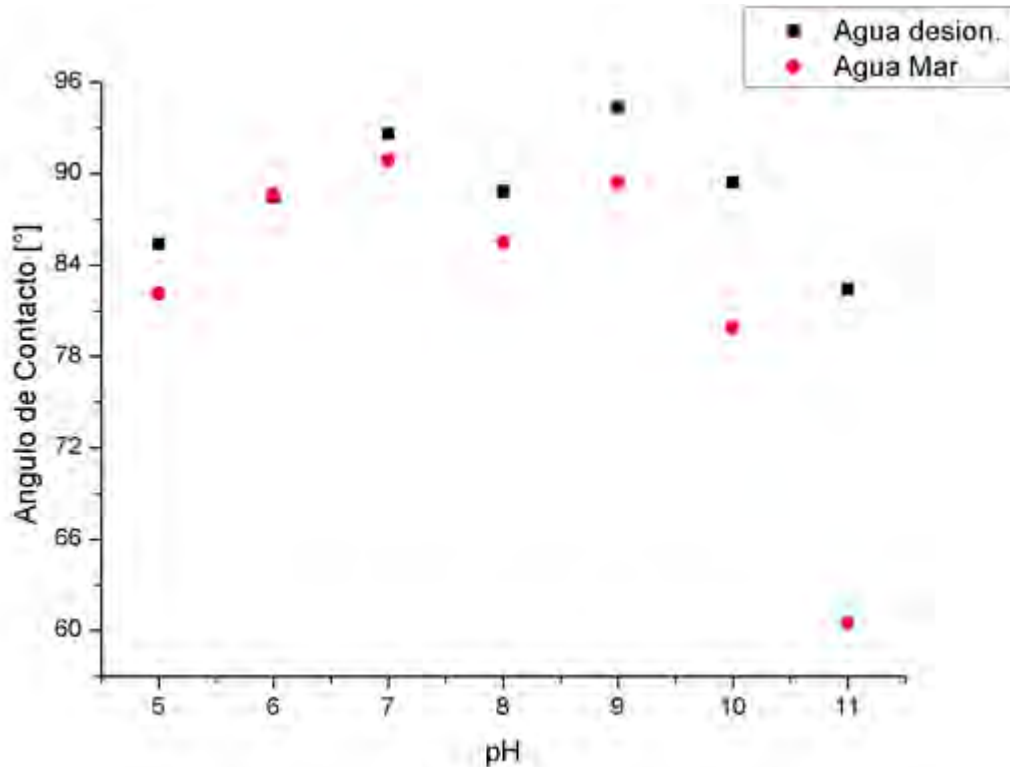
Se incluyen los casos de agua desionizada y agua de mar con su valor natural de pH. Esto es, el pH obtenido en el agua desionizada fue de 7 y el pH obtenido en el agua de mar fue de 8.3.



**Tabla 3.8 Ángulo de contacto a diferentes pH con agua desionizada y agua de mar.**

Agua desionizada						
pH						
5	6	7	8	9	10	11
85.38°	88.45°	92.62°	88.8°	94.35°	89.42°	82.42°
Agua de mar						
pH						
5	6	7	8.3	9	10	11
82.12°	88.63°	90.88°	85.51°	89.41°	79.89°	60.48°

En la gráfica de la Figura 3.13 se compara el efecto de la mojabilidad del agua desionizada con respecto al agua de mar. De los valores obtenidos se puede apreciar que el ángulo de contacto de la pirita a un pH de 7 en agua de mar es mayor a 90°, por lo que se puede decir que a este pH la pirita muestra mayor hidrofobicidad al agua de mar.



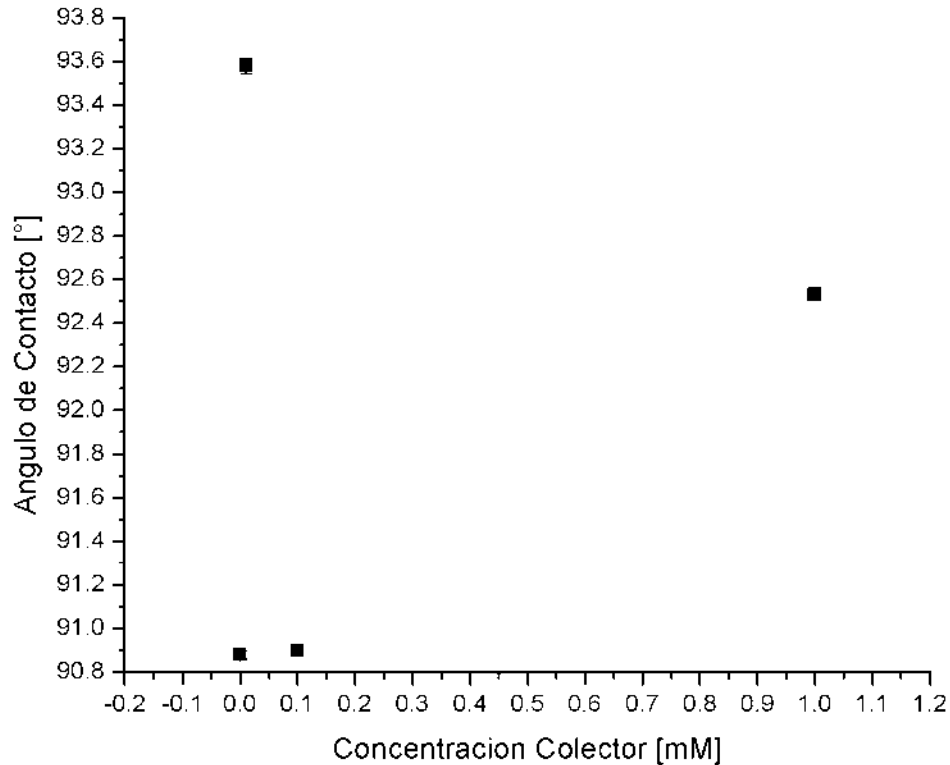
**Figura 3.13 Comparación del ángulo de contacto a diferentes pH usando agua de mar y agua desionizada sobre pirita (FeS<sub>2</sub>).**

Por otro lado, en la misma gráfica se aprecia que el ángulo de contacto de agua desionizada muestra dos máximos aparentes en donde la pirita muestra una mayor hidrofobicidad, en los valores de pH de 7 y 9. En general la pirita mostró un comportamiento más hidrofóbico al agua desionizada que al agua de mar. Debido al mayor valor de ángulo de contacto que se obtuvo del agua de mar sobre la pirita a un pH 7, se eligió trabajar a ese valor de pH para los experimentos siguientes con agua de mar.

### **3.4.3 ÁNGULO DE CONTACTO DE AGUA DE MAR SOBRE PIRITA A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE COLECTOR.**

El colector XIBS se adsorbe sobre la superficie de pirita mediante un intercambio iónico de la cabeza polar del colector con los iones ( $\text{Fe}^+$ ) presentes en la superficie de pirita. Una vez llevado a cabo el intercambio, la cola hidrofóbica del colector queda orientada hacia la solución lo que aumenta su hidrofobicidad y con ello su afinidad a ser adherido a una burbuja de aire que cruce cerca del mineral y sea arrastrada hacia la superficie en la espuma de recuperados

Una vez que se seleccionó el pH de 7 para trabajar usando solamente agua de mar, ya que la hidrofobicidad de la pirita se ve favorecida en ese valor, se realizaron mediciones de ángulo de contacto variando las concentraciones del colector Xantato Isobutílico de Sodio (XIBS). Las concentraciones empleadas para estudiar el efecto del colector fueron  $1 \times 10^{-3}$  M,  $1 \times 10^{-4}$  M,  $1 \times 10^{-5}$  M, cuyos resultados de ángulo de contacto se muestran en la Figura 3.14.



**Figura 3.14** Ángulo de contacto a diferentes concentraciones de XIBS usando agua de mar a pH 7 sobre una superficie de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), el 0% corresponde al valor del agua de mar sin colector.

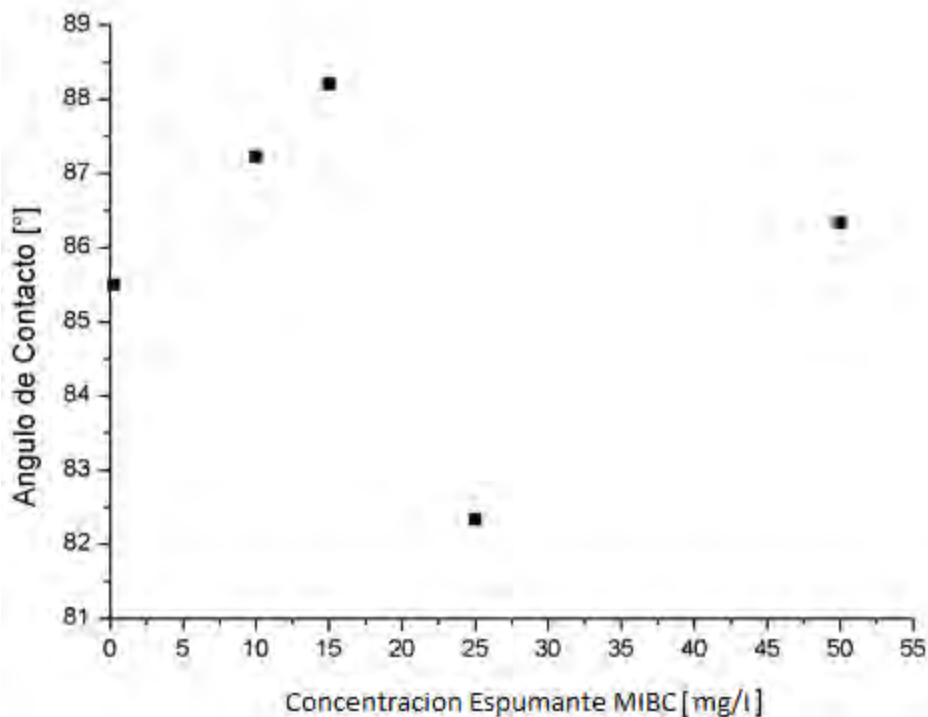
A una concentración de  $1 \times 10^{-5}$  de colector en agua de mar se obtuvo el mayor ángulo de contacto para las tres concentraciones que se prepararon. Por lo cual esta concentración de colector aumentó la hidrofobicidad de la superficie de pirita. Sin embargo, para poder comparar con otros trabajos en donde se emplea un colector Xantato para la recuperación de pirita, en los estudios siguientes se mostrarán los resultados empleando una concentración de  $1 \times 10^{-4}$  M de Xantato, con el cual se sigue manteniendo el carácter hidrofóbico de la pirita.

### **3.4.4** ÁNGULO DE CONTACTO DE AGUA DE MAR SOBRE PIRITA A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESPUMANTE.

Para el caso del espumante Metil Isobutil Carbinol (MIBC) se prepararon 4 soluciones a concentraciones de 10, 14, 25 y 50 mg/L.

La función del espumante es estabilizar las burbujas que ascienden a la superficie en el proceso de recuperación por flotación selectiva de minerales, esto se logra orientando las colas hidrocarbonadas hacia la fase de gas de la burbuja y que el grupo polar quede orientado hacia la fase líquida.

Al variar la concentración del espumante se obtuvo el mayor valor del ángulo de contacto de  $88.2^\circ$  a la concentración de 14 mg/L, ver la Figura 3.15.



**Figura 3.15** Ángulo de contacto a diferentes concentraciones de MIBC usando agua de mar a pH 7 sobre pirita ( $\text{FeS}_2$ ), el 0 corresponde al agua de mar.

De lo anterior se observa que las concentraciones más favorables para la flotación de pirita es una concentración de colector XIBS de  $1 \times 10^{-4}$  mol/L, y de espumante es una concentración de 14 mg/L a un pH de 7 usando agua de mar.

De lo que hasta ahora se puede decir del proceso es que es posible flotar pirita con agua de mar por lo menos desde la perspectiva de la adición de los componentes por separado tanto del colector como del espumante a un pH fijo, pero es importante ver su efecto conjunto en la mojabilidad del agua de mar sobre pirita.

### 3.4.5 ÁNGULO DE CONTACTO DE AGUA DE MAR SOBRE PIRITA VARIANDO pH A CONCENTRACIÓN FIJA DE ESPUMANTE Y COLECTOR.

Una vez que se ha seleccionado trabajar con valores de Xantato  $1 \times 10^{-4}$  mol/L y espumante 14 mg/L fijos, se analizará el efecto del pH sobre la mojabilidad del agua de mar en la superficie de pirita. En la Figura 3.16 se puede observar que con agua desionizada se obtuvo siempre un valor mayor de ángulo de contacto con respecto al obtenido con el agua de mar.

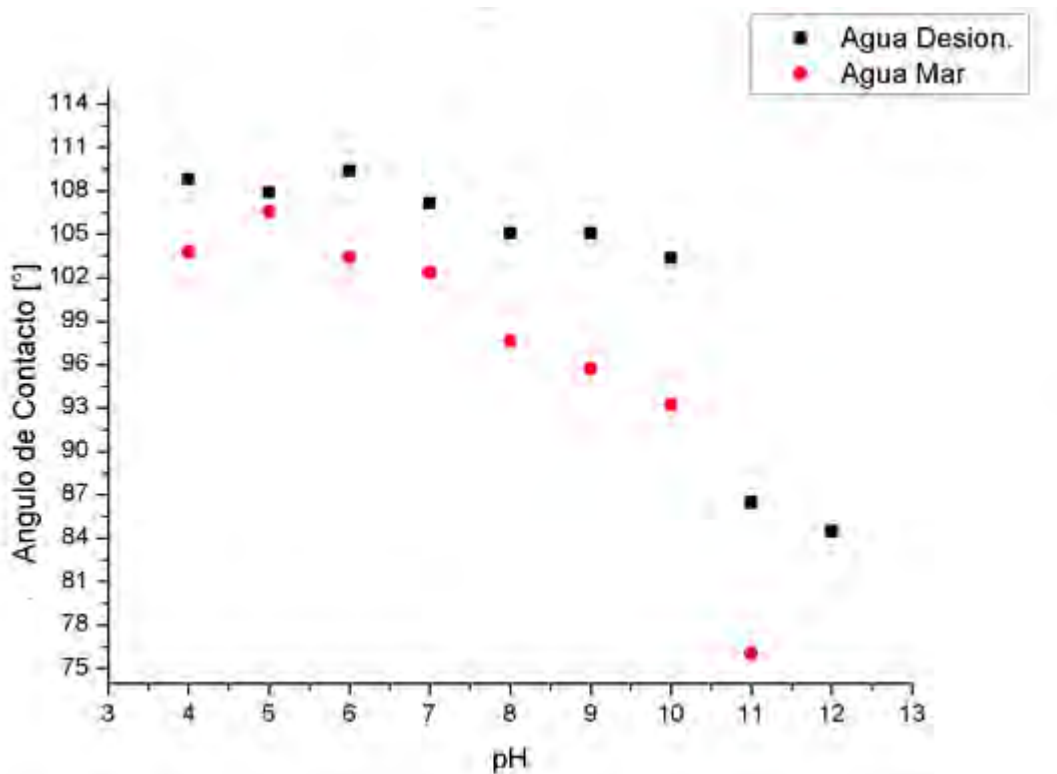


Figura 3.16 Ángulo de contacto usando agua de mar y agua desionizada a diferentes pH con una concentración de 14 mg/L de espumante MIBC y  $1 \times 10^{-4}$  M de colector Xantato.

De acuerdo a estos resultados se puede observar que en la mayoría de los casos empleados tanto colector como espumante y variando el pH de la solución, se han obtenido valores de ángulo de contacto mayores a  $90^\circ$  indicando que se ha mejorado la hidrofobicidad de la superficie de pirita. Para complementar las

observaciones encontradas en los valores de ángulo de contacto y con ello mejorar la recuperación de pirita empleando agua de mar en procesos de flotación, se realizaron experimentos de microflotación para poder medir el porcentaje de recuperación de pirita en las condiciones estudiadas para ángulo de contacto.

### 3.5 MICROFLOTACIÓN

De los datos obtenidos en los experimentos de ángulo de contacto se seleccionaron los correspondientes a los pH de 6, 7 y 11 para los experimentos de microflotación con agua desionizada y los pH de 5, 8 y 11 para el agua de mar. Se mantuvieron fijas las concentraciones de colector Xantato en  $1 \times 10^{-04}$  mol/L y espumante MIBC 14 mg/L.

Los resultados de los experimentos se muestran en la Tabla 3.9 donde se puede ver que cuando se obtiene un mayor ángulo de contacto mayor es el porcentaje de recuperación de pirita.

**Tabla 3.9 Porcentaje de recuperación usando agua desionizada a diferentes pH con una concentración de 14 mg/L de espumante MIBC y  $1 \times 10^{-04}$  mol/L de Xantato.**

<b>Agua Desionizada</b>			
<b>pH</b>	<b>pH 6</b>	<b>pH 7</b>	<b>pH11</b>
(%) Porcentaje de Recuperación	94.75	88.89	76.84
Ángulo de Contacto (grados)	109.36°	107.12°	86.48°

**Tabla 3.10. Porcentaje de recuperación usando agua de mar a diferentes pH con una concentración de 14 mg/L de espumante MIBC y  $1 \times 10^{-04}$  mol/L de Xantato.**

Agua de Mar			
pH	pH 5	pH sin modificación	pH 11
(%)Porcentaje de Recuperación	88.70	81.08	80.02
Ángulo de Contacto (grados)	106.53°	97.64°	76.03°



**Figura 3.17 Flotación de pirita con agua de mar a un pH de 5.**

De las Tablas 3.9 y 3.10 se puede observar que existe una relación directamente proporcional entre el ángulo de contacto y el porcentaje de recuperación de pirita, con estos estudios se soporta la factibilidad del uso de agua de mar en los procesos de recuperación de pirita mediante microflotación. Por otra parte, se observó una baja recuperación a valores altos de pH debido a que en dicha región se presenta depresión de pirita (*Laskowski et al., 2015*).

En la Figura 3.17, Se ilustra la formación de columnas de mineral en la espuma de flotación de la celda Hallimod. Sin embargo a pesar de la alta concentración de mineral recuperado y la formación de aglomerados, esto podría atraer problemas de contaminación por arrastre dentro de la espuma de recuperación ya que en los sistemas industriales no se cuenta con minerales de alta pureza como el que fue utilizado en la celda experimental.

## 4 CONCLUSIONES

- Se caracterizó el agua de mar utilizada en este estudio y se obtuvieron valores de conductividad de 43.3 mS/cm, tensión superficial de 71.4 mN/m, pH de 8.3 y las concentraciones dominantes de sus cationes fueron de Calcio y Magnesio.
- El valor de la conductividad del agua de mar es comparable con la conductividad alcanzada por soluciones salinas de NaCl en un valor cercano al 3 % (w/w), donde se obtuvo una conductividad de 41.6 mS/cm.
- El valor de la tensión superficial del agua de mar es comparable con el valor de tensión superficial de soluciones salinas de NaCl a una concentración del 2 % (w/w).
- En el rango de concentraciones de NaCl estudiado del 1 - 25 %(w/w) se obtuvo que al aumentar la concentración de las soluciones salinas la conductividad aumenta de manera lineal pero la tensión superficial disminuye.
- Se caracterizó la muestra de pirita  $\text{FeS}_2$  empleada en este estudio mediante técnicas de Microscopía Electronica de Barrido y Difracción de Rayos X y ambas técnicas dieron por resultado un alto grado de pureza en la muestra.
- La mojabilidad del agua de mar sobre una superficie de pirita se caracterizó a través de su ángulo de contacto, obteniéndose un valor de  $85.5^\circ$  el cual es un valor alto y cercano a los  $90^\circ$  indicando un comportamiento hidrofóbico de la pirita respecto al agua de mar, lo cual es favorable para una buena recuperación de pirita por flotación.
- Al modificar el pH del agua de mar las mediciones de ángulo de contacto sobre pirita mostraron que el mayor valor en ángulo de contacto fue de  $90.9^\circ$  a un pH de 7 y el menor valor de ángulo de contacto fue de  $60.5^\circ$  a un pH de 11.
- A partir del pH de 7 se logró aumentar un poco más el ángulo de contacto entre el agua de mar y la pirita al agregar colector o espumante. Se obtuvo el mayor ángulo de contacto de  $92.5^\circ$  a una concentración de Xantato XIBS



de 1 mM y para el caso del espumante se obtuvo el mayor ángulo de contacto de 88.2° a la concentración de 14 mg/L de MIBC de manera independiente.

- El efecto combinado de los surfactantes tipo Xantato y espumante aumentó considerablemente el ángulo de contacto entre el agua de mar y la pirita, reduciendo con ello la mojabilidad de la pirita. Para una concentración fija de Xantato XIBS de 0.1 mM y espumante MIBC de 14 mg/L se lograron valores de ángulo de contacto de 102° a un pH de 7 hasta valores de ángulo de contacto de 106.5° a un pH de 5.
- Se realizaron experimentos de microflotación para probar la factibilidad del empleo de agua de mar en la recuperación de pirita. Durante la experimentación empleando una celda Hallimond se pudo observar la formación de cúmulos de pirita en la zona de espumas lo que indica la aparición de fuerzas atractivas entre las partículas de pirita. Entre los efectos negativos de estas fuerzas atractivas se puede mencionar una posible disminución en la calidad del recuperado al arrastrar ganga o contaminantes entre sus intersticios. Entre los efectos positivos es que aumenta el porcentaje de recuperación al formar agregados entre las partículas de pirita.
- El porcentaje máximo de recuperación de pirita alcanzado fue de 88.7 % para una concentración de colector XIBS de 0.1mM y una concentración de espumante MIBC de 14 mg/L, a un pH de 5. Validando que a mayor ángulo de contacto se obtiene una mayor recuperación de pirita. A partir de estos resultados se puede constatar la viabilidad del uso del agua de mar en la industria metalúrgica para la recuperación de pirita.

## **4.1 PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO**

Los experimentos realizados se auxiliaron de colectores tipo Xantato como precursores de la flotación y espumante tipo MIBC como estabilizador de la espuma de flotación, por lo que en futuros trabajos sería muy interesante que se agregara un activador para la pirita que permita aumentar el porcentaje de recuperación.

Otro de los estudios futuros se puede enfocar en la formación de especies químicas sobre la superficie de la pirita en función de los agentes químicos utilizados y el pH.

Un estudio posterior se puede enfocar en el uso de otro tipo de espumante y colector y analizar el efecto de la aplicación de otro tipo de reactivos sobre la mojabilidad y su relación con el porcentaje de recuperación de mineral.

Por último un estudio futuro podría incluir un análisis de carga sobre la superficie del mineral una vez aplicadas las soluciones y analizar el efecto desde la perspectiva de las cargas de atracción y repulsión presentes en el sistema y el efecto sobre la flotación del mineral.

## **4.2 LIMITACIONES ENCONTRADAS DURANTE EL ESTUDIO**

Las variaciones en la temperatura ambiente y humedad generan variaciones en los resultados que podrían ser eliminados si se pudieran haber realizados los experimentos en un cuarto aislado con control de temperatura y humedad.

## ACCIONES DE DIFUSIÓN

Como parte de las acciones de difusión del presente trabajo de investigación, se participó en el 5th Young Water Professionals Conference de la IWA que se realizó en Morelia, Michoacán del 24 al 26 de mayo de 2017 con el tema “Wettability of seawater on a pyrite Surface” en la modalidad de poster.



Se participó además en el XXI Congreso de la División de Dinámica de Fluidos que se realizó en Uxmal, Yucatán en el periodo del 14 al 16 de noviembre de 2016 en la modalidad de ponencia con el tema “MEDICIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO DE SOLUCIONES SALINAS Y AGUA DE MAR SOBRE SUPERFICIE DE PIRITA”.



*División de Dinámica de Fluidos*

Este documento es para certificar que:

**Ludwig Neftali Cruz Sanchez**  
(Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo)

Participó con la conferencia plenaria

**MEDICIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO DE SOLUCIONES SALINAS Y AGUA  
DE MAR SOBRE SUPERFICIE DE PIRITA**

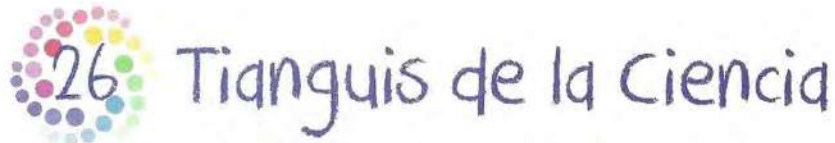
en el XXI Congreso de la División de Dinámica de Fluidos Sociedad Mexicana de Física,  
que se realizó en Uxmal, Yucatán del 14 al 16 de noviembre de 2016

16 de noviembre de 2016  
Uxmal, Yucatán, México



Dr. Abel Lopez Villa  
Presidente DOF-SMF

También se participó en el 26 Tianguis de la Ciencia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo que se realizó en Morelia, Michoacán del - 22 al 23 de abril de 2016 con el tema “La mojabilidad y sus aplicaciones” en la modalidad de exposición lúdica.



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo  
Coordinación de la Investigación Científica  
Departamento de Comunicación de la Ciencia

Otorgan la presente

CONSTANCIA

Ludwig Nefkali Cruz Sanchez

por su participación como

Colaborador del taller "La mojabilidad y sus aplicaciones".

En el XXVI TIANGUIS DE LA CIENCIA  
realizado los días 22 y 23 de abril, en Ciudad Universitaria.  
Morelia, Michoacán 2016



Dr. Raúl Cárdenas Navarro  
Coordinador de la Investigación Científica



## BIBLIOGRAFÍA

ASTM (2003), Standard practice for the preparation of substitute ocean water, Designation D1141-98 (Reapproved 2003).

Bournival V, Pugh V, Ata S. (2012), Examination of NaCl and MIBC as bubble coalescence inhibitor in relation to froth flotation, *Minerals Engineering*, **25**, 47–53.

Castro S., Miranda C., Toledo P., Laskowski J.S. (2013), Effect of frothers on bubble coalescence and foaming in electrolyte solutions and seawater, *International Journal of Mineral Processing*, **124**, 8–14.

Chandra A.P., Gerson A.R. (2009), *Advanced Colloid Interface Science*, Elsevier science & technology books.

Chau, T.T., Bruckard, W.J., Koh, P.T.L, and Nguyen, A.V. (2009) A review of factors that affect contact angle and implications for flotation practice. *Adv Colloid and Interface Sci* **150**, 106-115

Decker E.L., Frank B., Suo Y., Garoff S. (1999), Physics of contact angle measurement, *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **156**, 177–189.

Drelich Jaroslaw (2013), Guidelines to measurements of reproducible contact angles using a sessile-drop technique, *Surface Innovations*, 1-8.

Drelich Jaroslaw, (1997) Static Contact Angle for Liquids at Heterogeneous Rigid Solid Surface, *Polish Journal of Chemistry*, **71**(5), 525-549.

Drelich Jaroslaw, Miller Jan D., Hupka Jan, (1992) The Effect of Drop Size on Contact Angle over a Wide Range of Drop Volumes, *Journal of Colloid and Interface Science*, **155**, 379–385.

Drelich, J. (1997) Static Contact Angle for Liquids at Heterogeneous Rigid Solid Surface. *Polish J. Chem* **71**(5), 525-549.

Eral, H. B., D. J. C. M. 't Mannetje, and J. M. Oh. (2013) Contact Angle Hysteresis: a Review of Fundamentals and Applications. *Colloid Polym Sci* **291**, no. 2, 247–260.

Farrokhrouz Mohsen, Haghi Hamed (2009), The application of Hallimond tube for floatability study of pure galena from Naxhlak mine., *13th Conference on Environment and Mineral Processin.g*.

Fuerstenau, M.C., Jameson, G., Yoon, R.H. Ed. (2007), *Froth Flotation: A Century of innovation*, Society of Mining, Metallurgy and Exploration.

Gourram-Badri F., Conil P., Morizot G. (1996), Measurements of selectivity due to coalescence between two mineralized bubbles and characterization of MIBC action on froth flotation, *Int. J. Miner. Process.* **51** (1997) 197-208.

[1] Israelachvili Jacob N. 2011, 3<sup>th</sup> Edition, Intermolecular and Surface Forces, Elsevier science & technology books, Santa Barbara California, USA.

Koval L. and Matysek, D. (2014) Evaluation of Contact Angle on Pyrite Surface. *J. Polish Mineral Eng Soc.* 119-125.

Kwok D.Y., Lam C.N.C., Li A., Leung A., Wu R., Mok E., Neumann A.W. (1998), Measuring and interpreting contact angles: a complex issue, *A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **142**, 219–235.

Kwok1 D.Y., Neumannu A.W. (1999), Contact angle measurement and contact angle interpretation, *Advances in Colloid and Interface Science*, **81**, 167-249.

Laskowski Janusz, Castro Sergio (2015). Flotation in concentrated electrolyte solutions, *International Journal of Mineral Processing* **144**, 50–55.

Laskowski, J. S., Castro S., Ramos. (2013), Physicochem. Probl. Miner. Process. **50**, 17-29.

Liu Wenying, Moran C.J., Vink Sue (2013), A review of the effect of water quality on flotation, *Minerals Engineering*, **53**, 91–100.

López Valdivieso A., Celedón Cervantes T., Song V, Robledo Cabrera A., Laskowski J.S. (2004), Dextrin as a non-toxic depressant for pyrite in flotation with xanthates as collector, *Minerals Engineering* **17**, 1001–1006.

López Valdivieso A., Ojeda Escamilla C., Songa S., Lázaro Baez I., González Martínez I. (2003), Adsorption of isopropyl xanthate ions onto arsenopyrite and its effect on flotation, *Int. J. Miner. Process.*, **69**, 175– 184.

López Valdivieso A., Reyes Baena Juan Luis (2005 a), Flotación de molibdenita, pirita y calcopirita en mineralas de cobre tipo porfidos, *X Simposuim sobre procesos de minerales*, Chillán, Chile, 1-29.

López Valdivieso A., Sánchez López A.A., Song. S. (2005 b), On the cathodic reaction coupled with the oxidation of xanthates at the pyrite/aqueous solution interface, *International Journal of mineral processing*, Elsevier, **77**, 154-164.

Lukás Koval, Dalibor Matisek (2014), Evaluation of Contact Angle on Pyrite Surface, *Polish Mineral Engineering Society*, 119-125.

Moslemi Hossein, Gharabaghi Mahdi (2017), A review on electrochemical behavior of pyrite in the froth flotation process, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **47** 1–18.

Salager Louis, Raquel Anton (2005), Métodos de medición de la Tensión Interfacial o Superficial, cuaderno FIRP S205-B, Universidad de los Andes, Venezuela.

Vargaftik N.B., Volkov B.N. and Voljak L. D. (1983), International tables of the surface tension of water. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **12(3)**, 817-820.

Wang Bo, Peng Yongjun (2014). The effect of saline water on mineral flotation – A critical review, *Minerals Engineering* **66–68**, 13–24.

Weissenborn Peter K., Pugh Robert J. (1996), Surface Tension of Aqueous Solutions of Electrolytes: Relationship with Ion Hydration, Oxygen Solubility, and Bubble Coalescence, *Journal of Colloid and Interface Science*, **184**, 550–563

Wenyang Liu, C.J. Moran, Sue Vink (2013) A review of the effect of water quality on flotation, *Minerals Engineering* **53**, 91–100.

Wills, B.A., Napier-Munn, T.J., (2006) Mineral processing technology, Elsevier science & technology books.

[2] Recurso Electrónico: Tensión Superficial, (2017) [en línea] Disponibilidad:

<<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/tension/introduccion/introduccion.htm>> Fecha de consulta: 28 Abril 2017.

Recurso Electrónico: Estabilidad de las dispersiones coloidales Teoría DLVO, (2017) [en línea] Disponibilidad:

<<http://www.fcn.unp.edu.ar/sitio/tecnofarma/wp-content/uploads/2011/04/DLVO1.pdf>> Fecha de consulta: 10 Abril 2017.

[3] Recurso Electrónico: Métodos de medición de la tensión superficial o interfacial, (2017) [en línea] Disponibilidad:

<[http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S205\\_MedicionTension.pdf](http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S205_MedicionTension.pdf)> Fecha de consulta: 17 Abril 2017.

[4] Recurso Electrónico: Microscopio electrónico de barrido, (2017) [en línea] Disponibilidad:



<[https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio\\_electr%C3%B3nico\\_de\\_barrido](https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido)>  
Fecha de consulta: 15 Abril 2017.

[5] Recurso Electrónico: Cristalografía de rayos x, (2017) [en línea]  
Disponibilidad:

< [https://es.wikipedia.org/wiki/Cristalograf%C3%ADa\\_de\\_rayos\\_X](https://es.wikipedia.org/wiki/Cristalograf%C3%ADa_de_rayos_X)>  
Fecha de consulta: 15 Abril 2017.