



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ESTUDIO DE POTENCIAL ZETA APLICADO AL  
PROCESO DE FLOTACIÓN DE MINERALES PbS –  
ZnS, COMPARANDO DOS REACTIVOS NATURALES  
(TANINOS QUEBRACHO)**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO  
P R E S E N T A:**

**RAY ROBINSON LUMBRERAS FLORES**



**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## **JURADO ASIGNADO**

- PRESIDENTE:** Profesor: Antonio Huerta Cerdán
- VOCAL:** Profesor: Carlos Rodríguez Rivera
- SECRETARIO:** Profesor: Juan Manuel de la Rosa Canales
- 1er. SUPLENTE:** Profesor: Vianey Torres Mendoza
- 2do. SUPLENTE:** Profesor: Armando Garnica Rodríguez

### **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, FACULTAD DE QUÍMICA  
CONJUNTO D, LABORATORIO 212 DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
METALÚRGICA.

SUSTENTANTE

ASESOR DEL TEMA

---

Ray Robinson Lumbreras Flores

---

M. en C. Antonio Huerta Cerdán



# ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Introducción</b> .....	3
<b>Objetivos</b> .....	5
<b>Hipótesis</b> .....	5
<b>1. Bases Teóricas</b> .....	6
1.1 Potencial Zeta .....	6
1.1.1 La Electroquinética y el Comportamiento de los Coloides .....	7
1.1.2 La Doble Capa .....	8
1.1.3 El Potencial Zeta .....	11
1.1.4 El Balance de Repulsión y Atracción .....	12
1.1.5 Fenómenos Electrocinéticos y Medición del Potencial Zeta .....	14
1.2 Flotación .....	16
1.2.1 Química de Superficies .....	16
1.2.1.1 Tensión Superficial .....	17
1.2.1.1.1 Concentración Micelar Crítica .....	18
1.2.1.1.2 Adsorción .....	22
1.2.1.1.3 Termodinámica de la Flotación .....	23
1.2.1.1.4 Interacción Colector-Espumante .....	27
1.2.2 Variables en el Proceso de Flotación .....	28
1.2.2.1 Granulometría de la Mena .....	29
1.2.2.2 Dosificación de los Reactivos .....	30
1.2.2.3 Porcentaje de Sólidos en Pulpa .....	31



1.2.2.4 Tiempo de Residencia .....	31
1.2.2.5 pH.....	31
1.2.2.6 Aireación y Acondicionamiento de la Pulpa.....	32
1.2.2.7 Calidad de Agua .....	32
1.2.3 Reactivos de Flotación .....	33
1.2.3.1 Colectores .....	33
1.2.3.1.1 Tio-Compuestos .....	35
1.2.3.1.2 Compuestos Ionizables No-Tio.....	36
1.2.3.2 Modificadores.....	38
1.2.3.2.1 Depresor .....	38
1.2.3.2.1.1 Cianuro de Sodio .....	38
1.2.3.2.1.1.1 Riesgos.....	39
1.2.3.2.1.2 Quebracho .....	40
1.2.3.2.2 Activador .....	43
1.2.3.2.2.1 $CuSO_4$ .....	44
1.2.3.2.3 Reguladores de pH.....	44
1.2.4 Teorías de Flotación de Sulfuros.....	45
1.2.4.1 Teoría Química o de la Oxidación Superficial .....	45
1.2.4.2 Teoría de Semiconductores .....	46
1.2.4.3 Teoría Electroquímica.....	47
<b>2. Desarrollo Experimental .....</b>	<b>49</b>
2.1 Pruebas de Potencial Zeta .....	50
2.1.1 Pulverización y Cribado .....	50
2.1.2 Espectroscopía de Absorción Atómica.....	51
2.1.3 Tensión Superficial y Concentración Micelar Crítica .....	52
2.1.4 Estudios de Potencial Zeta.....	53
2.2 Pruebas de Flotación Selectiva.....	56
2.2.1 Menagrafía .....	56



2.2.2	Análisis Granulométrico y Tamaño de Liberación .....	57
2.2.3	Molienda .....	58
2.2.4	Cribado .....	59
2.2.5	Flotación Selectiva.....	59
<b>3.</b>	<b>Análisis de Resultados .....</b>	<b>62</b>
3.1	Menagrafía .....	62
3.2	Análisis Químico del Mineral .....	63
3.3	Concentración Micelar Crítica .....	64
3.4	Potencial Zeta .....	67
3.5	Flotación .....	84
<b>4.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>92</b>
<b>5.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>94</b>
<b>6.</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>98</b>
6.1	Balance Metalúrgico .....	98



## RESUMEN

En México y en gran parte del mundo, se utilizan reactivos depresores del tipo  $CN^-$  durante el proceso de flotación selectiva de menas complejas de  $Pb-Zn$ , el cual es difícil su manejo debido a su toxicidad.

Al respecto, los procesos de flotación selectiva requieren de reactivos depresores que coadyuven a la depresión selectiva, empleando entonces reactivos que no contaminen la naturaleza. El *quebracho* es un reactivo que funge como depresor durante el proceso de flotación selectiva, el cual tiene como ventajas ser amigable con el medio ambiente, tener una selectividad en niveles razonables de pH y alta capacidad de adsorción en la superficie de los minerales.

El siguiente trabajo compara dos reactivos depresores el *Schinopsis lorentzii* ( $T_5$ ) y *Schinopsis balansae* ( $M_3$ ), a través del empleo de la técnica de potencial zeta y flotaciones selectivas para obtener el reactivo que presenta los mayores valores de recuperación y ley.

Los resultados obtenidos de las pruebas de potencial zeta en el sistema  $ZnS-XEK-M_3$  [20 mg/L] y  $PbS-XEK-M_3$  [20 mg/L] muestran que la mayor diferencia de potencial (36.1 mV) entre la esfalerita y la galena se obtiene a pH 11. Mientras que en el sistema  $ZnS-XEK-T_5$  [20 mg/L] y  $PbS-XEK-T_5$  [20 mg/L] la mayor diferencia de potencial entre ambos minerales se encuentra a pH 9 (18.8 mV). La mayor diferencia de potencial se obtiene con el reactivo *Schinopsis balansae* ( $M_3$ ), por lo que este reactivo depresor muestra una mayor selectividad durante el circuito de flotación primaria de plomo.





Las pruebas de potencial zeta para obtener la máxima estabilidad de la partícula de ZnS en los sistemas *ZnS-XEK-M<sub>3</sub>* [20 mg/L] comparado con el sistema *ZnS-XEK-T<sub>5</sub>* [20 mg/L] muestran que, la mayor diferencia de potencial respecto al punto de carga cero es mayor con el depresor *Schinopsis balansae* (*M<sub>3</sub>*) a pH 8 (76.8 mV), comparado con la mayor diferencia de potencial con respecto al punto de carga cero obtenida con el depresor *Schinopsis lorentzii* (*T<sub>5</sub>*) a pH 10 (56 mV). Por lo tanto, el depresor *Schinopsis balansae* (*M<sub>3</sub>*) muestra una mayor flotabilidad de la partícula de ZnS durante el circuito de flotación primaria de zinc.

Las pruebas de flotación selectiva mostraron que el reactivo depresor *Schinopsis balansae* (*M<sub>3</sub>*) obtuvo una mayor ley y recuperación en los respectivos concentrados de *PbS* y de *ZnS* que los obtenidos con el reactivo depresor *Schinopsis lorentzii* (*T<sub>5</sub>*). Estos resultados son consistentes con las lecturas obtenidas por potencial zeta.





## INTRODUCCIÓN

México está situado dentro de los primeros lugares en la actividad minero-metalúrgica, tan sólo en el 2013 representó el quinto lugar en el sector productivo del país. La aportación de este tipo de industria derramó 15 mil 626 millones de dólares que representa el 2.9% del PIB nacional. La participación de México en la producción minera mundial en 2013 obtuvo el primer lugar en la extracción de plata (5 mil 821 toneladas), quinto lugar en la producción de plomo (253 mil 361 toneladas), sexto lugar en la producción de zinc (642 mil 542 toneladas), octavo lugar en la producción de oro (119.8 toneladas) y décimo lugar en la producción de cobre (480 mil 124 toneladas). [21]

En la tecnología del procesamiento de minerales, el proceso de flotación continúa siendo un tema de estudio con interesantes avances para lograr su optimización, sobre todo al considerar el cuidado del medio ambiente. En la actualidad se emplea en las menas complejas de *Pb-Zn*, *Cu-Zn* reactivos depresores del tipo cal, sulfitos y cianuro, siendo estos no muy favorables por su toxicidad y su difícil manejo; al respecto, se desea que los procesos de flotación selectiva requieran de reactivos depresores que coadyuven a la depresión selectiva y que empleen reactivos que no contaminen la naturaleza.

Los quebrachos presentan ventajas adicionales por ser no tóxicos además de ser efectivos en niveles razonables de pH para la satisfactoria selectividad, en comparación a cal y cianuro; también, cumplen con la necesidad de evitar impactos ambientales negativos. (Referente al uso de *quebrachos* como depresores de minerales existen aún pocas publicaciones) Por lo anterior, es importante realizar estudios de los diferentes tipos de taninos con el objeto de conocer el tipo de adsorción





obtenido en cada mineral, así como la mejora en la eficiencia de los procesos de flotación en específico de la selectividad galena-esfalerita.





## OBJETIVOS

- Obtener los efectos de la concentración de dos tipos de quebracho y pH, en minerales de  $PbS$  y  $ZnS$  a través de mediciones de Potencial Zeta.
- Obtener los efectos de concentración de quebracho y pH bajo los cuales un mineral complejo de sulfuro de plomo y zinc pueda flotar o ser deprimido a través de pruebas de flotación.

## HIPÓTESIS

La caracterización vía potencial zeta aplicada al proceso de flotación de dos tipos de quebrachos depresores, proporcionará no tan sólo el conocimiento del tipo de adsorción de estos reactivos, sino que conducirá al incremento de la eficiencia de depresión de  $Zn$ , en la flotación de menas sulfuradas de  $Pb-Zn$ .



# 1. BASES TEÓRICAS

## 1.1 Potencial Zeta

El potencial zeta es una medida del potencial necesario para poder penetrar la capa iónica que se encuentra alrededor de una partícula, con la finalidad de desestabilizarla. <sup>[1]</sup> El potencial zeta se considera como un potencial electrostático que hay entre las capas que se encuentran situadas en torno a la partícula, es decir, es la medida de la magnitud de la repulsión o atracción entre las partículas. Su medida proporciona una idea detallada de los mecanismos de dispersión y es la clave del control de dispersión electrostático. <sup>[2]</sup>

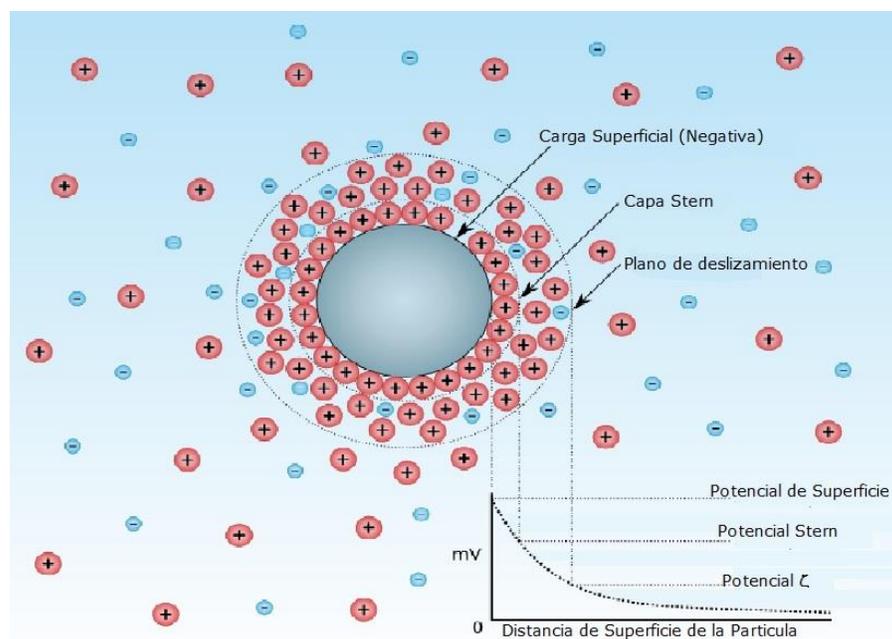


Figura 1. Diagrama de la concentración iónica y la diferencia de potencial en función de la distancia desde la superficie de carga de una partícula suspendida en un medio de dispersión. <sup>[3]</sup>





### 1.1.1 La Electroquinética y el Comportamiento de los Coloides

Los coloides están en todas partes y la medición del potencial zeta puede ser utilizado para su conocimiento y control, entre ellos pueden incluirse complejos sistemas biológicos como la sangre o sistemas funcionales como las pinturas. Los sistemas coloidales pueden ser tan espesos como una pasta o un concentrado mineral; o tan diluidos como las que enturbian las aguas de los lagos. El agua, la leche, el vino, el barro, las tinturas, la tinta, el papel y reactivos colectores de flotación son buenos ejemplos de sistemas coloidales.

Las suspensiones coloidales son comúnmente acuosas, aunque también pueden ser utilizadas suspensiones no acuosas. En cada caso las propiedades físicas y cualidades de las suspensiones están fuertemente afectadas por las propiedades de los coloides. Podremos cambiar las características de una suspensión al comprender las interacciones de un coloide individual con otro. En ocasiones buscamos maximizar las fuerzas repulsivas entre ellos, para así producir suspensiones estables. Las repulsiones mutuas entre partículas adyacentes impiden la unión de grandes y rápidas sedimentaciones de aglomerados. En los tratamientos de purificación de agua se debe, por el contrario, minimizar las fuerzas de repulsión entre las partículas que las enturbian, para que así se formen grandes aglomerados que sedimenten y filtren fácilmente.

Por su tamaño microscópico, las fuerzas de unión en la superficie del coloide y el líquido son las que determinan su comportamiento. Uno de los mayores efectos de la superficie son los fenómenos electrocinéticos. Cada coloide contiene una carga eléctrica que suele



ser de naturaleza negativa, aunque también puede ser positiva. Estas cargas producen fuerzas de repulsión electrostática entre los coloides vecinos. Si la carga es suficientemente elevada los coloides permanecen discretos, dispersos y en suspensión. Reduciendo o eliminando estas cargas se obtiene el efecto opuesto y los coloides se aglomeran y sedimentan fuera de la suspensión. [4]

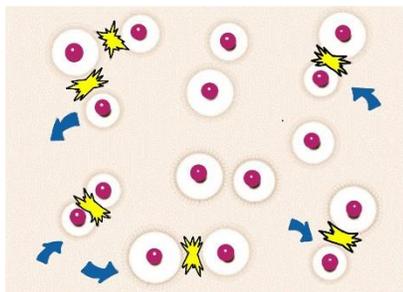


Figura 1.1 Las partículas con carga se repelen entre sí.

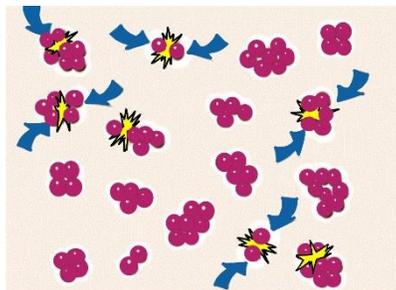


Figura 1.2 Las partículas coloidales que carecen de carga son libres para colisionar y aglomerarse.

### 1.1.2 La Doble Capa

Se usa el modelo de la doble capa para visualizar la atmósfera iónica en la proximidad del coloide cargado y para explicar cómo actúan las fuerzas eléctricas de repulsión. Es posible entender este modelo como una secuencia de etapas que ocurren alrededor de un solo coloide negativo, si los iones que neutralizan sus cargas son repentinamente sacados.

Veamos primero el efecto del coloide sobre el ion positivo (llamado contra-ion) en la solución. Inicialmente, la atracción del coloide negativo hace que algunos iones positivos formen una rígida capa



adyacente alrededor de la superficie del coloide; esta capa de contra-iones es conocida como la capa de Stern.

Otros iones positivos adicionales son todavía atraídos por el coloide negativo, pero estos son ahora rechazados por la capa de Stern, así como por otros iones positivos que intentan acercarse al coloide. Este equilibrio dinámico resulta en la formación de una capa difusa de contra-iones. Los contra-iones tienen una alta concentración cerca de la superficie, la cual disminuye gradualmente con la distancia, hasta que se logra un equilibrio con la concentración de los contra-iones en el seno de la disolución.

La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al coloide.

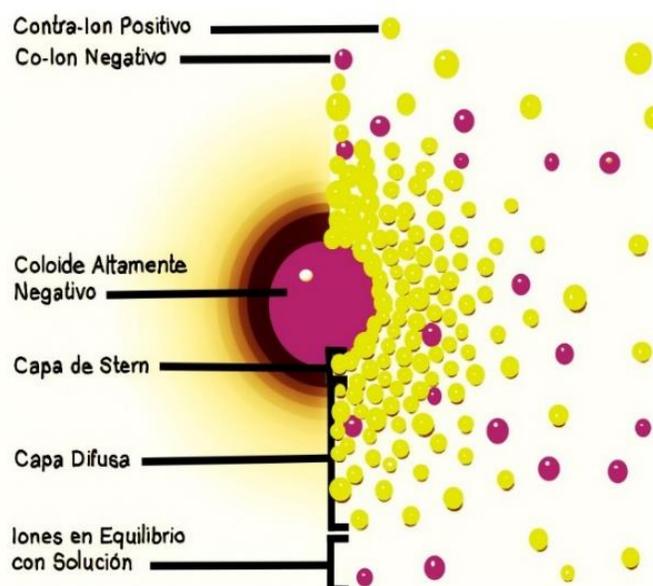


Figura 1.3 La zona izquierda muestra el gradiente de la densidad de carga alrededor de la partícula coloidal. La zona derecha muestra la distribución de iones positivos y negativos alrededor de la partícula coloidal cargada.

En forma similar, aunque opuesta, en la capa difusa hay un déficit de iones negativos, llamados co-iones pues tienen la misma carga



que el coloide. Su concentración se incrementa gradualmente al alejarse del coloide, mientras que las fuerzas repulsivas del coloide son compensadas por los iones positivos, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio. La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al coloide. A cualquier distancia de la superficie, la densidad de carga es igual a la diferencia de concentración entre iones positivos y negativos. La densidad de carga es mucho mayor cerca del coloide y gradualmente disminuye a cero cuando las concentraciones de iones positivos y negativos se asemejan.

Los contra-iones de la capa de Stern y de la capa difusa son los que juntos llamaremos la doble capa. El espesor de esta doble capa depende del tipo y concentración de los iones de la solución.

El coloide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución. [4]

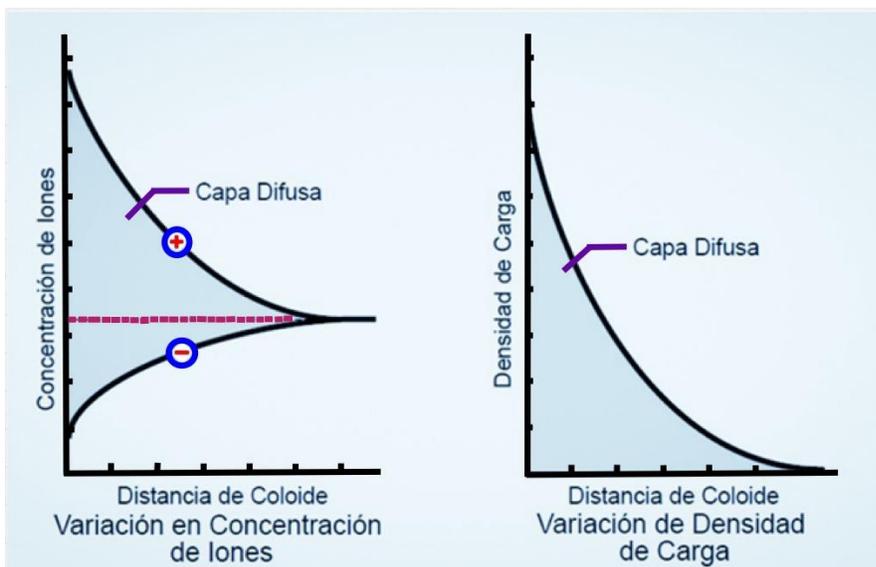


Figura 1.4 La figura izquierda muestra la variación en la concentración de iones positivos y negativos en función de la distancia de un coloide con carga negativa en la capa difusa. La figura derecha muestra el efecto total; de la diferencia en la densidad de carga positiva y negativa en la capa difusa. [4]



### 1.1.3 El Potencial Zeta

El coloide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución. Este tiene un valor máximo en la superficie y disminuye gradualmente con la distancia, aproximándose a cero fuera de la capa difusa. La caída del potencial y la distancia desde el coloide es un indicador de la fuerza repulsiva entre los coloides en función de la distancia a las cuales estas fuerzas entran en juego.

Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la de Stern. Este potencial es conocido como el potencial zeta, el cual es importante porque puede ser medido de una manera muy simple, mientras que la carga de la superficie y su potencial no pueden medirse. A través del conocimiento del potencial zeta se puede tener una manera efectiva de controlar el comportamiento del coloide puesto que indica cambios en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión entre los coloides. La teoría DLVO (llamada así por Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek) explica la tendencia de los coloides a aglomerarse o permanecer separados.

[4]

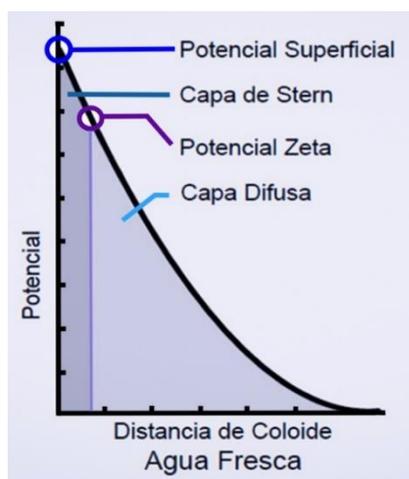


Figura 1.5 La relación entre potencial zeta y potencial superficial depende del nivel de iones en la solución. En agua, la gran doble capa hace que el potencial zeta sea una buena aproximación del potencial superficial. [4]





#### 1.1.4 El Balance de Repulsión y Atracción

La teoría DLVO es la clásica explicación de los coloides en suspensión. Ésta se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y atracción tipo van der Waals y explica por qué algunos coloides se aglomeran mientras que otros no lo hacen.

La repulsión electrostática llega a ser importante cuando los coloides se aproximan y la doble capa comienza a interferir. Se requiere energía para sobrepasar esta repulsión y forzar la unión entre las partículas. Esta energía aumenta fuertemente cuando las partículas se acercan. Se usa una curva de repulsión electrostática para indicar la cantidad de energía que hay que vencer para que las partículas puedan ser forzadas a juntarse. Esta energía llega a un valor máximo cuando las partículas están casi juntas y disminuye a cero fuera de la doble capa. Su valor máximo está relacionado con el potencial de la superficie.

La atracción de van der Waals entre los coloides es ciertamente el resultado de las fuerzas entre las moléculas individuales de cada coloide. El efecto es aditivo; o sea, una molécula del primer coloide experimenta la atracción de van der Waals de cada molécula del segundo coloide. Esto se repite para cada molécula del primer coloide y la fuerza total corresponde a la suma de todas ellas. Se usa una curva de energía de atracción para indicar la variación en las fuerzas de van der Waals con la distribución entre las partículas.

La teoría DLVO explica la tendencia de los coloides a aglomerarse o permanecer separados al combinar la atracción de van der Waals y



la curva de repulsión electrostática: la curva combinada es llamada la energía neta de interacción. A cada distancia el pequeño valor se resta del mayor valor para dar la energía neta. El valor neto se representa entonces arriba si es repulsivo o abajo si es atractivo, y así se forma la curva. La curva de interacción neta cambia siempre de atracción a repulsión y nuevamente a atracción. Si existe una zona repulsiva, entonces el punto de máxima energía de repulsión se llama la barrera de energía. La altura de esta barrera indica la estabilidad en el sistema. Para aglomerar dos partículas que van a chocar estas deben tener suficiente energía cinética debido a su velocidad y masa, como para pasar sobre dicha barrera. Si la barrera desaparece, entonces la interacción neta es totalmente atractiva y consecuentemente las partículas se aglomeran. Esta región interna es referida como la trampa de energía, pues los coloides pueden considerarse como sistemas unidos por fuerzas de van der Waals.

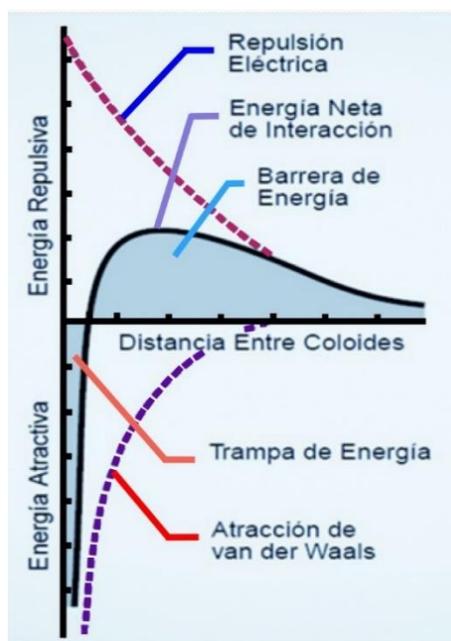


Figura 1.6 Energía total en las curvas de interacción, obtenido por la suma de la curva de atracción con dos curvas de repulsión. [4]





Dependiendo de nuestros propósitos es posible alterar el entorno del coloide para aumentar o disminuir la barrera energética. Varios métodos pueden ser usados para este propósito, tales como cambios en la atmósfera iónica, el pH o agregando compuestos activos para afectar directamente la carga del coloide. En cada caso la medida del potencial zeta indicará el efecto de la alteración, principalmente en su estabilidad. [4]

### **1.1.5 Fenómenos Electrocinéticos y Medición del Potencial Zeta**

La electroforesis se utiliza para estimar el Potencial Zeta de las partículas, mientras que la transmisión de potencial / corriente se utiliza para cuerpos porosos y superficies planas. En la práctica, el potencial zeta de las suspensiones se mide mediante la aplicación de un campo eléctrico en el sistema. Las partículas dentro de la suspensión migrarán hacia el electrodo de carga opuesta con una velocidad proporcional a la magnitud del Potencial Zeta.

Una de las técnicas más comunes para medir el potencial zeta es la técnica de micro electroforesis. Usualmente se utiliza un microscopio de alta calidad para observar cómodamente las partículas que se encuentran dentro de una cámara llamada celda electroforética. Dos electrodos colocados en los extremos de la cámara se conectan a una fuente de potencia, creándose un campo eléctrico que cruza la celda. Las partículas cargadas migran en el campo y su movimiento y dirección están relacionados con su potencial zeta.



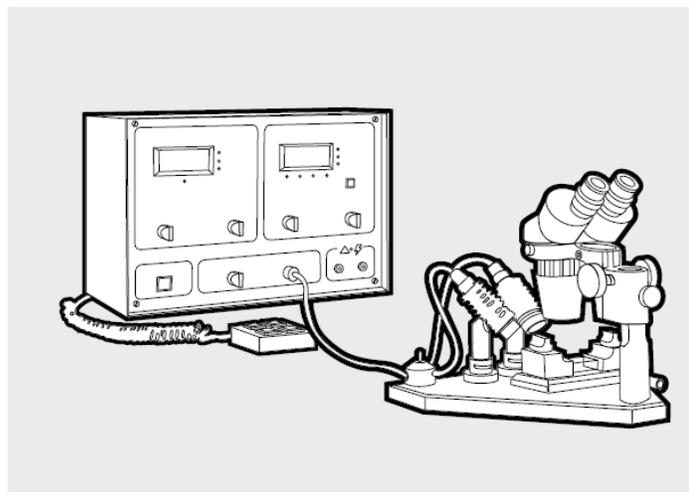


Figura 1.7 Equipo Zeta-Meter 3.0+

Los instrumentos en realidad miden la movilidad electroforética de las partículas, la cual se expresa como micrones/segundo por voltios/centímetro. El primer término, micrones por segundo, representa simplemente la velocidad, mientras que el segundo, voltios por centímetro, es una expresión de la fuerza eléctrica del campo. Se utilizan los valores de potencial zeta debido a que éste expresa el verdadero fenómeno involucrado y no el efecto físico del potencial, el cual es la movilidad. [5]

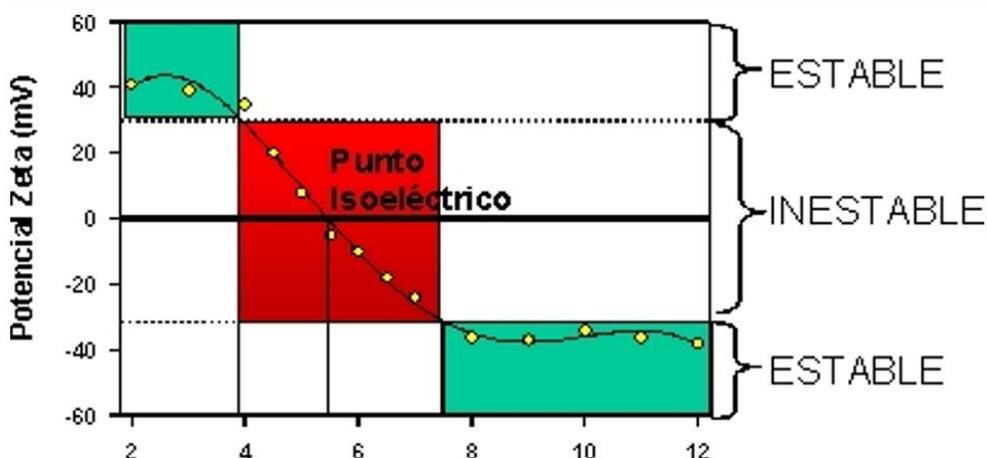


Figura 1.8 Regiones de estabilidad en un diagrama de Potencial Zeta contra pH. La zona inestable se encuentra entre la zona de  $\pm 20$  mV, lo que produce una aglomeración y depresión de las partículas. Después de la zona de  $\pm 20$  mV, se llega a una zona de estabilidad donde las partículas se repelen en forma homogénea en la solución por lo que las partículas flotan. [6]





## 1.2 Flotación

La flotación de minerales es una técnica de concentración en húmedo, en la que se aprovechan las propiedades físico-químicas superficiales de las partículas para efectuar la selección o separación. En otras palabras, se trata de un proceso de separación de materias de distinto origen que se efectúa desde sus pulpas acuosas por medio de burbujas de gas (aire) y a base de sus propiedades hidrófilicas e hidrofóbicas. [8]

### 1.2.1 Química de Superficies

La química de superficies es una rama especial de la fisicoquímica; entre dos fases existe necesariamente una especie de abrupto cambio en la naturaleza de las fuerzas intermoleculares y este hecho da lugar a la aparición de cierto número de fenómenos que no tienen contrapartida en los sistemas homogéneos. Los principales entre estos son la adsorción, la orientación molecular en las monocapas y la formación de las dobles capas eléctricas; otros fenómenos de la química de superficies se consideran más bien como efectos secundarios.

Sin embargo, los fenómenos de superficies son rara vez importantes, a menos que el sistema tenga relativamente una gran área interfacial por unidad de masa. En consecuencia, los efectos superficiales se aprecian en general de formas más clara en conexión con películas muy delgadas, sólidos de muy alta porosidad o, finalmente, en las dispersiones de una fase en el seno de otra. Este último aspecto incluye especialmente a los coloides. [9]





### 1.2.1.1 Tensión Superficial

En toda porción de materia existen fuerzas intermoleculares que en cierta forma mantienen unidas las moléculas que la componen. Si se considera una molécula ubicada en el seno de un líquido, ésta estará rodeada de moléculas de su misma naturaleza, por lo cual las fuerzas de atracción intermoleculares se compensan produciéndose un equilibrio energético. Es decir, las moléculas superficiales tienen una mayor energía que aquellas ubicadas en el seno del líquido. La magnitud del desbalance de energía que se produce depende de la naturaleza de las interacciones moleculares. A este exceso de energía se denomina energía libre superficial. Por lo tanto, aumentar el área superficial de una cierta masa de líquido significa, entregar energía al sistema en forma de trabajo. Así, la expresión de la tensión superficial será la siguiente:

$$\gamma = \left( \frac{\partial G}{\partial A} \right)_{p,T,n}$$

$$\gamma = G^s$$

Donde:

$\gamma$  = Tensión Superficial (N/m)

$G^s$  = Energía Libre Superficial (N)

$A$  = Área Interfacial (m<sup>2</sup>)

$p, T, n$  = Presión, temperatura absoluta y moles presentes en el sistema.

En consecuencia, la tensión superficial es la medida del trabajo requerido para aumentar la superficie en una unidad de área, a presión, temperatura y masa constantes.





La magnitud de la tensión superficial está directamente relacionada con la magnitud de las fuerzas intermoleculares. Por lo tanto, si se conoce la naturaleza química del líquido, es posible estimar el orden de magnitud de su tensión superficial.

Las interacciones moleculares y enlaces químicos más frecuentes, en orden creciente de su unión, son:

- Fuerzas de London, fuerzas de Van der Waals o fuerzas de dispersión.
- Interacciones dipolo-dipolo inducido.
- Interacciones dipolo-dipolo.
- Enlace de hidrógeno.
- Enlace iónico.
- Enlace covalente.
- Enlace metálico.

Las fuerzas de dispersión son fuerzas atractivas débiles existentes en toda materia, independiente de su naturaleza química y tienen su origen en los llamados dipolos inducidos. <sup>[10]</sup>

#### **1.2.1.1.1 Concentración Micelar Crítica**

Ciertas moléculas pueden tener dos componentes distintos, que difieren en su afinidad hacia los solutos. La parte de la molécula que tiene una afinidad para los solutos polares, tales como el agua, se dice que es la zona hidrofílica. La parte de la molécula que tiene una afinidad para solutos no polares, tales como hidrocarburos, se dice que es la zona hidrófoba.



Las moléculas que contienen ambos tipos de componentes se dice que son anfifílico.

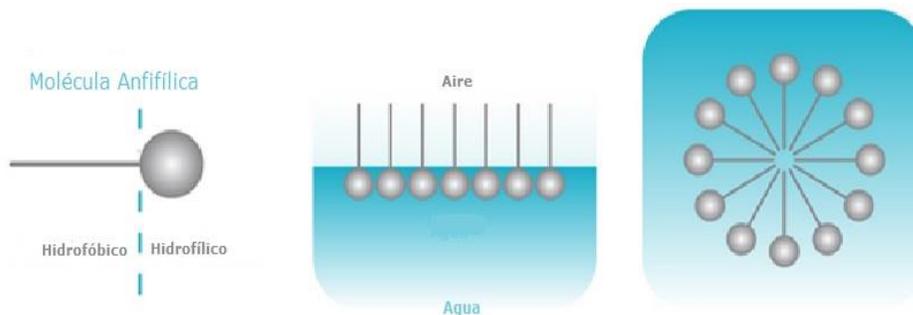


Figura 1.9 Zonas en la molécula hidrofóbicas e hidrófilicas y el comportamiento que tiene la molécula en el agua y aire. [11]

Estas moléculas presentan un comportamiento distinto en la interacción con el agua. La parte polar de la molécula busca interactuar con agua mientras que la parte no polar huye de interacción con el agua. Hay dos formas en las que dicha molécula puede lograr estos dos estados. Una molécula anfifilica puede organizar en sí en la superficie del agua de tal manera que la parte polar interactúa con el agua y la parte no polar se sitúa por encima de la superficie (ya sea en el aire o en un líquido no polar). La presencia de estas moléculas en la superficie interrumpe la energía de cohesión en la superficie y por lo tanto disminuye la tensión superficial. Estas moléculas se denominan moléculas de "superficie activa" o surfactantes.

Otra disposición de estas moléculas puede permitir que cada componente interactúe con su entorno favorablemente. Las moléculas pueden formar aglomerados en los que las partes hidrófobas están orientados dentro de la agrupación y las



porciones hidrófilas están expuestas al disolvente. Tales agregados se denominan micelas.

La proporción de moléculas presentes en la superficie o como micelas en la mayor parte del líquido depende de la concentración del compuesto anfifílico. A bajas concentraciones de agentes tensioactivos favorecerán disposición en la superficie. A medida que la superficie se llena de más moléculas de surfactante se encargará en micelas. En cierta concentración de la superficie se vuelve completamente cargado con surfactante y las adiciones posteriores deben arreglar como micelas. Esta concentración se conoce como la concentración micelar crítica (CMC). De ello se deduce que la medición de la tensión superficial puede ser utilizada para encontrar CMC. [11]

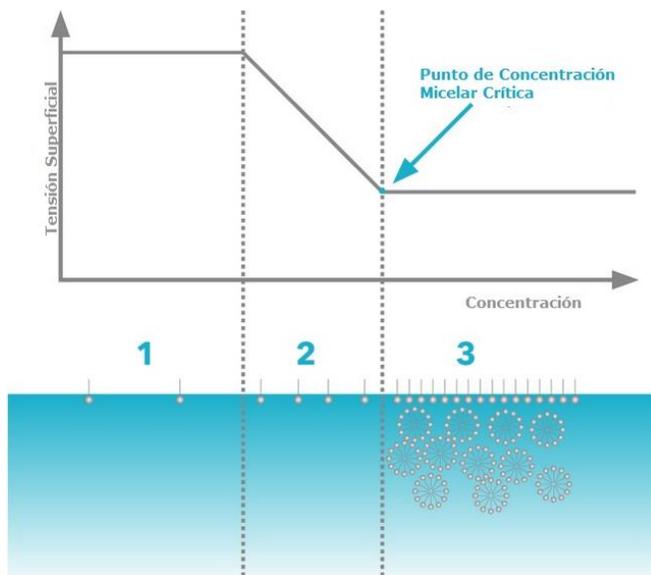


Figura 1.10 Gráfico de la tensión superficial en función del logaritmo de la concentración, donde se observan las siguientes fases:

- 1) En concentraciones muy bajas de tensoactivo se detecta sólo un ligero cambio en la tensión superficial.
- 2) Al aumentar la concentración de tensoactivo disminuye la tensión superficial.
- 3) La superficie se ha cargado completamente, no se tolera más cambio en la tensión superficial. [11]



La medición de la tensión superficial es simple y directa. Si se produce un gráfico de tensión superficial frente a la concentración, la CMC se encuentra como el punto en el que se cruzan dos líneas, la línea de base de la tensión superficial mínima y la pendiente donde la tensión superficial muestra disminución lineal.

Para tensoactivos iónicos el método más sencillo y accesible es medir la conductividad molar en función de la concentración de tensoactivo, ya que depende directamente de la concentración de la disolución e inversamente de la concentración de electrolito. Por debajo de la concentración micelar crítica aumenta la conductividad, al aumentar la concentración de monómero de tensoactivo y su contra-ión.

Por encima las adiciones sucesivas producen un aumento de la concentración de micelas, con menor conductividad iónica y con contra-iones adsorbidos. [12]

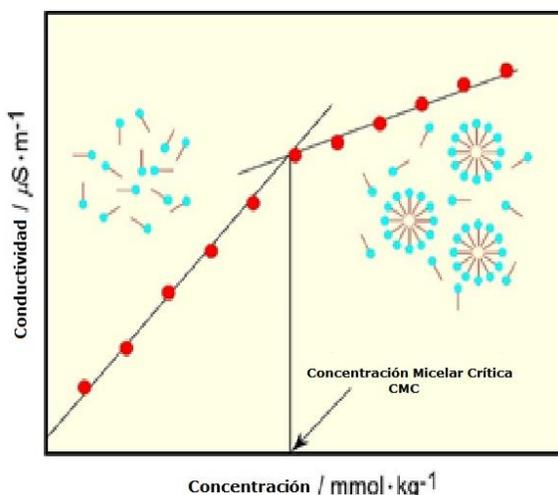


Figura 1.11 Determinación grafica de la concentración micelar crítica. [12]





### 1.2.1.2 Adsorción

La flotación es un proceso que involucra el estudio de las propiedades de las interfases. Una de las formas de caracterizar una interfase es por la medida de la adsorción.

La adsorción puede definirse como la concentración de una entidad química (iones y moléculas) en una interfase. Generalmente se expresa en moles o moléculas de adsorbido por área de interfase. Es un fenómeno espontáneo y exotérmico. Es común la clasificación de la adsorción, con base en la naturaleza de la interacción adsorbido/adsorbente, en adsorción física (fisisorción) y adsorción química (quimisorción).

La adsorción física es resultante de interacciones químicas secundarias o residuales (tipo Van der Waals), caracterizándose por un bajo calor de interacción, ninguna o casi ninguna acción de selección entre el adsorbente y el adsorbido, siendo posible la formación de multicapas. La adsorción química se debe a interacciones químicas primarias (por ejemplo, covalentes) entre el adsorbente y el adsorbido. Existe selectividad, formándose compuestos de superficie. Apenas una camada puede ser adsorbida.

La adsorción puede caracterizarse en relación a la especificidad entre el adsorbido y el adsorbente. Adsorción no específica ocurre en respuesta a la atracción puramente electrostática. Es rápida y rápidamente reversible, no pudiendo revertir el signo de la carga original del adsorbente. En la adsorción específica, la contribución electrostática puede ser irrelevante y especies adsorbidas específicamente pueden aumentar, reducir, anular o





revertir la carga original del adsorbente. Es relativamente lenta e irreversible.

Varios factores pueden contribuir al proceso de adsorción, tales como, atracción electrostática, enlace covalente, enlace puente hidrógeno, interacciones no polares entre el adsorbato y especies interfaciales, interacciones laterales entre las especies adsorbidas. [10]

### **1.2.1.3 Termodinámica de la Flotación**

Para que en la práctica ocurra la adhesión entre una burbuja y una partícula mineral, deben cumplirse condiciones termodinámicas a la vez que hidrodinámicas.

En primer lugar debe ocurrir un encuentro físico entre la partícula y la burbuja (colisión). Para que dicha colisión sea exitosa se requiere que durante el corto tiempo que dura la colisión, tenga lugar el adelgazamiento y ruptura del film de líquido que los separa y se forme una nueva interfase mineral/aire. Tanto la espontaneidad con que ocurra esta etapa, así como, la estabilidad en el tiempo de esta adhesión, dependen de la hidrofobicidad del mineral.

Durante la adhesión hay un efecto cinético importante. Hay un tiempo mínimo necesario para que ocurra una adhesión estable, llamado tiempo de inducción. Lógicamente, en la flotación se requiere que el tiempo de inducción sea menor que el tiempo de duración de la colisión. Durante este corto lapso de tiempo debe





ocurrir el reemplazo de la interfase mineral/solución por la interfase mineral/gas, lo cual involucra vencer ciertas fuerzas de oposición que surgen de la energía superficial del agua dispersa en un film muy delgado que a su vez es función de la afinidad con la superficie mineral. La flotación es básicamente la adhesión de una partícula mineral parcialmente hidrofóbica a una burbuja de gas. La propiedad que gobierna la hidrofobicidad es la tensión superficial.

La flotación ocurre cuando el balance de las tensiones superficiales en el sistema trifásico mineral/gas/líquido (generalmente agua) son favorables. Termodinámicamente, está dado por la expresión que define el cambio de energía libre superficial para la adhesión partícula/burbuja en medio acuoso:

$$\Delta G^S_{adh} = \gamma SG - \gamma SL - \gamma LG$$

Donde:

$\Delta G^S_{adh}$  = Variación de energía libre superficial durante la adhesión partícula mineral/burbuja (N/m).

$\gamma SG$  = Tensión interfacial para la interfases sólido/gas (N/m).

$\gamma SL$  = Tensión interfacial para la interfases sólido/líquido (N/m).

$\gamma LG$  = Tensión interfacial para la interfases líquido/gas (N/m).

Para el análisis de la espontaneidad de la adhesión y ante la falta de técnicas adecuadas para medir experimentalmente las tensiones interfaciales sólido/gas y sólido/líquido, se recurre a la ecuación de Young. Esto último define un parámetro medible





vinculado a la hidrofobicidad, que es el ángulo de contacto  $\theta$ , en función de las tensiones interfaciales.

En el año 1805 Thomas Young propuso tratar el ángulo de contacto de una gota de líquido colocada sobre una superficie sólida plana, como un equilibrio mecánico de las tensiones interfaciales sólido/líquido, sólido/gas y líquido/gas.

$$\gamma_{LG} \cdot \cos\theta = \gamma_{SG} - \gamma_{SL}$$

De ahí que:

$$\Delta G^s_{adh} = \gamma_{LG}(\cos\theta - 1)$$

Así, para  $\theta = 0^\circ$ ,  $\Delta G^s_{adh} = 0$ , y en consecuencia, para valores de  $\theta > 0^\circ$ ,  $\Delta G^s_{adh} \leq 0$ .

De acuerdo a lo anterior, minerales cuyo ángulo de contacto sea cero han sido definidos como hidrofílicos y termodinámicamente no flotables. Lo contrario es aplicable a minerales que presentan un ángulo de contacto  $\theta > 0^\circ$ .

Se puede señalar que, cuando un líquido moja completamente a un sólido, el ángulo de contacto será igual a cero, mientras que, un valor del ángulo de contacto mayor que cero indica





mojabilidad y por lo tanto, cierto grado de hidrofobicidad. La mayoría de los minerales presentan características hidrofílicas, por lo cual, para flotar requieren de un reactivo colector que previamente le confiera hidrofobicidad.

Finalmente, debe dejarse claro, que el ángulo de contacto es una condición termodinámica o de equilibrio del sistema. Para que en flotación se establezca un ángulo de contacto entre el mineral y la burbuja de gas, se deben producir los siguientes fenómenos:

- Aproximación de la burbuja de gas al sólido. Proceso que está gobernado por la hidrodinámica de la celda de flotación (agitación, geometría de la celda, tamaño de partícula, etc.).
- Adelgazamiento del film de agua que rodea la partícula.
- Ruptura del film y desplazamiento del agua.
- Establecimiento del ángulo de contacto.

Así, el análisis termodinámico sólo es válido si se cumplen las etapas anteriores y, por lo tanto, muestra sólo una tendencia o probabilidad de que ocurra el proceso.

La probabilidad de flotación,  $P$ , se puede expresar como: <sup>[10]</sup>

$$P = P_c \cdot P_a \cdot P_p \cdot P_f$$

Donde:

$P$  = Probabilidad de flotación.

$P_c$  = Probabilidad de colisión partícula/burbuja.

$P_a$  = Probabilidad de adhesión partícula/burbuja.



$P_p$  = Probabilidad de que la partícula permanezca unida a la burbuja y sea llevada a la superficie de la pulpa.

$P_f$  = Probabilidad de que el agregado partícula/burbuja se mantenga a pesar de la acción limpiadora de la espuma, y aparezca en el concentrado.

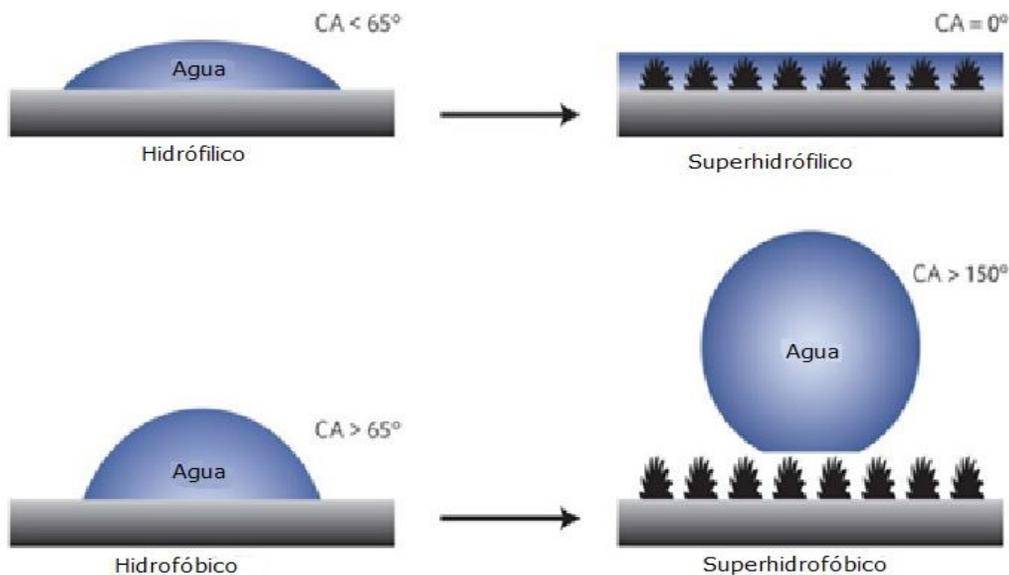


Figura 1.12 Hidrofobicidad e Hidrofilicidad de una gota con respecto al ángulo de superficie de contacto. [13]

#### 1.2.1.4 Interacción Colector-Espumante

La figura 2.5 representa la compleja interacción espumante-alcohólico con el Xantato en la superficie de un mineral de un mineral sulfurado. Se muestra la quimisorción de los átomos de azufre con la superficie mineral y la adsorción física de los átomos de azufre (unidos con doble enlace) y la superficie mineral. Tenga en cuenta que estos dobles enlaces en los átomos de azufre están en el mismo plano que los átomos unidos individuales.



Las moléculas de espumante dentro de la matriz del colector están orientados de manera que los grupos hidroxilo están apuntando lejos de la superficie del mineral, por lo que, cuando las burbujas se adhieren, estos grupos se encuentran en la interfaz con el límite de agua y aire en la burbuja unida a la superficie del mineral. [14]

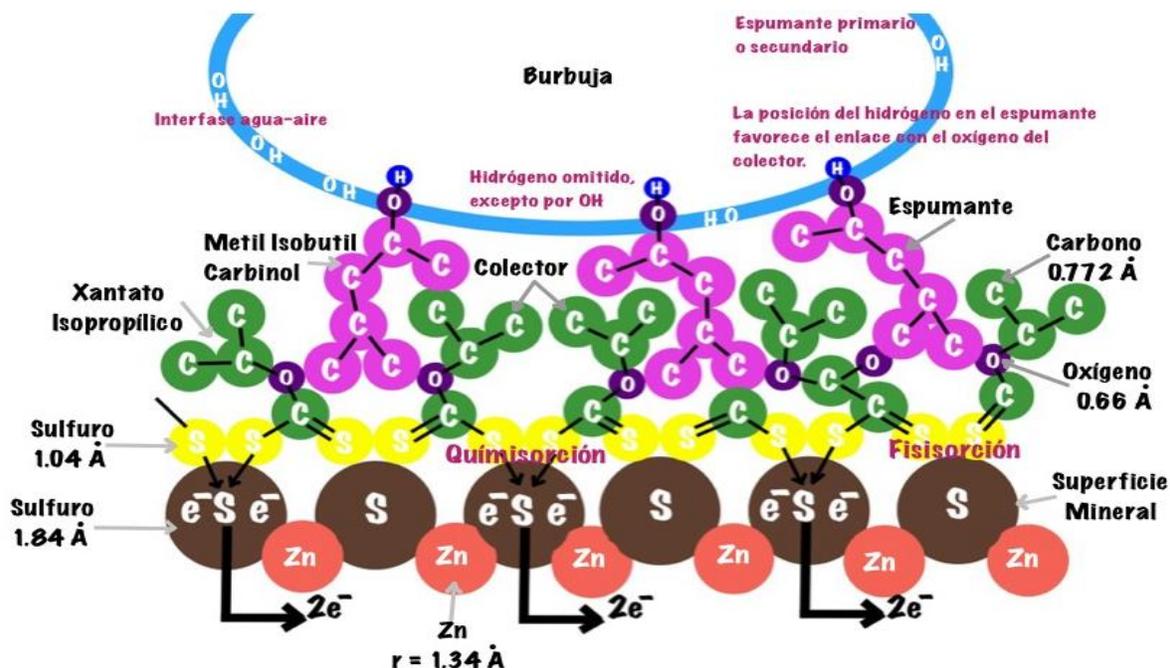


Figura 1.13 Interacciones entre el espumante y colector. [14]

### 1.2.2 Variables en el Proceso de Flotación

Las variables que más afectan la flotación de los minerales son las siguientes:

- Granulometría de la mena
- Tipo y dosificación de reactivos de flotación.
- Densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos.
- Tiempo de residencia.
- pH.





- Aireación y acondicionamiento de la pulpa.
- Temperatura de la pulpa.
- Calidad del agua utilizada. [10]

### **1.2.2.1 Granulometría de la Mena**

Existe un tamaño de partícula que presenta una mayor recuperación metalúrgica, observándose, en general, una disminución de ésta para tamaños más gruesos y más finos de la mena. La recuperación disminuye para tamaños pequeños, lo cual se relaciona con la dificultad de adhesión partícula/burbuja, debido a que éstas no adquieren la energía cinética suficiente para producir un agregado partícula/burbuja estable. Por otra parte, las partículas pequeñas son arrastradas más fácilmente a la espuma, ya que el drenaje a la pulpa se favorece con el incremento de la velocidad de sedimentación.

Es importante destacar que, en la etapa de flotación primaria la flotación se realiza con una granulometría de mena en la cual no es necesaria la liberación de la partícula, sin embargo, en la etapa de limpieza donde es necesaria la selectividad de las partículas útiles, es fundamental realizar una remolienda del concentrado de la etapa primaria para la liberación de las especies útiles de la mena.

De esta manera, el tamaño de partícula es la variable sobre la cual debe ponerse más énfasis en su control, debido a su efecto en la recuperación metalúrgica y en la selectividad del





concentrado final, así como, por la alta incidencia que tiene en los costos de operación del proceso global de concentración. [10]

### **1.2.2.2 Dosificación de los Reactivos**

La función del colector es hacer hidrofóbica la superficie del mineral deseado, por lo cual, es el reactivo químico más importante utilizado en la flotación. La amplia experiencia existente en la flotación de minerales permite usar con eficiencia determinados tipos de colectores dependiendo de los tipos de minerales y asociaciones mineralógicas presentes.

Por otro lado, la elección de un espumante determina las características de la espuma, que contribuye a la selectividad de la operación. La altura de la espuma y el flujo de aire a la celda afectan el tiempo de retención de las partículas en la espuma. La estabilidad de la espuma depende principalmente de la dosificación del espumante.

Se debe tener en cuenta, que los reactivos de flotación requieren de un cierto tiempo de acondicionamiento para estar en contacto con la pulpa y de esa forma poder actuar en forma eficiente sobre las especies útiles de la mena. Así, la etapa de acondicionamiento adquiere mayor importancia, ya que algunos reactivos se deben adicionar en la etapa de molienda para tener mayor contacto con la mena, mientras que otros, se adicionan directamente al cajón de descarga de los molinos de bolas o al acondicionador. [10]





### 1.2.2.3 Porcentaje de Sólidos en Pulpa

La densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos en la flotación de minerales viene determinada desde la etapa de molienda/clasificación. Es raro que la pulpa se ajuste en su porcentaje de sólidos antes de entrar a la etapa de flotación, sin embargo, es un factor importante, ya que la flotación de los minerales ocurre en forma eficiente cuando la pulpa presenta un valor adecuado de porcentaje de sólidos.

La densidad de pulpa afecta el tiempo de residencia del mineral en las etapas de flotación, y de esta forma en la capacidad del circuito. En general, la etapa de flotación primaria de las plantas concentradoras de cobre operan con un porcentaje de sólidos comprendido entre 30% y 45%, mientras que, las etapas de limpieza (limpia y re-limpia) trabajan con un porcentaje de sólidos menor. <sup>[10]</sup>

### 1.2.2.4 Tiempo de Residencia

El tiempo de flotación depende de las características del material que se va a flotar, y de la conjugación de todos los demás factores que inciden en el proceso. Para la optimización de los circuitos de flotación el tiempo óptimo de cada etapa se determina aplicando pruebas cinéticas de flotación. <sup>[10]</sup>

### 1.2.2.5 pH

El pH es la variable de control más utilizada en el proceso de flotación, ya que resulta fundamental en la recuperación y





selectividad, así como, en la depresión de minerales. El proceso de flotación es sumamente sensible al pH, especialmente cuando se trata de flotación selectiva. Los reactivos de flotación, principalmente los colectores, operan mejor en ciertos rangos de pH. [10]

#### **1.2.2.6 Aireación y Acondicionamiento de la Pulpa**

El acondicionamiento es una etapa clave ya que proporciona el tiempo necesario para que actúen en forma eficiente los reactivos de flotación. Algunos colectores y modificadores presentan cinética de adsorción en los minerales bastante lenta por lo cual deben incorporarse al molino de bolas, mientras que otros reactivos se incorporan directamente al estanque acondicionador de la pulpa.

La aireación de la pulpa en la celda es una variable importante que normalmente es controlada por el operador de la planta, la cual permite la aceleración o retardación de la flotación en beneficio de la recuperación metalúrgica o de la ley del elemento útil. [10]

#### **1.2.2.7 Calidad de Agua**

Dada la gran cantidad de interacciones que se producen entre las variables del proceso, las cuales acondicionan el ambiente físico-químico de la flotación, un aspecto interesante de analizar es la calidad del agua que se utiliza en el proceso. Es común en las plantas concentradoras, que parte importante del agua





utilizada sea agua de proceso, recuperada desde las etapas de separación sólido/líquido (espesadores, filtros, etc.), la cual contiene reactivos químicos residuales. Esta utilización de agua de proceso produce un ahorro en el consumo de agua y en el consumo de espumante, pero se puede producir un aumento de algunos iones en solución cuyo efecto en la flotación de los minerales debe ser evaluado, a fin de evitar que éstos superen los niveles críticos para la flotación. [10]

### 1.2.3 Reactivos de Flotación

En un sistema de flotación los reactivos se dividen de acuerdo a la función específica que desempeñan en: colectores, espumantes y modificadores: [10]

- *Colector:* Es el reactivo fundamental del proceso de flotación puesto que produce la película hidrofóbica sobre la partícula del mineral.
- *Espumante:* Tienen como propósito la creación de una espuma capaz de mantener las burbujas cargadas de mineral hasta su extracción de la máquina de flotación (celdas).
- *Modificadores:* Actúan como depresores, activadores, reguladores de pH, dispersores, etc. Facilitando la acción del colector para flotar el mineral de valor, evitando el arrastre de ganga. [15]

#### 1.2.3.1 Colectores

Son compuestos químicos orgánicos, cuyas moléculas contienen un grupo polar y uno no-polar. El anión o catión del grupo polar





permiten al ión del colector quedar adsorbido a la superficie también polar, del mineral. Por el contrario, el grupo no-polar o hidrocarburo queda orientado hacia la fase acuosa y tal orientación resulta en la formación de una película de hidrocarburo hidrofóbico en la superficie del mineral. Por consiguiente, las partículas de mineral hidrofóbico por una película de colector se adhieren a las burbujas de aire que van subiendo, arrastrando consigo el mineral a la superficie de la pulpa.

Estos reactivos se asocian más a los sulfuros y al aire, pero muy poco a la ganga. En los acondicionadores y celdas de flotación actúan rápidamente sobre los sulfuros, a los que rodean con una película que se pegan a las burbujas de aire que salen a la superficie de la pulpa formando las espumas de los concentrados.

En la adsorción de los colectores sobre la superficie del mineral la parte no-polar es orientada hacia el agua y la parte polar hacia el mineral; esta orientación hace que la superficie del mineral sea impermeable. [15]

La selectividad en un colector se refiere a su habilidad para recubrir en forma preferente o selectiva, y en consecuencia, flotar el mineral o minerales deseados sin flotar también los indeseados. La selectividad de los colectores, puede controlarse fácilmente mediante el uso de agentes modificadores adecuados lográndose una separación exitosa de la mayor parte de las combinaciones de minerales.





Los colectores más importantes en relación a la flotación pueden ser agrupados en tres clases:

- *Tio-compuestos*: Actúan como colectores de sulfuros metálicos.
- *Compuestos ionizables no-tio*: Pueden actuar como colectores o espumantes y se utilizan en la flotación de minerales no sulfuros.
- *Compuestos no iónicos*: Actúan principalmente como espumantes.

Los surfactantes utilizados en flotación son integrados a las interfases a través de una fase acuosa. De esta manera, solamente aquellos reactivos que presentan alguna solubilidad en agua pueden ser empleados. En algunos casos se utilizan hidrocarburos insolubles o aceites los cuales deben ser previamente dispersos en agua, en la forma de emulsiones. [10]

#### **1.2.3.1.1 Tio-Compuestos**

En los tio-compuestos el grupo polar contiene átomos de azufre no ligados al oxígeno.

Entre los colectores del tipo tio-compuestos sobresalen los xantatos o xantogenatos que son sales de ácido xantogénico, y se encuentran entre los primeros colectores orgánicos solubles en agua y de aquí que su adopción fuera inmediata y amplia. La hidrólisis de los xantatos aumenta con la reducción del pH del medio; mientras que las soluciones acuosas de xantatos en medios alcalinos son bastante estables.



Algunos xantatos son los siguientes:

- Xantato Etilico de Potasio.
- Xantato Etilico de Sodio.
- Propil Xantato de Potasio.
- Propil Xantato de Sodio.
- Isopropil Xantato de Potasio.
- Isopropil Xantato de Sodio.
- Butil Xantato de Potasio.
- Butil Xantato de Sodio.
- Isobutil Xantato de Sodio.
- Amil Xantato de Potasio.
- Amil Xantato de Sodio.
- Hexil Xantato de Potasio.
- Hexil Xantato de Sodio. <sup>[10]</sup>

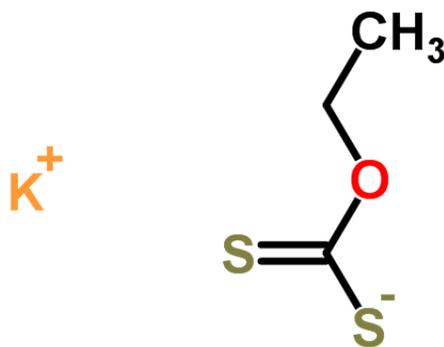


Figura 1.14 Estructura del Xantato Etilico de Potasio.

### 1.2.3.1.2 Compuestos Ionizables No-Tio

Los reactivos de flotación de este tipo más importantes son:

- *Carboxilatos*: Ácido (R-COOH) y sus sales de Sodio y de Potasio.



- *Sulfatos de Alquil:*  $R-O-SO_3^- M^+$
- *Sulfonatos de alquil:*  $R-SO_3^- M^+$  la unión C-S presente en los sulfonatos hace que estos compuestos sean más estables que los sulfatos.
- *Aminas:*  $RNH_2$  usadas en las siguientes formas:
  - Sales de aminas no substituidas.
  - Sal de amina primaria:  $R- NH_3^+Cl^-$
  - Sal de amina secundaria:  $R - R'' - NH_2^+Cl^-$
  - Sal de amina terciaria:  $R - (R'')_2 - NH^+Cl^-$
  - Sales de amina substituida (sales cuaternarias de amonio):  $R - (R'')_3 - N^+Cl^-$

Entre los compuestos ionizables, indicados anteriormente, solamente aquellos con radical  $C_6$  a  $C_{20}$  son usados en la flotación de minerales. Reactivos de cadena más corta que  $C_6$  no presentan una actividad superficial adecuada, por otra parte, reactivos de cadena más larga que  $C_{20}$  se tornan muy insolubles. [10]

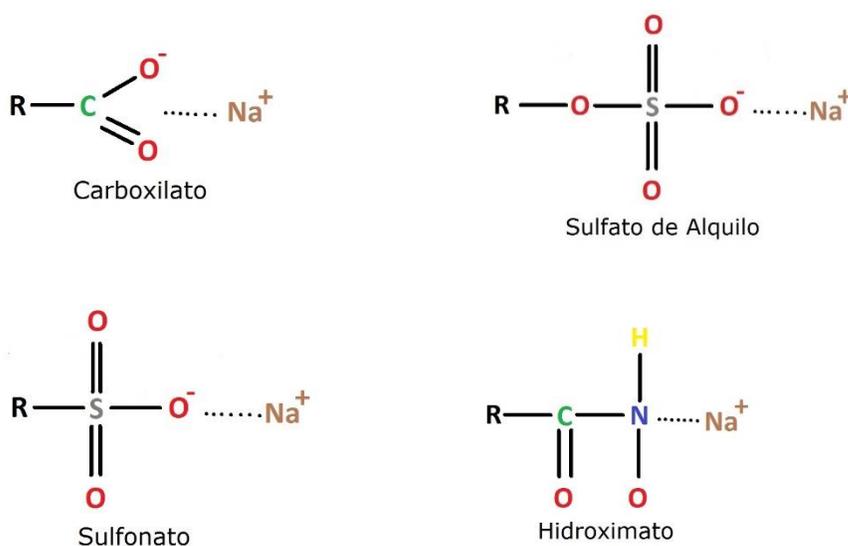


Figura 1.15 Formulas estructurales de sales de sodio de varios colectores aniónicos del tipo no tio-compuestos ionizables.





### 1.2.3.2 Modificadores

La función específica de los reactivos modificadores es precisamente preparar las superficies de los minerales para la adsorción o desorción de un cierto reactivo sobre ellas y crear en general en la pulpa condiciones propicias para que se pueda efectuar una flotación satisfactoria. Es decir, cambia o modifica la superficie de los sulfuros o de la ganga, para favorecer o impedir que los reactivos colectores actúen sobre ellos, evitando de esta manera que floten. [15]

#### 1.2.3.2.1 Depresor

La función específica de los depresores es disminuir la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrofílica o impidiendo la adsorción de colectores que pueden hidrofobizarla (inhibe de coleccion). [15]

##### 1.2.3.2.1.1 Cianuro de Sodio

Son cristales en forma de pellets de color blanco, se usan para el recubrimiento y depresión de minerales sulfurados de Hierro, Cobre y Zinc. Los iones de estos metales, forman complejos estables con el cianuro; asimismo se ha determinado que los minerales con iones metálicos, los cuales no forman tales compuestos con cianuro (Pb, Bi, Sn, Sb y As) no son deprimidos por el cianuro. En resumen:

- El ZnS forma un ion complejo soluble  $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{CN})_4]$  mientras que el PbS se transporta en la espuma.



- Las impurezas de Silicio se precipitan en las colas. [16]

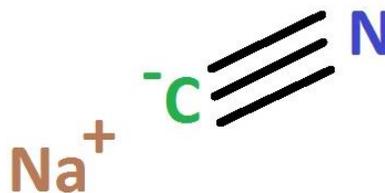
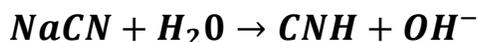


Figura 1.16 Molécula de Cianuro de Sodio.

#### 1.2.3.2.1.1.1 Riesgos

El ion cianuro es un reactivo con varias desventajas para la salud y el medio ambiente, esto es debido a su reactividad en metales como: Fe, Ag, Au, Ni, Zn, Cd, Hg, etc.

Cuando el ion Cianuro ( $\text{CN}^-$ ) interactúa con un ion positivo como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^+$  se produce una sal soluble en agua cuyo aspecto es el de un sólido blanco sin olor, sumamente tóxico. Si se combina con agua se produce la siguiente reacción:



El Cianuro de Hidrogeno es un gas altamente tóxico y con olor a almendras amargas. Los efectos al medio ambiente son:

- La permanencia del cianuro y los efectos de sus productos de descomposición, aún tóxicos por un tiempo considerable.



- La movilización de metales pesados y la fácil disolución de sus sales.
- La generación de drenaje ácido (formación de ácido sulfúrico) producido por la oxidación de sulfuros contenidos en las rocas.

La enzima *Citocromo-C Oxidasa*, responsable de la respiración en las células eucariotas y procariotas (de bacterias, hongos, plantas y animales) posee en el centro de su compleja estructura un átomo Fe. Debido a la reactividad que tiene el ion Cianuro con los metales, al entrar en contacto con la enzima reacciona con el Fe y la enzima deja de ser funcional. [17]

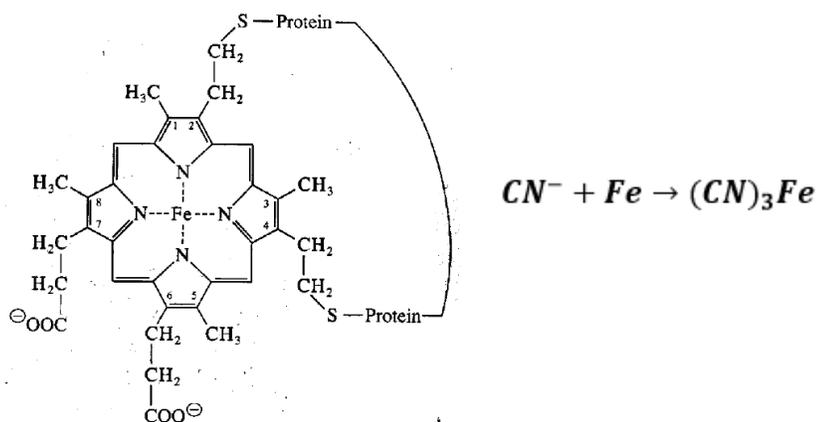


Figura 1.17 Reacción que presenta el Hierro en la molécula Citocromo-C Oxidasa con el ion Cianuro. [17]

### 1.2.3.2.1.2 Quebracho

Los extractos del quebracho son mezclas complejas de polifenoles de origen natural, que se obtienen por tratamiento con agua caliente de tejidos de árboles del tipo *Chinopsis*



*Lorentzii* que crecen en el norte de Argentina. Estos extractos contienen altas concentraciones de Catecol/Pirogalol. El extracto obtenido de cada planta es típico de esa especie. Por esa razón, uno no puede reemplazar un extracto con otro y esperar conseguir los resultados idénticos en la aplicación.

El Quebracho ( $[\text{C}_6\text{H}_2(\text{OH})_3\text{-COOC}_6\text{H}_2(\text{OH})_2\text{-COO}]_5\text{C}_6\text{H}_7\text{O}$ ) es una pentagaloilglucosa. Sustancia de carácter aromático con predominantes grupos fenólicos polihídricos.

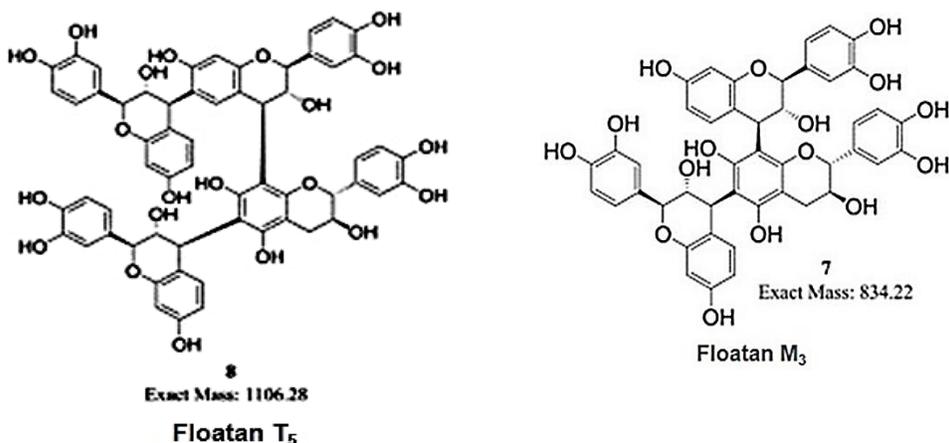


Figura 1.18 Izquierda: Estructura molecular del *Schinopsis lorentzii* (Floatan T<sub>5</sub>).<sup>[18]</sup> Derecha: Estructura molecular del *Schinopsis balansae* (Floatan M<sub>3</sub>).<sup>[18]</sup>

Los extractos se modifican químicamente para hacerlos más solubles y estables, además para adecuarlos a aplicaciones específicas en la flotación de distintos minerales. Los extractos de quebracho son bastante estables tanto en el medio ácido como alcalino, excepto en los valores extremos del pH y a temperaturas altas.





Las moléculas poli-funcionales de estos reactivos tienen una importante capacidad de adsorción en la superficie de los minerales. La adsorción puede ser el resultado de la unión tipo puente de hidrógeno con el oxígeno accesible de la superficie y posiblemente con otros átomos como el Azufre y Flúor; o por la formación de complejos entre los grupos OH<sup>-</sup> y cationes di y tri-valentes como el Calcio, Bario, Cobre, Zinc, Hierro, Aluminio, etc.; o por simple neutralización de la carga negativa a pH alcalino. También podría ser por atracción electrostática entre miscelas de tanino y la superficie de algunos minerales.

En el proceso de flotación selectiva tiene como propiedades alta selectividad como depresor, estabilidad a pH ácidos y básicos, alta adsorción en la superficie mineral y al ser un reactivo natural no es dañino al medio ambiente.

La empresa Unitan SAICA fabrica extractos de quebracho adaptados para aplicaciones específicas. El denominado Floatan T1 es adecuado como depresor de los carbonatos y silicatos y se usa en la flotación de Fluorita, Scheelita y de otros minerales de tipo sales polares. El Floatan T5 se formula como depresor de minerales de ganga y de pirita sobre todo en la flotación de minerales de cobre y el denominado M3 es un dispersante-depresor usado en la flotación de minerales que contienen ganga de talco. [19]

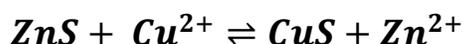




### 1.2.3.2.2 Activador

Los activadores alteran la naturaleza química de la superficie mineral para que convertirlos en hidrofóbicos y reaccionen con el colector. Generalmente son sales solubles que se ionizan en solución, los iones entonces reaccionan con la superficie del mineral.

Un ejemplo clásico es la activación de esfalerita por el cobre en solución. La esfalerita no flota satisfactoriamente con el colector xantato, ya que los productos formados de colector, tales como xantato de zinc, son relativamente solubles en agua y por lo tanto no proporcionan una película hidrófoba alrededor del mineral. La flotabilidad puede mejorar mediante el uso de grandes cantidades de xantatos de cadena larga, pero un método más satisfactorio es el uso de sulfato de cobre como un activador, que es soluble y se disocia en la solución como iones de cobre. La activación se debe a la formación de moléculas de sulfuro de cobre en la superficie del mineral, debido al hecho de que el cobre es más electronegativo que el zinc y por lo tanto se ioniza más lento:



Los depósitos de sulfuro de cobre en la superficie de la esfalerita reaccionan fácilmente con el xantato para formar xantato de cobre insoluble, lo que convierte a la superficie de la esfalerita en hidrofóbica. [20]





#### **1.2.3.2.2.1 CuSO<sub>4</sub>**

Fue introducido por primera vez en Breadford, Australia en 1913 durante la flotación de blenda de Zinc y después fue introducido para el proceso de activación de pirita aurífera. Es utilizado universalmente en la flotación de esfalerita, que es de lo contrario sería imposible flotar. También se usa para reactivar minerales que han sido deprimidos con cianuro, como calcopirita, pirita, pirrotita y arsenopirita. [14]

La acción activadora, consiste en que el ión Cobre del sulfato reemplaza al ión Zinc en la celda cristalina del mineral, formando una película de CuS sobre la esfalerita; la esfalerita seguidamente se comporta como mineral de cobre, sobre el cuál el xantato puede ser absorbido y por consiguiente, el mineral puede ser flotado. [15]

#### **1.2.3.2.3 Reguladores de pH**

Son los reactivos que controlan la acidez o alcalinidad de la pulpa. Es un reactivo que cambia la concentración del ión hidrógeno de la pulpa, lo cual tiene como propósito incrementar o decrecer la adsorción del colector como se desee, la efectividad de todos los agentes de flotación, depende grandemente de la concentración de hidrógeno o ión hidroxilo en la pulpa. Uno de los principales objetivos de la investigación por flotación, es encontrar el pH óptimo para cualquier combinación de reactivos y mineral. La mayoría de plantas de flotación, que tratan minerales sulfurados, operan





con una pulpa alcalina para dar óptima recuperación metalúrgica, así como para mantener la corrosión al mínimo.

[15]

#### 1.2.4 Teorías de Flotación de Sulfuros

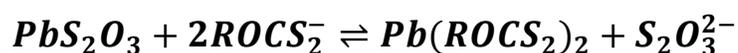
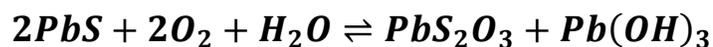
Tres mecanismos han sido aceptados para la explicación de la interacción mineral sulfurado/xantato:

- Teoría química o de la oxidación superficial.
- Teoría de los semiconductores.
- Teoría electroquímica. [10]

##### 1.2.4.1 Teoría Química o de la Oxidación Superficial

En medio acuoso alcalino, la mayoría de los minerales sulfurados sufren oxidación superficial. Para el caso particular de la galena, existen numerosos estudios que demuestran que la superficie estaría recubierta por especies oxidadas, especialmente tiosulfato básico de plomo.

La reacción con un xantato ocurriría por mediación de esta capa oxidada, operando un mecanismo de intercambio iónico. El mecanismo propuesto puede resumirse en las siguientes reacciones:





De esta forma se explica la formación de un recubrimiento de colector formado por xantato de plomo, el que sería responsable de la hidrofobización de la partícula. Sin embargo, resultados experimentales de varios autores, han mostrado que superficies de plomo recubiertas con este compuesto conservan su hidrofobicidad.

Este mecanismo de oxidación superficial es poco realista para metales como platino y oro, y ha mostrado ser poco importante para cobre y galena, en algunas experiencias en que se ha adicionado xantato a superficies libres de especies oxidadas. [10]

#### **1.2.4.2 Teoría de Semiconductores**

Esta teoría presenta una diferencia fundamental con la anterior, puesto que, la hidrofobización se atribuye a la formación de una especie oxidada del colector, un disulfuro orgánico conocido como dixantógeno, el que se formaría directamente sobre la superficie mineral.

El rol del oxígeno, que es un fuerte aceptor de electrones, se interpreta en el sentido que su adsorción tomaría los electrones libres de las capas superficiales del retículo cristalino del sulfuro semiconductor, de tal forma que de semiconductor tipo -n pasaría a semiconductor tipo -p.

Cuando las bandas de conducción de un sulfuro semiconductor son electrones en exceso, se habla de semiconductores tipo -n (negativos), mientras que, cuando las bandas están





representadas por huecos, se tienen semiconductores tipo -p (positivos). Así, la adsorción de especies aniónicas, como xantato, estaría favorecida sobre una especie semiconductor tipo -p.

La oxidación de xantato a dixantógeno se produciría por el paso de un electrón a la red cristalina, debido a la presencia de huecos (ausencia de electrones libres). El dixantógeno, por ser una molécula neutra, permanecería co-adsorbido físicamente en la película de colector, confiriéndole a la superficie una fuerte hidrofobización. [10]

#### 1.2.4.3 Teoría Electroquímica

Según la literatura, el mecanismo más común de interacción entre xantato y sulfuros es de naturaleza electroquímica. Iones xantatos son oxidados a dixantógeno o xantato del metal, de acuerdo con una de las siguientes reacciones:

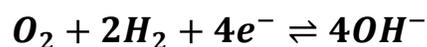
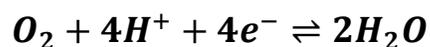


Independientemente de la trayectoria de oxidación del xantato, este proceso anódico precisa ser balanceado por una reacción catódica. Uno de los papeles importantes del oxígeno en





sistemas xantato/mineral sulfurado es entregar la reacción catódica. El producto real de la reducción de oxígeno en ambiente acuoso puede ser  $H_2O$  o  $OH^-$  de acuerdo con una de las reacciones:



La primera de estas reacciones es más apropiada para describir el proceso en medio ácido (bajo acción catalítica de la superficie mineral). La segunda reacción es más realista en medio alcalino.

El mecanismo electroquímico es coherente con varias evidencias experimentales, tales como, la presencia de xantato de metal o dixantógeno, la adsorción no uniforme del colector en la superficie (debido a la diferencia de potencial entre varios puntos) y la necesidad de oxígeno para la flotación de sulfuros. <sup>[10]</sup>



## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se detalla el procedimiento realizado en este trabajo, y se presenta en forma de diagrama de flujo en la Figura 2. El desarrollo experimental puede resumirse en: pruebas de potencial zeta y pruebas de flotación selectiva, previa caracterización y preparación de menas de alta pureza para las pruebas de potencial zeta y mineral empleado en las pruebas de flotación respectivamente.

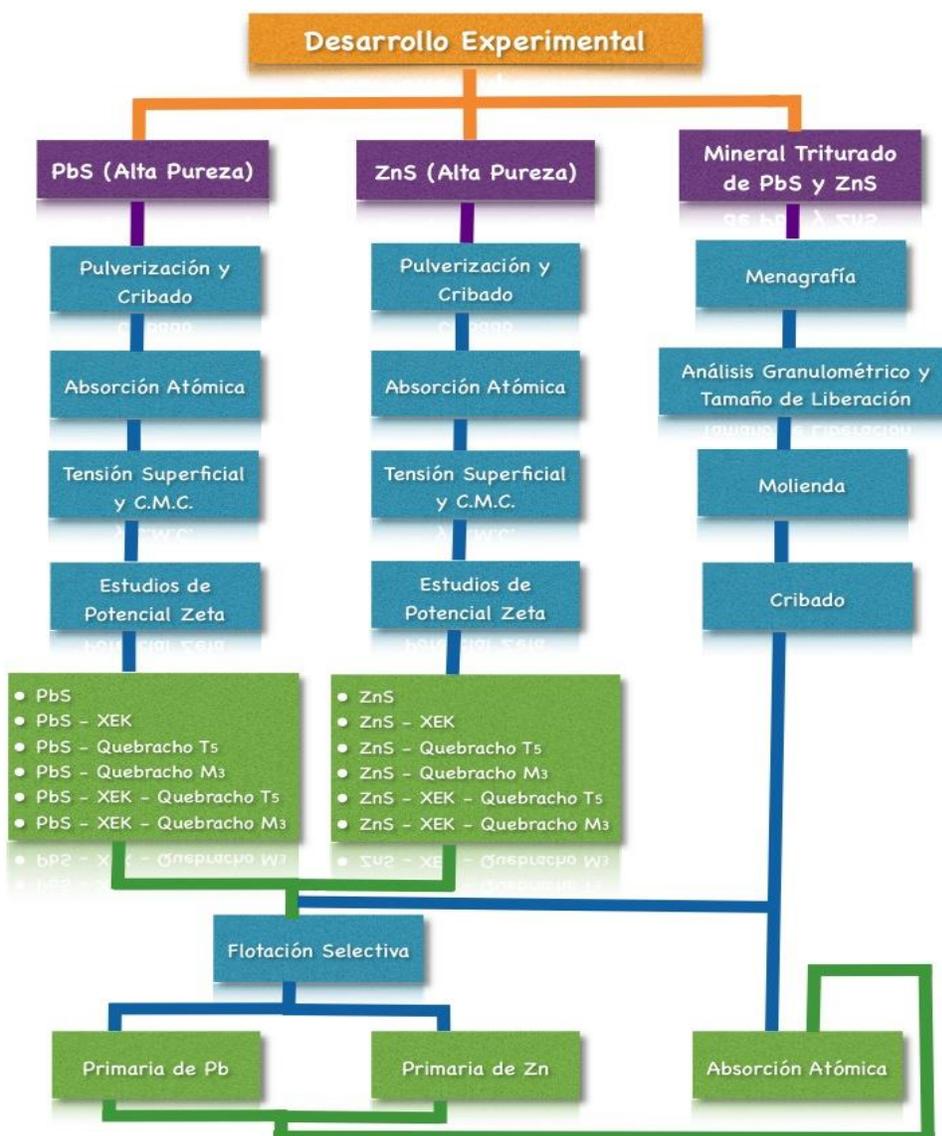


Figura 2. Diagrama Desarrollo Experimental.



## 2.1 Pruebas de Potencial Zeta

Las pruebas de potencial zeta se realizaron con muestras de mano de mineral de alta calidad de galena y esfalerita.



Figura 2.1 Muestra de mano de galena y esfalerita.

### 2.1.1 Pulverización y Cribado

Las muestras de manos de galena y esfalerita fueron trituradas manualmente, después los minerales se pulverizaron en un mortero de porcelana. Posteriormente el mineral fue cribado en las mallas número 300, 350 y 400 (de acuerdo a la norma inglesa BSS 410) para obtener 15 gramos de cada mineral en el retenido de la malla 350 (45  $\mu\text{m}$ ). Finalmente el mineral se almacenó en contenedores de plástico (para evitar posible oxidación).



Figura 2.2 Pulverización del mineral en el mortero de porcelana.





Figura 2.3 Izquierda: Mineral de galena (PbS). Derecha: Mineral de esfalerita (ZnS). Cribados a malla 350 para pruebas de potencial zeta.

### 2.1.2 Espectroscopía de Absorción Atómica

Muestras de 5g de los minerales cribados se analizaron por espectroscopia de absorción atómica en el equipo modelo Perkin Elmer 3100, utilizado para la determinación de la concentración de los metales en solución. En particular, para Pb y Zn se utilizaron las siguientes longitudes de onda:  $\lambda_{Pb}=283.3$  nm y  $\lambda_{Zn}=213.9$ nm, respectivamente. Para la preparación de las muestras se pesaron  $0.1g \pm 0.004$  de cada muestra, se adicionaron unas gotas de acetona para eliminar los productos de flotación, se agregaron 20 mL de una solución 1:1 de HCl y agua, se calentó la muestra a  $70$  °C, cubriendo las muestras con un vidrio de reloj, se adicionaron 3 gotas de  $HNO_3$  para terminar de liberar el mineral, se aforo a un volumen de 100 mL y finalmente se aforo 1 mL de esta solución en un volumen de 60 mL para sus correspondientes lecturas en el equipo de absorción atómica.





Figura 2.4 Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica, Perkín Elmer 3100.

### 2.1.3 Tensión Superficial y Concentración Micelar Crítica

Para determinar la concentración micelar crítica se prepararon 6 soluciones de xantato etílico de potasio ( $[1.75 \times 10^{-3} \text{ M}]$ ,  $[1.5 \times 10^{-3} \text{ M}]$ ,  $[1 \times 10^{-3} \text{ M}]$ ,  $[1.5 \times 10^{-4} \text{ M}]$ ,  $[1.25 \times 10^{-4} \text{ M}]$ ,  $[1 \times 10^{-4} \text{ M}]$ ).

Para la determinación de la tensión superficial se utilizó una balanza granataria, hilo cáñamo y un portaobjetos de vidrio de 0.001m de espesor y 0.0754 m de longitud (método alternativo a Du Nouy). Cada concentración de la solución se vertió en un contenedor de 500 mL. La lámina se puso en contacto con cada solución y se efectuaron lecturas de los gramos requeridos para cuando el portaobjetos comprende dos superficies justo antes de romperse la película entre el portaobjetos y el líquido.



Figura 2.5 Dispositivo utilizado para medir la tensión superficial en la solución de XEK.



Cada concentración de la solución de xantato etílico de potasio se midió con un electrodo de calomel y el equipo Orion 5 Star para determinar la conductividad específica de cada solución.



Figura 2.6 Conductímetro, Thermo Scientific Orion Star.

#### 2.1.4 Estudios de Potencial Zeta

Para las pruebas de potencial zeta el equipo utilizado fue un *Zeta-Meter 3.0+*, una celda electroforética con ánodo de molibdeno y cátodo de platino. Por cada prueba se pesaron 0.3 gramos de mineral (% sólidos en peso en la pulpa). La siguiente tabla muestra las mezclas que fueron preparadas:

Tabla 1. Pruebas de potencial zeta realizadas en minerales puros de galena y esfalerita.

Sistema	pH	XEK [ $1.5 \times 10^{-4}$ ]	T5 [mg/L]			CuSO <sub>4</sub> [ $1.5 \times 10^{-4}$ ]
			10	15	20	
Galena - Agua Destilada	7 - 11					
Galena - Depresor	7 - 11		♦	♦	♦	
Galena - Colector	7 - 11	♦				
Galena - Depresor - Colector	7 - 11	♦	♦	♦	♦	
Esfalerita - Agua Destilada	7 - 11					
Esfalerita - Depresor	7 - 11		♦	♦	♦	
Esfalerita - Colector	7 - 11	♦				
Esfalerita - Depresor - Colector	7 - 11	♦	♦	♦	♦	
Esfalerita - Depresor - Colector - Activador	7 - 11	♦	♦	♦	♦	♦



Las soluciones en estudio fueron ajustadas con soluciones de NaOH y HCl [0.1 M] para obtener los valores de pH de estudio. Los tiempos de acondicionamiento para todas las soluciones fueron de 5 minutos.



Figura 2.7 Acondicionamiento del mineral con pH-metro Oakton, previo a las pruebas de potencial zeta.

Las soluciones fueron agregadas a la celda electroforética y posteriormente leída la conductancia específica de la solución, se fijó el voltaje aplicado a la solución de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2. Relación de voltaje y conductancia específica para el medidor de potencial zeta "Zeta-Meter 3.0+ <sup>[7]</sup>

Voltaje	Conductancia Específica Máxima Permissible de la Muestra (micromhos/cm)
<b>300</b>	300
<b>200</b>	700
<b>150</b>	1,200
<b>100</b>	3,000
<b>75</b>	5,000
<b>50</b>	10,000
<b>40</b>	20,000
<b>30</b>	30,000
<b>20</b>	60,000



Finalmente con el voltaje determinado se obtuvieron las lecturas de potencial zeta. Se realizaron 3 mediciones por cada solución analizada.

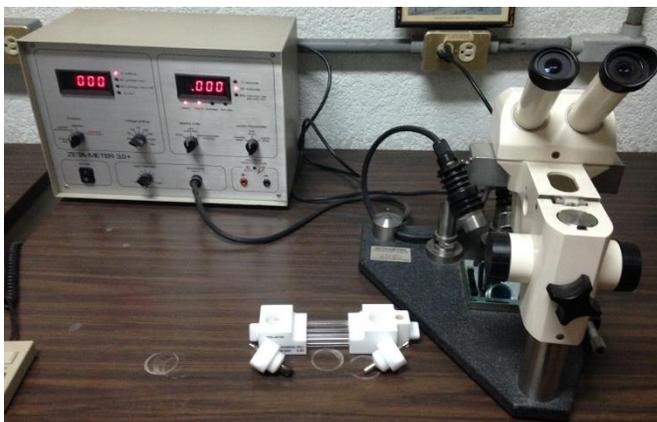


Figura 2.8 Zeta-Meter 3.0+ y celda electroforética.



## 2.2 Pruebas de Flotación Selectiva

Las pruebas de flotación selectiva se realizaron con minerales de baja ley provenientes de la planta de Charcas, San Luis Potosí, mineral proporcionado por Grupo México.

### 2.2.1 Menografía

Muestras representativas del mineral fueron preparadas para el análisis menográfico, por lo cual, se deslamaron, secaron y montaron en resina epóxica para su posterior desbaste grueso y fino hasta la lija 600. Las muestras se observaron bajo el microscopio de luz reflejada Nikon Optiphot con 100x. La resina se dividió en cinco partes, cada parte se dividió en cuatro zonas (tomando como referencia un reloj analógico) y se tomaron imágenes de las resinas bajo diferentes condiciones (nicos paralelos, nicos cruzados, con polarizador, sin polarizador, en campo claro y campo oscuro).



Figura 2.9 Microscopio de luz reflejada, Nikon Optiphot.



### 2.2.2 Análisis Granulométrico y Tamaño de Liberación

Para realizar el análisis granulométrico de la muestra de alimentación del mineral de Pb y Zn se consideró que la primera criba no retuviera más del 10% de la muestra, seleccionando las cribas subsecuentes con una progresiones geométricas de raíz cuadrada de dos, colocando finalmente las cribas en un rop tap modelo RX-29 con un tiempo de residencia de 15 minutos.

Tabla 3. Selección de cribas con una progresión de raíz cuadrada de dos.

No. de Malla	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )
<b>35</b>	500
<b>45</b>	355
<b>60</b>	250
<b>80</b>	180
<b>120</b>	125
<b>170</b>	90
<b>250</b>	63
<b>325</b>	45

Para la determinación del tamaño de liberación del mineral de Pb-Zn se utilizó un microscopio estereoscópico American Optical AO 570, en el cual se colocó una cuadrícula de un centímetro cuadrado y se realizó el conteo de partículas valiosas con respecto a las de ganga para determinar a qué tamaño se ha obtenido el 100% de liberación.





Figura 2.10 Microscopio American Optical.

### 2.2.3 Molienda

La molienda fue realizada en un molino de bolas de laboratorio con dimensiones de 20.7 cm de diámetro x 15.7 cm de longitud, utilizando como medio molurante 8.2 kg de bolas de molino y realizando moliendas de 300 g de mineral por 10 minutos.



Figura 2.11 Molino de bolas.



#### 2.2.4 Cribado

El producto de molienda fue cribando al tamaño de liberación y retornando al molino 300 g del mineral que se retuvo en la criba, hasta obtener la cantidad suficiente de mineral molido al tamaño de liberación.



Figura 2.12 Rot tap, RX-29.

#### 2.2.5 Flotación Selectiva

Con las pruebas obtenidas en potencial zeta, se determinaron las flotaciones.



Figura 2.13 Celda de Flotación Denver.



Para el circuito primario de Pb se armó la celda de flotación, se agregó en el interior de la celda 18% de sólidos en peso de mineral de Pb y Zn, después agregaron 1,100 mL de agua. Se insertó el electrodo a la celda y se ajustó a 1,200 rpm. La preparación del circuito de Pb necesitó 5 min, en el primer minuto se adicionó el T<sub>5</sub>, se ajustó el pH, al minuto 3 se adicionó el XEK, se ajustó el pH, al minuto 4 se adicionaron dos gotas de metil isobutil carbinol (0.030 mL) y se ajustó el pH, a minuto 4 con 45 segundos se inició el flujo de aire y a los 5 minutos se inició el arrastre de espuma.

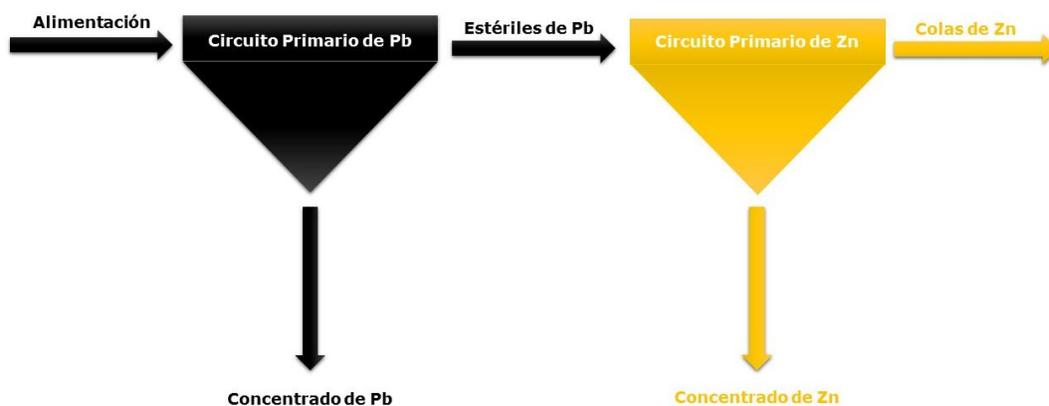


Figura 2.14 Circuito de Flotación Estudiado.

Para el circuito primario de Zn, inmediatamente después de terminar el arrastre del Pb, se inició el cronometro, se ajustó el volumen de la celda, se insertó el electrodo y al primer minuto se adicionó el CuSO<sub>4</sub> [1.5x10<sup>-4</sup> M], después se ajustó el pH, al minuto 4 se adicionó una gota de metil isobutil carbinol (0.015 mL), al minuto 4 con 45 segundos se retiró el electrodo y se inició el flujo de aire, al minuto 5 comenzó el arrastre de espuma de Zn durante 5 minutos.





Figura 2.15 Circuito de flotación. Izquierda: Circuito Primario de Plomo. Derecha: Circuito Primario de Zinc.

Las muestras obtenidas fueron identificadas y secadas en el horno a 70 °C. Posteriormente se pesaron y se tomaron muestras representativas de 1 g para enviarlas a análisis químico por absorción atómica.



### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### 3.1 Menografía

La siguiente tabla muestra las imágenes y descripción de la resina con el mineral tomadas con el microscopio de luz reflejada en diferentes condiciones.

Muestra 1		Zona				
Campo Claro	Campo Oscuro	Lente	12 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 12
		Nicoles cruzados, polarizado	Se observan estructuras subhedrales. Los minerales presentes son 30% de esfalerita y 70% de pirita.	Hay dominio de estructuras anhedrales. Se observa pirita en toda la zona.	Se observa una estructura subhedral. Los minerales presentes son 40% de pirita y 60% de esfalerita.	Se observa una estructura anhedral dentro de una estructura más grande. Los minerales presentes son esfalerita en toda la zona, esto se comprueba en el campo oscuro debido a su color amarillo acaramelado.
		Nicoles cruzados sin polarizar				
		Nicoles paralelos, polarizado				
		Nicoles paralelos sin polarizar				

Muestra 2		Zona				
Campo Claro	Campo Oscuro	Lente	12 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 12
		Nicoles cruzados, polarizado	Se observan estructuras subhedrales. Los minerales presentes son 20% de pirita, en la zona central se observa que la matriz del mineral es cuarzo, esto se observa mejor en el campo oscuro debido a que el material es translucido. Se observa un 60% de esfalerita.	No se observan los límites de las estructuras. En toda la zona se observa esfalerita.	Las estructuras que se observan son subhedrales. Hay un dominio de esfalerita, en las orillas se observa la matriz de cuarzo.	Se observan estructuras euhedrales y subhedrales. Se encuentran bordes cuarzo con incrustaciones de esfalerita, además de un 60% de pirita.
		Nicoles cruzados sin polarizar				
		Nicoles paralelos, polarizado				
		Nicoles paralelos sin polarizar				





Las observaciones realizadas durante la caracterización menagráfica de las muestras analizadas presentan, un alto porcentaje de esfalerita, seguido de porcentajes inferiores de pirita y cuarzo, no fue posible observar partículas de galena, debido al bajo porcentaje de la misma en la muestra. Todas las muestras minerales presentan estructuras euhedrales y subhedrales, con texturas equigranulares con límites granulares rectilíneos, además de numerosos planos de clivaje. Las características de este mineral hacen que haya una fácil liberación de las partículas minerales y a su vez que estas puedan ser procesadas por métodos convencionales de conminución y por lo tanto beneficiable por proceso de flotación. A partir del análisis granulométrico se observa que las partículas minerales tienen un 100% de liberación a 65.2  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 Análisis Químico del Mineral

Con el objeto de conocer la calidad de los elementos de interés en dicho mineral se realizó el análisis químico vía espectroscopía de absorción atómica, para los elementos de Pb y Zn; teniéndose los siguientes resultados:

Tabla 4. Composición química del mineral obtenida por absorción atómica.

Muestra	Pb (% en peso)	Zn (% en peso)
Mineral de Alta Calidad	88.5	66.8
Mineral de Charcas	0.5	6.8



Para la calibración del equipo de espectroscopia de absorción atómica se utilizaron estándares de Pb y Zn con una concentración de 1, 2 y 4 ppm, con su respectivo blanco, realizándose los análisis por triplicado.

### 3.3 Concentración Micelar Crítica

Para determinar la concentración adecuada para flotar a este tipo de menas, así como el de abatirla tensión superficial, con el colector (XEK) se realizaron pruebas de conductividad molar y tensión superficial.

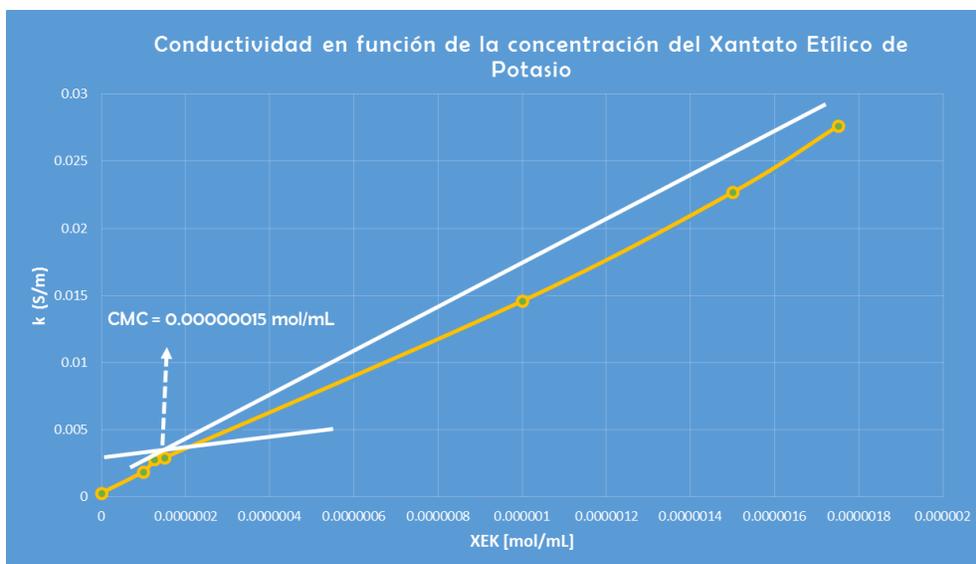


Figura 3. Determinación gráfica de la concentración micelar critica con la conductividad específica de varias concentraciones de xantato etílico de potasio.



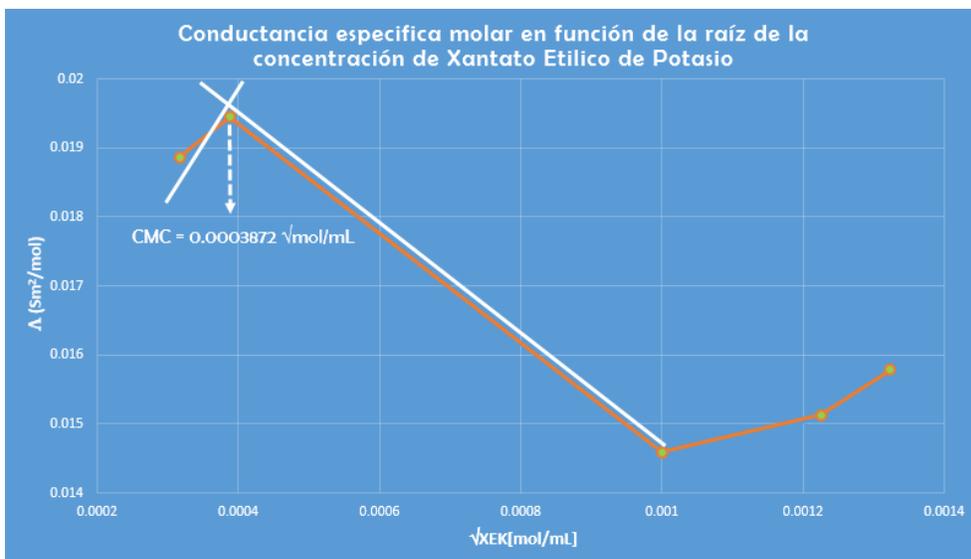


Figura 3.1 Determinación gráfica de la concentración micelar crítica con la conductividad específica molar de la raíz de las concentraciones de xantato etílico de potasio.

Las pruebas de conductividad molar en función del colector (Figura 3) muestran un pequeño cambio de pendiente a  $2.9 \times 10^{-3} \text{ S/m}$  y  $1.5 \times 10^{-4} \text{ M}$ , para hacer más evidente el cambio de pendiente y tener una menor incertidumbre en la concentración elegida de colector se comparó la raíz de la concentración del colector en función de la conductividad específica molar (Figura 3.1), con lo que se observa que el mayor cambio de pendiente se encuentra a  $\sqrt{3.87 \times 10^{-4} \text{ mol/mL}}$  ( $1.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ ) y  $1.94 \times 10^{-2} \text{ Sm}^2/\text{mol}$ , debido a que las micelas presentan una menor conductividad iónica, lo que disminuye la conductividad de la solución.





Figura 3.2 Determinación grafica de la concentración micelar critica con la tensión superficial de varias concentraciones de xantato etílico de potasio.

Las pruebas de tensión superficial en función de la concentración de colector (Figura 3.2) muestran dos líneas verticales, la primera línea presenta una ausencia de colector por lo que no hay cambio en la tensión superficial del agua, la zona entre las dos líneas muestra el abatimiento de la tensión superficial al incrementar la concentración de colector. La tercera línea muestra la zona donde la pendiente tiende a cero, en esta zona comienza una intolerancia al cambio de tensión superficial por lo que se elige el punto más cercano a la tercera línea para elegir la concentración micelar critica  $1.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$  y  $4.85 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ , la cual concuerda con las pruebas de conductividad molar.



### 3.4 Potencial Zeta

Se realizaron mediciones de potencial zeta en función del pH para observar el comportamiento de partículas de galena y esfalerita y así determinar su tendencia a flotar o deprimirse (Tabla 4), durante el proceso de flotación selectiva.

Tabla 5. Comportamiento de estabilidad del coloide en función del potencial Z. [7]

Características de Estabilidad	Promedio de PZ (mV)
Máxima aglomeración y precipitación	+3 a 0
Excelente aglomeración y precipitación	-1 a -4
Aglomeración y precipitación razonable	-5 a -10
Umbral de aglomeración (de 2 a 10 coloides aglomerados)	-11 a -20
Escasa estabilidad (poca aglomeración)	-21 a -30
Moderada estabilidad (sin aglomerados)	-31 a -40
Buena estabilidad	-41 a -50
Muy buena estabilidad	-51 a -60
Excelente estabilidad	-61 a -80
Máxima estabilidad y flotabilidad	-81 a -125

En la Figura 3.3 se muestra el comportamiento de la galena en agua destilada, en presencia de colector y en presencia de tres concentraciones de depresor. El comportamiento de la galena en agua destilada muestra que a pH neutro tiene tendencia a deprimirse (-30.3 mV) y a medida que aumenta el pH se observa una tendencia natural de estabilidad hasta pH 10 (-44.3 mV), entre pH 10 y pH 11 se observa un retroceso en la estabilidad de la partícula de galena inferior a la obtenida a pH neutro (-26 mV).



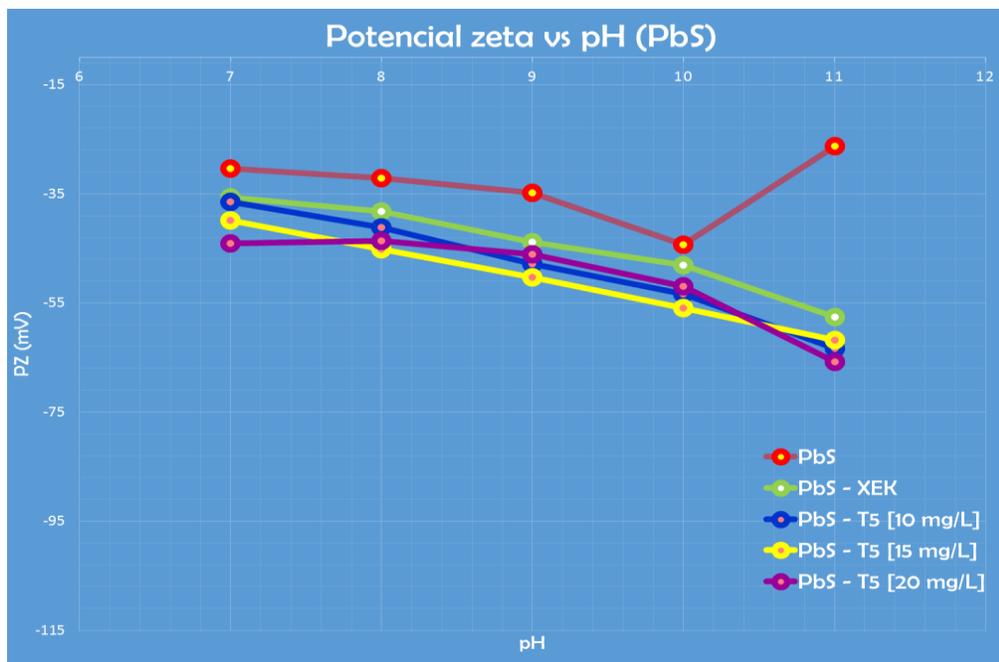


Figura 3.3 Representación del potencial zeta para galena en función del pH, en ausencia de reactivos, presencia de colector y presencia de depresor.

El comportamiento de la galena con el colector muestra a pH neutro una moderada estabilidad sin aglomerados coloidales (-35.6 mV) y a medida que se hace más básico el medio el potencial disminuye hasta pH 11 donde se observa una muy buena tendencia hacia la estabilidad (-57.6 mV), este comportamiento muestra que, a medida que el pH aumenta, se favorece la quimisorción y la estabilidad. El comportamiento de la galena es similar entre las tres concentraciones de depresor, a pH neutro se observa una moderada estabilidad sin aglomerados coloidales y a medida que el medio se torna básico disminuye el potencial de las partículas hasta una muy buena estabilidad, lo que muestra que este reactivo se adsorbe de forma química en la superficie de la galena, además de que este depresor de esfalerita



promueve potenciales en los cuales se favorece la flotabilidad de la galena.

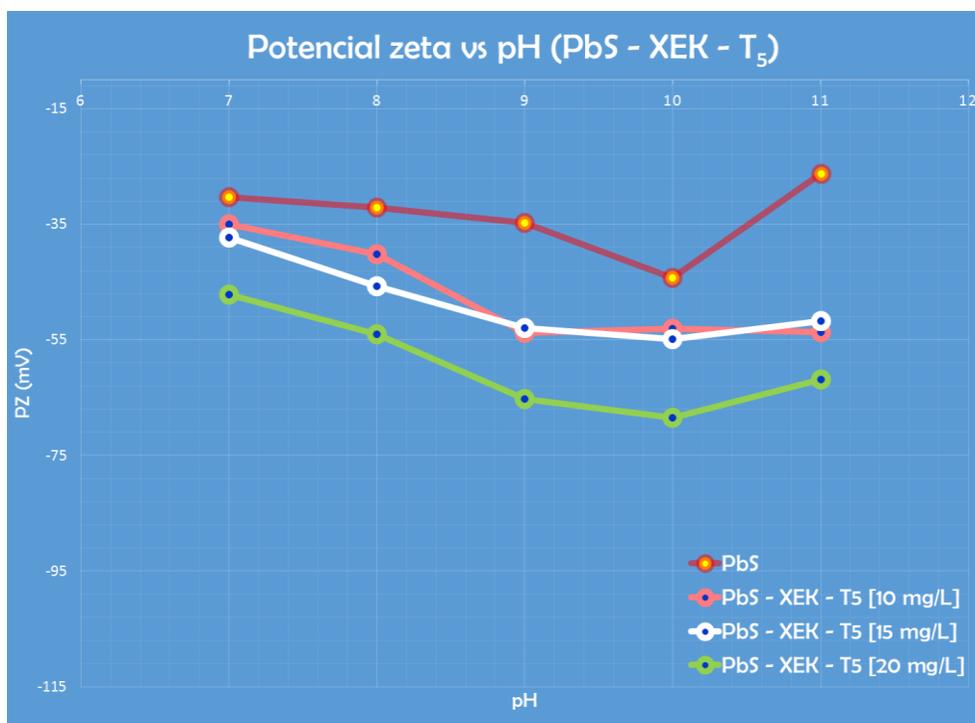


Figura 3.4 Representación del potencial zeta para galena en función del pH, en ausencia de reactivos, presencia del colector-depresor T<sub>5</sub> [10, 15, y 20 mg/L].

La Figura 3.4 muestra el comportamiento de la galena-colector mezclada con tres concentraciones de depresor (T<sub>5</sub>). La galena con colector y 10 mg/L de depresor a pH neutro presenta una moderada estabilidad sin la presencia de aglomerados (-35 mV), el potencial disminuye hasta pH 9 donde se observa una muy buena estabilidad de la galena (-53.8 mV), al volver más básica la solución y hasta pH 11 se observa que el comportamiento de la galena se estabiliza pues no muestra una mayor o menor estabilidad. La galena con colector y 15 mg/L de depresor tiene un comportamiento muy parecido al que se observa con 10 mg/L de depresor, a pH



neutro se tiene una moderada estabilidad, el potencial disminuye hasta pH 9 donde la galena se mantiene en un comportamiento con muy buena estabilidad. La galena con colector y 20 mg/L de depresor, muestra comportamientos similares a las curvas anteriores, pero con una tendencia mayor hacia la estabilidad, a pH neutro se tiene una buena estabilidad y el potencial disminuye hasta pH 9 donde la galena presenta una excelente estabilidad, desde este punto hasta pH 11 la galena presenta un comportamiento constante. En esta figura se observa que el aumento en la concentración de depresor promueve quimisorción sobre la partícula, por lo que el T<sub>5</sub> favorece potenciales en los cuales se favorece la flotabilidad de la galena.

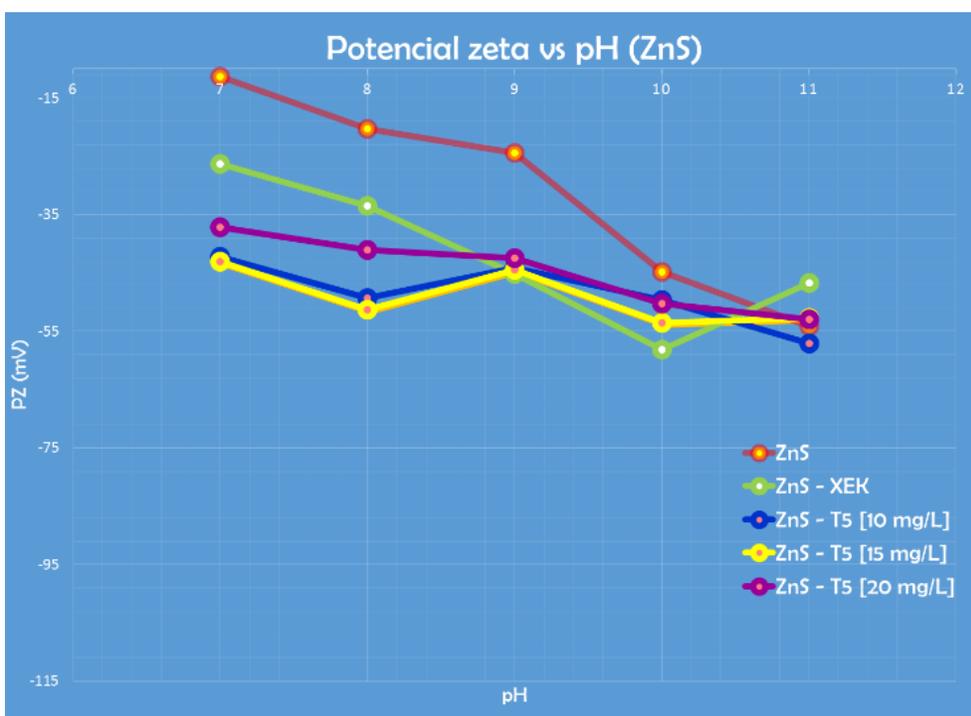


Figura 3.5 Representación del potencial zeta para la esfalerita en función del pH, en ausencia de reactivos, presencia de colector y presencia de depresor.





En la figura 3.5 se muestra el comportamiento de la esfalerita en agua destilada, en presencia de colector y en presencia de tres concentraciones de depresor. La esfalerita con agua destilada muestra que a pH neutro hay una aglomeración y precipitación de las partículas (-11.32 mV), a medida que la solución se vuelve básica la partícula adquiere estabilidad y un comportamiento constante hasta pH 11 donde se observa una buena estabilidad (-54.1 mV). La esfalerita con colector muestra que a pH neutro disminuye la tendencia de la partícula a deprimirse con respecto al agua destilada, aun así la partícula presenta una escasa estabilidad (-26.3 mV), la partícula disminuye su potencial hasta pH 10 donde presenta una muy buena estabilidad (-58.1 mV) debido a la adsorción química entre el colector y la partícula, entre pH 10 y pH 11 la tendencia se revierte hacia una buena estabilidad (-46.7 mV) pues no se favorece la adsorción del colector. La partícula de esfalerita con el depresor en 10 y 15 mg/L, muestran comportamientos similares, es los cuales de pH neutro a pH 9 muestran un comportamiento oscilatorio dentro de una buena estabilidad (-42.2 mV a -51.3 mV), a pH 10 y 11 la partícula disminuye su potencial hacia una muy buena estabilidad (-52.7 mV a -57.1 mV). Con 20 mg/L de depresor la partícula de esfalerita de pH 7 a pH 11 muestra una pendiente casi constante de (-37.1 mV a -52.9 mV) mostrando una buena estabilidad de la partícula, por lo que el depresor  $T_5$  en la superficie de la partícula de esfalerita muestra una adsorción física.



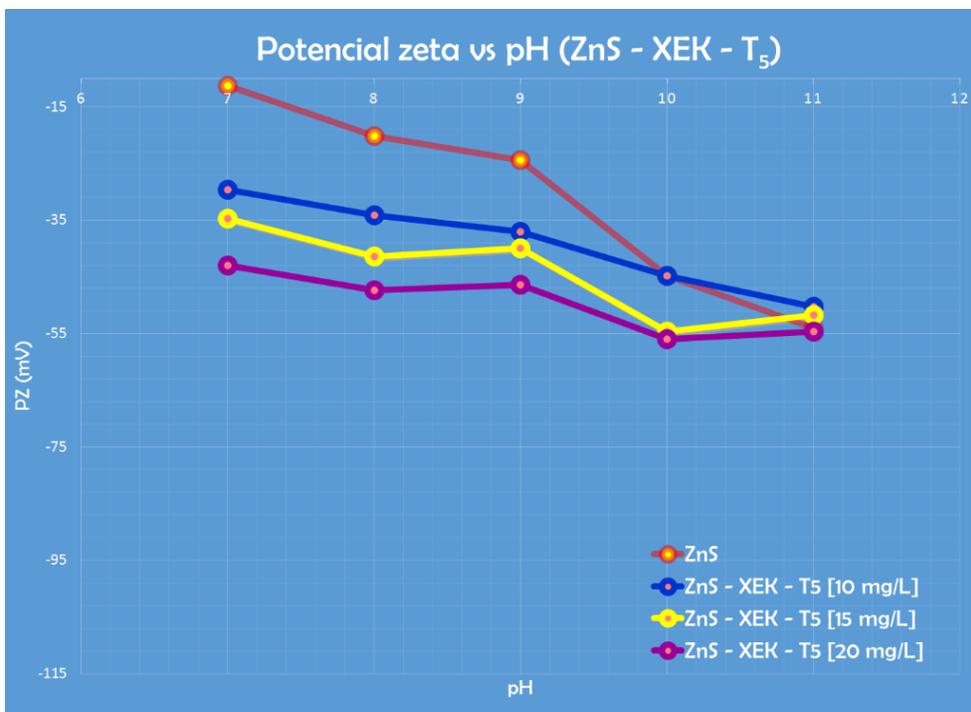


Figura 3.6 Representación del potencial zeta para esfalerita en función del pH, en ausencia de reactivos y presencia del colector-depresor T<sub>5</sub> [10, 15, y 20 mg/L].

La figura 3.6 muestra el comportamiento de la esfalerita-colector mezclada con tres concentraciones de depresor (T<sub>5</sub>). La esfalerita con colector y 10 mg/L de depresor muestra a pH neutro una escasa estabilidad (-29.6 mV) y a medida que el medio se vuelve básico la partícula va disminuyendo su potencial hasta pH 11 donde la partícula presenta una buena estabilidad (-50.3 mV), debido a que el pH básico favorece la quimisorción del colector sobre la partícula. La esfalerita con colector y 15 mg/L de depresor muestra que de pH neutro a pH 9 se estabiliza el comportamiento en moderada estabilidad de la partícula de esfalerita (-34.8 mV a 40 mV), en pH 10 y pH 11 el potencial de la partícula disminuye hasta una muy buena estabilidad (-54.6 mV), a esta concentración se observa una estabilización del comportamiento de la partícula



y se presenta fisisorción en el sistema. La esfalerita con colector y 20 mg/L de depresor muestra de pH neutro a pH 11 un comportamiento oscilante de buena a muy buena estabilidad de la partícula (-43 mV a -54.6 mV), debido a que el aumento en la concentración de depresor estabilizó a la partícula de esfalerita causado por atracciones electrostáticas o adsorción física.

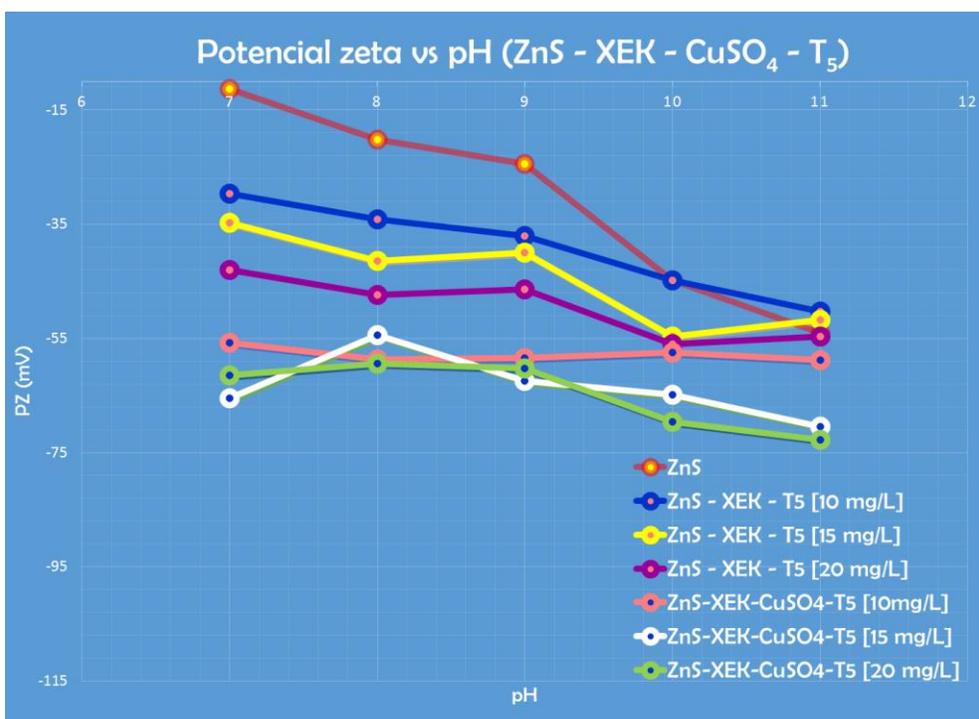


Figura 3.7 Representación del potencial zeta para esfalerita en función del pH, en ausencia de reactivos, presencia de colector-depresor T<sub>5</sub> [10, 15 y 20 mg/L] y presencia de activador-colector-depresor T<sub>5</sub> [10, 15 y 20 mg/L].

La figura 3.7 muestra el comportamiento de la esfalerita-colector-activador mezclada con tres concentraciones de depresor (T<sub>5</sub>). La esfalerita con colector, activador (CuSO<sub>4</sub>) y 10 mg/L de depresor a pH neutro muestra una muy buena estabilidad (-55.7 mV), la partícula presenta un comportamiento constante conforme se vuelve básico el





medio, a pH 11 la partícula conserva muy buena estabilidad (-58.8 mV). La esfalerita con colector, activador y 15 mg/L de depresor a pH neutro muestra una excelente estabilidad (-65.5 mV), a pH 8 se observa que la partícula aumenta su tendencia hacia aglomerarse por lo que presenta una escasa estabilidad (-54.4 mV) desde este punto la partícula aumenta su estabilidad a medida que aumenta el pH en la solución, a pH 11 la partícula presenta una excelente estabilidad (-70.4 mV). La esfalerita con colector, activador y 20 mg/L de depresor a pH neutro muestra una excelente estabilidad (-61.4 mV), a medida que la solución se torna alcalina la partícula de esfalerita se torna más estable, a pH 11 la partícula conserva su excelente estabilidad (-72.7 mV) debido al aumento de concentración de depresor. Este sistema se caracterizó por el comportamiento estable de la partícula con las tres concentraciones de depresor, como se observó en la Figura 3.6 el aumento de la concentración de depresor  $T_5$  promueve la estabilización en el comportamiento de la partícula de esfalerita, debido a que el depresor aumenta la adsorción física sobre la superficie de la misma. Se observa que el sistema esfalerita-colector-activador-depresor presenta mayor fisisorción sobre la partícula, además de un comportamiento más estable que el sistema esfalerita-colector-depresor, este fenómeno puede ser promovido por la adsorción del depresor sobre la partícula de esfalerita, que aumenta en función de la concentración del depresor y este puede fungir como catalizador en la reacción de sustitución de iones, durante en el proceso de activación de esfalerita ( $Zn^{2+} \rightarrow Cu^{2+}$ ), confiriendo una mayor flotabilidad a la partícula.



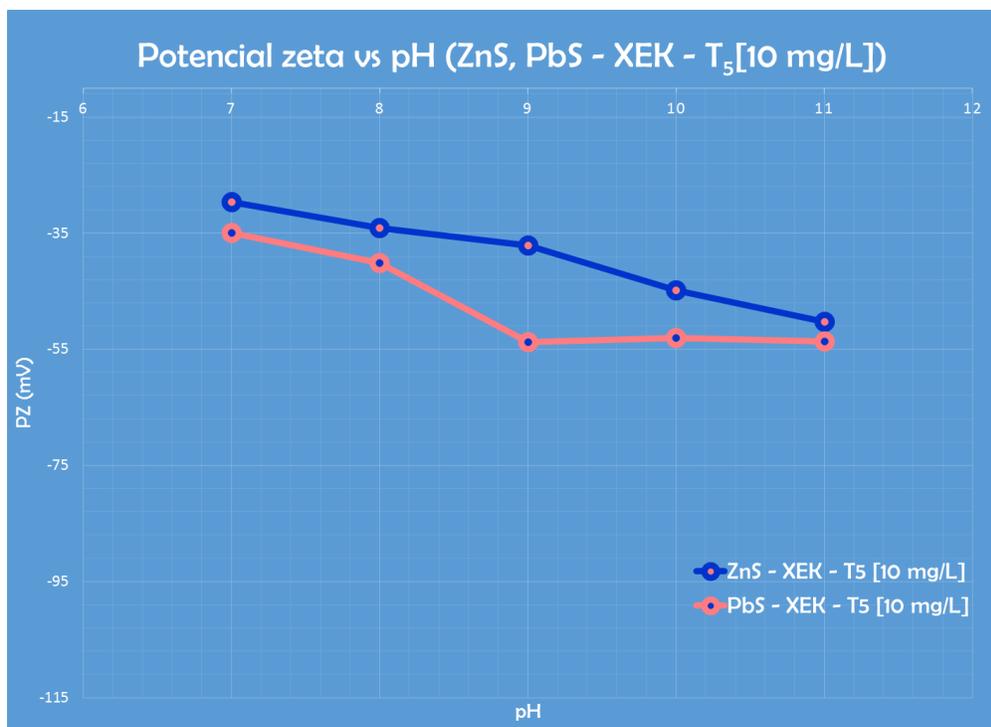


Figura 3.8 Comparación del potencial zeta en minerales de galena y esfalerita en función del pH, en presencia del colector y depresor T<sub>5</sub> [10 mg/L].

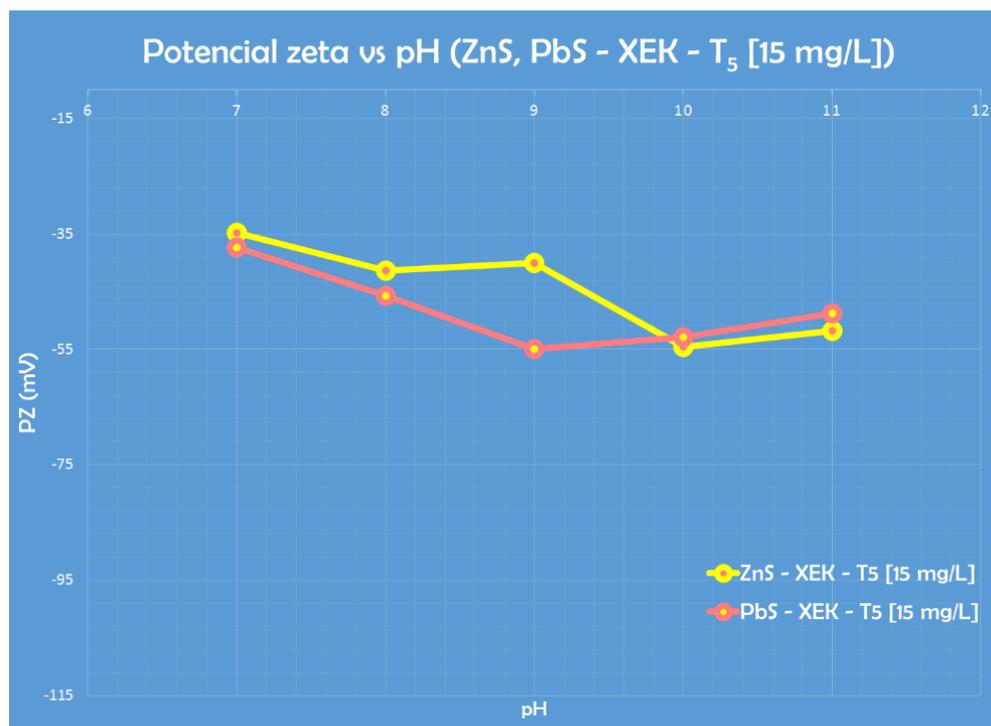


Figura 3.9 Comparación del potencial zeta en minerales de galena y esfalerita en función del pH, en presencia del colector y depresor T<sub>5</sub> [15 mg/L].



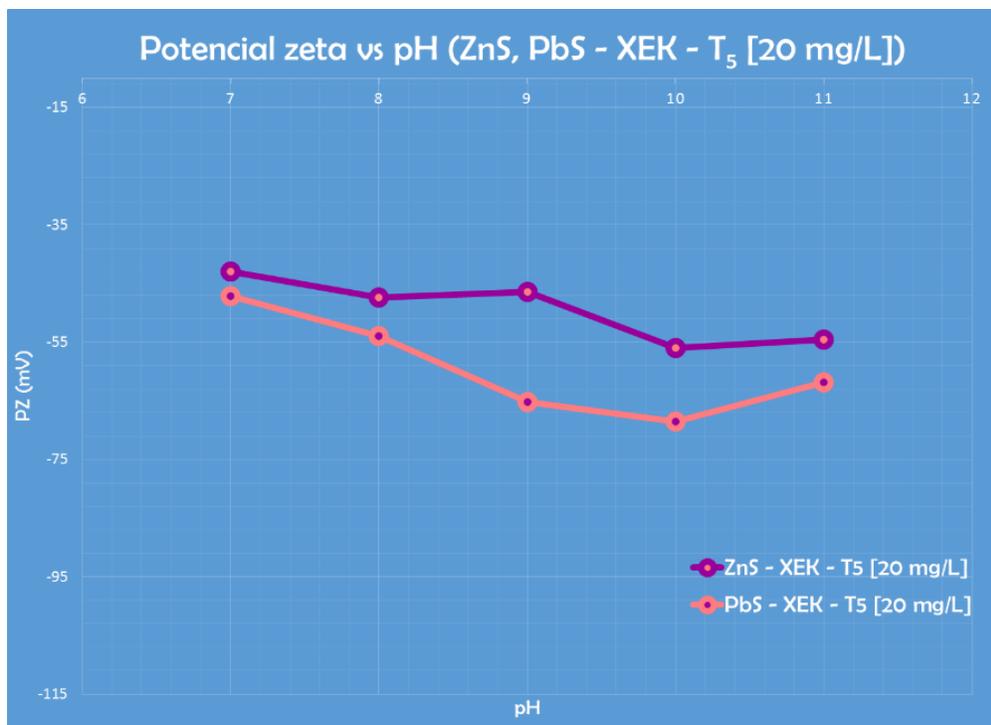


Figura 3.10 Comparación del potencial zeta en minerales de galena y esfalerita en función del pH, en presencia del colector y depresor T<sub>5</sub> [20 mg/L].

Las Figuras 3.8, 3.9 y 3.10 representan las pruebas de potencial zeta para identificar las mejores condiciones a realizar en el circuito de flotación selectiva. Se requiere recuperar, en un circuito de flotación primaria, el concentrado de Pb (flotando el Pb y deprimiendo Zn). Posteriormente, en un segundo circuito de flotación, con los estériles de Pb, se requiere flotar las partículas de Zn, para obtener el concentrado de Zn. Ambos concentrados con la mayor ley y recuperación posible.

Para emular los fenómenos de flotabilidad y depresión en la celda de flotación, se requiere que en las pruebas de potencial zeta a un mismo pH haya un alto gradiente en el potencial entre las partículas de Pb y Zn, debido a que se necesita que





el Pb tenga una flotabilidad alta y que el Zn tenga la mayor depresión posible en el circuito primario de Pb. Para el circuito primario de Zn, se necesita obtener el pH en el que el Zn tiene una mayor diferencia de potencial con respecto al punto de carga cero, lo que le confiere a la partícula una mayor estabilidad y por lo tanto una mejor flotabilidad.

La Figura 3.8 muestra los sistemas ZnS-XEK-T<sub>5</sub> [10 mg/L] y PbS-XEK-T<sub>5</sub> [10 mg/L]. Los dos sistemas tienen tendencia hacia comportamientos estables a medida que el medio se torna básico y son paralelos. La mayor diferencia de potencial entre ambos sistemas se encuentra a pH 9 (16.7 mV). La mayor diferencia de potencial entre el punto de carga cero y el sistema ZnS-XEK-T<sub>5</sub> [10 mg/L] se encuentra a pH 11 (50.3 mV). Con base a lo observado la predicción de las pruebas de potencial zeta muestran que para el circuito primario de Pb la mayor selectividad entre las partículas de Pb y Zn se encuentran a pH 9 y para el circuito primario de Zn, la mayor flotabilidad de la partícula de Zn se encuentra a pH 11.

La Figura 3.9 muestra los sistemas ZnS-XEK-T<sub>5</sub> [15 mg/L] y PbS-XEK-T<sub>5</sub> [15 mg/L]. Se observa que los dos sistemas tienen tendencia hacia la estabilidad a medida que se alcaliniza el medio, en el intervalo de pH 10 y 11, los sistemas se cruzan, por lo que en este intervalo la selectividad es escasa. La mayor diferencia de potencial entre ambos sistemas se encuentra a pH 9 (14.9 mV). La mayor diferencia de potencial entre el punto de carga cero y el sistema ZnS-XEK-T<sub>5</sub> [15 mg/L] se encuentra a pH 10 (52.9 mV). Con base a lo observado la predicción de las pruebas de potencial zeta





muestran que para el circuito primario de Pb la mayor selectividad entre las partículas de Pb y Zn se encuentran a pH 9 y para el circuito primario de Zn, la mayor flotabilidad de la partícula de Zn se encuentra a pH 10.

La Figura 3.10 muestra los sistemas ZnS-XEK-T<sub>5</sub> [20 mg/L] y PbS-XEK-T<sub>5</sub> [20 mg/L]. Los dos sistemas tienden hacia un comportamiento estable a medida que la solución se alcaliniza. Después de pH 8 la diferencia de potencial entre los sistemas es mayor que lo observado en las Figuras 3.9 y 3.10. La mayor diferencia de potencial entre ambos sistemas se encuentra a pH 9 (18.8 mV). La mayor diferencia de potencial entre el punto de carga cero y el sistema ZnS-XEK-T<sub>5</sub> [20 mg/L] se encuentra a pH 10 (56 mV). Con base a la Figura 3.10 la predicción de las pruebas de potencial zeta muestran que para el circuito primario de Pb la mayor selectividad entre las partículas de Pb y Zn se encuentran a pH 9 y para el circuito primario de Zn, la mayor flotabilidad de la partícula de Zn se encuentra a pH 10.



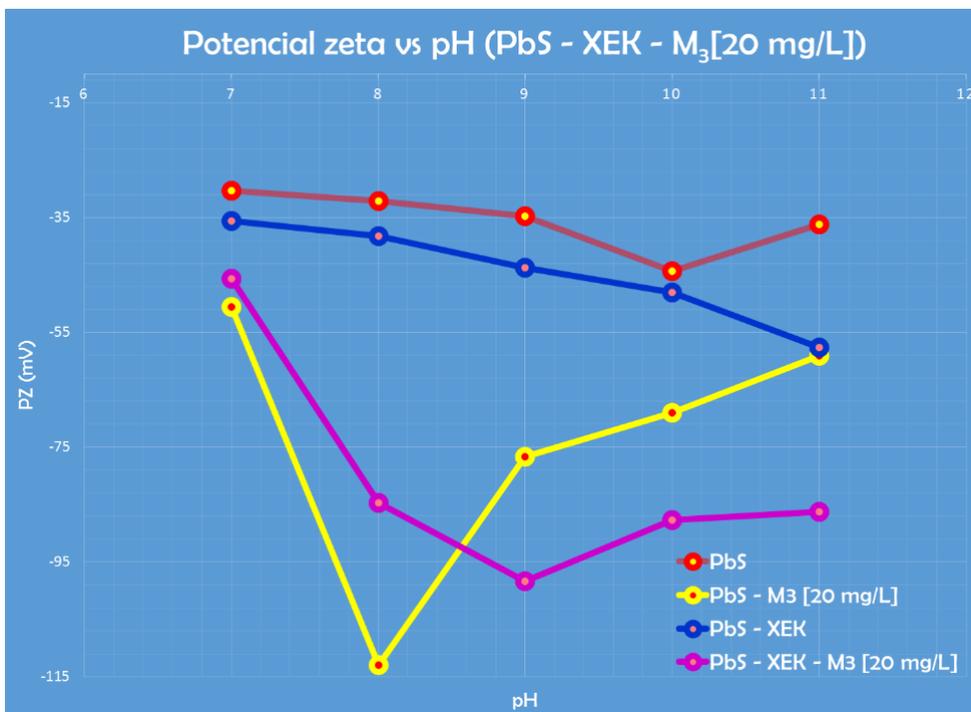


Figura 3.11 Representación del potencial zeta para galena en función del pH, en ausencia de reactivo, depresor  $M_3$  [20 mg/L], presencia de colector y colector-depresor  $M_3$  [20 mg/L].

La Figura 3.11 muestra el comportamiento de la galena en agua destilada, en presencia de colector, en presencia de depresor y la mezcla galena-colector-depresor ( $M_3$ ). El comportamiento de la galena con 20 mg/L de depresor muestra que a pH neutro la partícula presenta una buena estabilidad (-50.6 mV), a pH 8 la partícula disminuye su potencial drásticamente pues llega a la máxima estabilidad y flotabilidad (-113 mV), a pH 9 la partícula aumenta su potencial hasta una excelente estabilidad (-76.7 mV), desde este punto hasta pH 11 se observa que la partícula aumenta su potencial, llegando a una muy buena estabilidad (-59.1 mV), el comportamiento de este sistema muestra quimisorción entre la superficie de la partícula de galena y el depresor  $M_3$ . La galena con colector y 20 mg/L de depresor



( $M_3$ ) a pH neutro presenta una buena estabilidad (-45.7 mV), el potencial de la partícula disminuye hasta pH 9 donde se observa máxima estabilidad y flotabilidad de la partícula (-98.3 mV), a pH 9 se observa un punto de inflexión en el cual se desestabiliza la partícula hasta pH 11, aunque esta sigue en la zona de máxima estabilidad (-86.3 mV). El comportamiento del sistema muestra que la mezcla de colector-depresor se adsorbe sobre la superficie del mineral como quimisorción, aunque no en forma tan agresiva como la observada en el sistema galena-depresor.

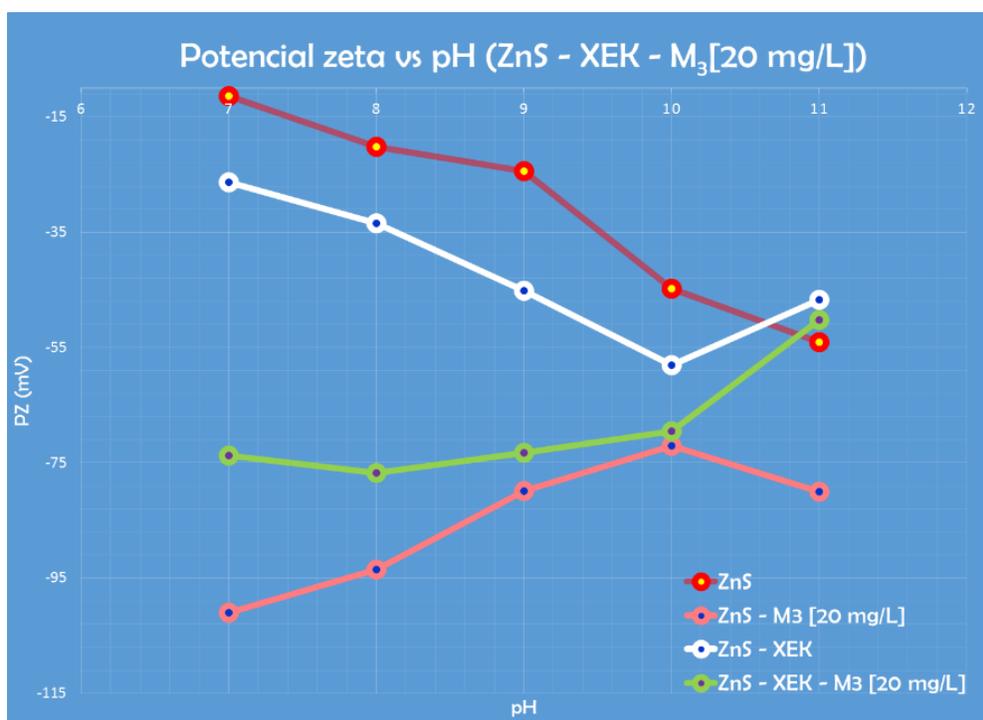


Figura 3.12 Representación del potencial zeta para esfalerita en función del pH, en ausencia de reactivo, depresor  $M_3$  [20 mg/L], presencia de colector y colector-depresor  $M_3$  [20 mg/L].

La Figura 3.12 muestra el comportamiento de la esfalerita en agua destilada, colector, de depresor y esfalerita-colector-depresor ( $M_3$ ). El comportamiento de la esfalerita con 20 mg/L



de depresor muestra que a pH neutro la partícula presenta máxima estabilidad y flotabilidad (-101 mV), a medida que el sistema se torna básico la partícula disminuye su potencial hasta pH 10 donde presenta una excelente estabilidad (-72.1 mV), en este punto se observa un punto de inflexión y la partícula adquiere un comportamiento más estable a pH 11 (-80.0 mV), el comportamiento de este sistema muestra quimisorción entre la superficie de la partícula de esfalerita y el depresor  $M_3$ . La esfalerita con colector y 20 mg/L de depresor ( $M_3$ ) a pH neutro presenta una excelente estabilidad (-73.7 mV), en función del aumento de alcalinidad en el medio aumenta la depresión de la partícula de galena hasta pH 11 donde aumento el potencial hasta una buena estabilidad (-50.2 mV). El comportamiento del sistema de pH 7 a pH 10 muestra que la mezcla de colector-depresor se adsorbe sobre la superficie del mineral como fisorción, aunque a pH 11 el comportamiento del sistema se torna más inestable por lo que

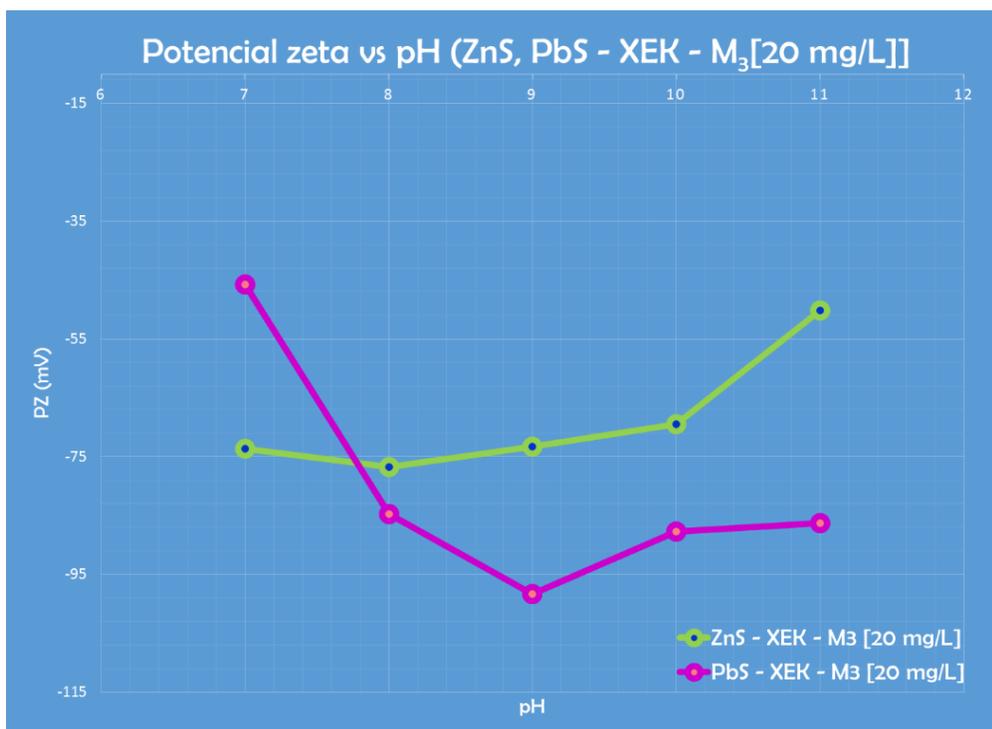


Figura 3.13 Comparación del potencial zeta en minerales de galena y esfalerita en función del pH, en presencia del colector-depresor  $M_3$  [20 mg/L].



La Figura 3.13 muestra los sistemas ZnS-XEK-M<sub>3</sub> [20 mg/L] y PbS-XEK-M<sub>3</sub> [20 mg/L]. Se observa que la partícula de galena muestra una mayor estabilidad que la partícula de esfalerita. Entre pH 7 y 8 los sistemas se cruzan, por lo que la selectividad en este rango es escasa. La mayor diferencia de potencial entre ambos sistemas se encuentra a pH 11 (36.1 mV). La mayor diferencia de potencial entre el punto de carga cero y el sistema ZnS-XEK-M<sub>3</sub> [20 mg/L] se encuentra a pH 8 (76.8 mV). Con base a la Figura 3.13 la predicción de las pruebas de potencial zeta muestran que para el circuito primario de Pb la mayor selectividad entre las partículas de Pb y Zn se encuentran a pH 11 y para el circuito primario de Zn, la mayor flotabilidad de la partícula de Zn se encuentra a pH 8.

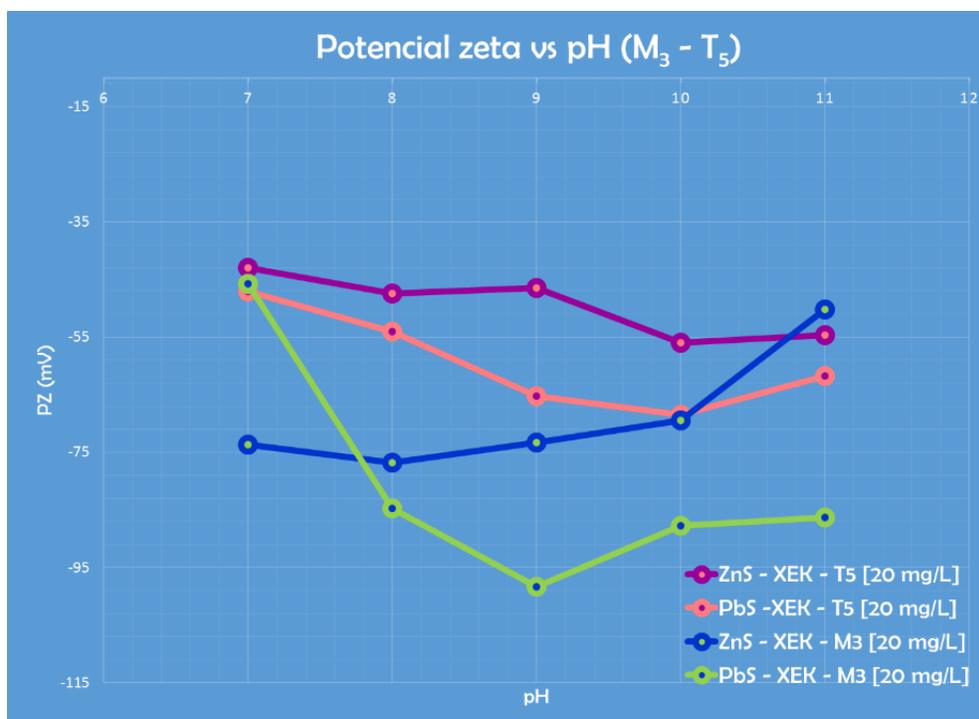


Figura 3.14 Comparación del potencial zeta en minerales de galena y esfalerita en función del pH, en presencia del colector-depresor M<sub>3</sub> [20 mg/L] y colector-depresor T<sub>5</sub> [20 mg/L].





La Figura 3.14 muestra los sistemas ZnS-XEK-M<sub>3</sub> [20 mg/L] y PbS-XEK-M<sub>3</sub> [20 mg/L] comparado con los sistemas ZnS-XEK-T<sub>5</sub> [20 mg/L] y PbS-XEK-T<sub>5</sub> [20 mg/L]. Se observa que el sistema con el reactivo depresor M<sub>3</sub> presenta mayores diferencias de potencial que las obtenidas con el reactivo depresor T<sub>5</sub>, por lo que el depresor M<sub>3</sub> tendría una mayor selectividad en el circuito de flotación primaria de plomo. El sistema que obtuvo una mayor diferencia de potencial entre el punto de carga cero y los sistemas mezclados con esfalerita, fue el que incluyó el reactivo depresor M<sub>3</sub>, por lo que este reactivo presentará una mayor flotabilidad de las partículas en el sistema de flotación primaria de zinc.



### 3.5 Flotación

Los valores de pH estudiados en las flotaciones, se eligieron con base a los mejores resultados obtenidos en las pruebas de potencial zeta.

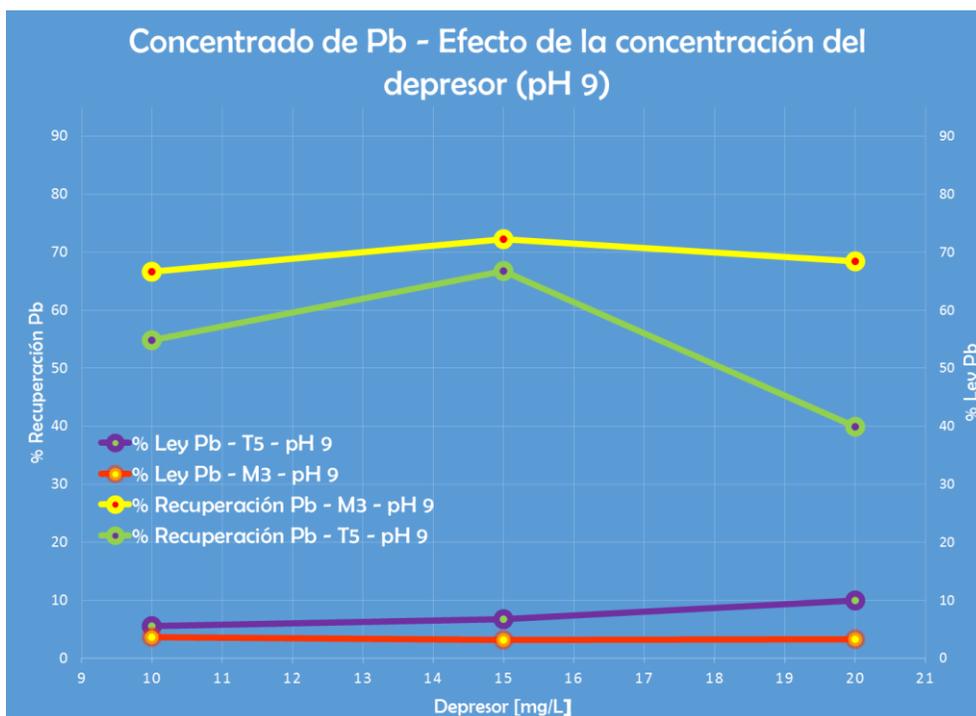


Figura 3.15 Efecto de la concentración del depresor en la ley y recuperación de PbS en el concentrado de Pb a pH 9.

La Figura 3.15 muestra el efecto de la concentración de los depresores T<sub>5</sub> y M<sub>3</sub> a pH 9 durante el proceso de flotación primaria de plomo. La ley más alta obtenida en el concentrado de plomo con el reactivo depresor T<sub>5</sub> fue de 10% Pb (39.91% de recuperación) con 20 mg/L y la mayor recuperación obtenida fue de 66.79% (6.7% de ley) con 15 mg/L de depresor. Sin embargo con el depresor M<sub>3</sub> la mayor ley alcanzada fue de 3.60% Pb (66.56% de recuperación) con 10 mg/L y la mayor recuperación obtenida fue de 72.29% (3.09% de ley) con 15 mg/L de depresor.



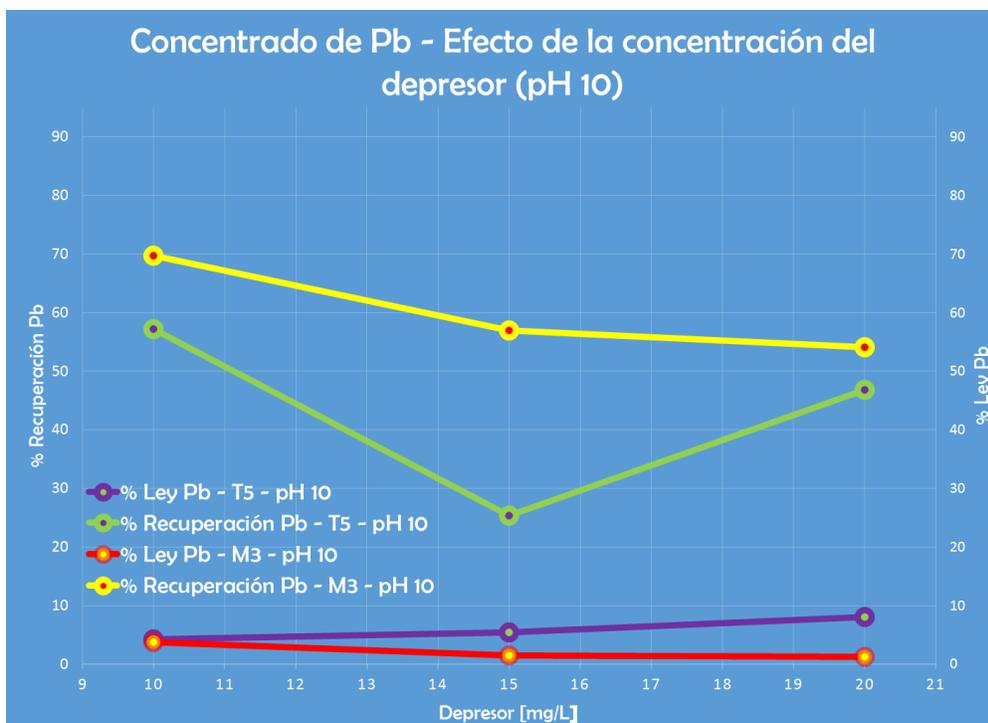


Figura 3.16 Efecto de la concentración del depresor en la ley y recuperación de PbS en el concentrado de Pb a pH 10.

La Figura 3.16 muestra el efecto de la concentración de los depresores T<sub>5</sub> y M<sub>3</sub> a pH 10 durante el proceso de flotación primaria de plomo. La ley más alta obtenida en el concentrado de plomo con el reactivo depresor T<sub>5</sub> fue de 8.01% (46.79% de recuperación) con 20 mg/L y la mayor recuperación obtenida fue de 57.14% (4.22% de ley) con 10 mg/L de depresor. Sin embargo con el depresor M<sub>3</sub> la mayor ley alcanzada fue de 3.76%Pb con una recuperación de 69.69% a la concentración de 10 mg/L.



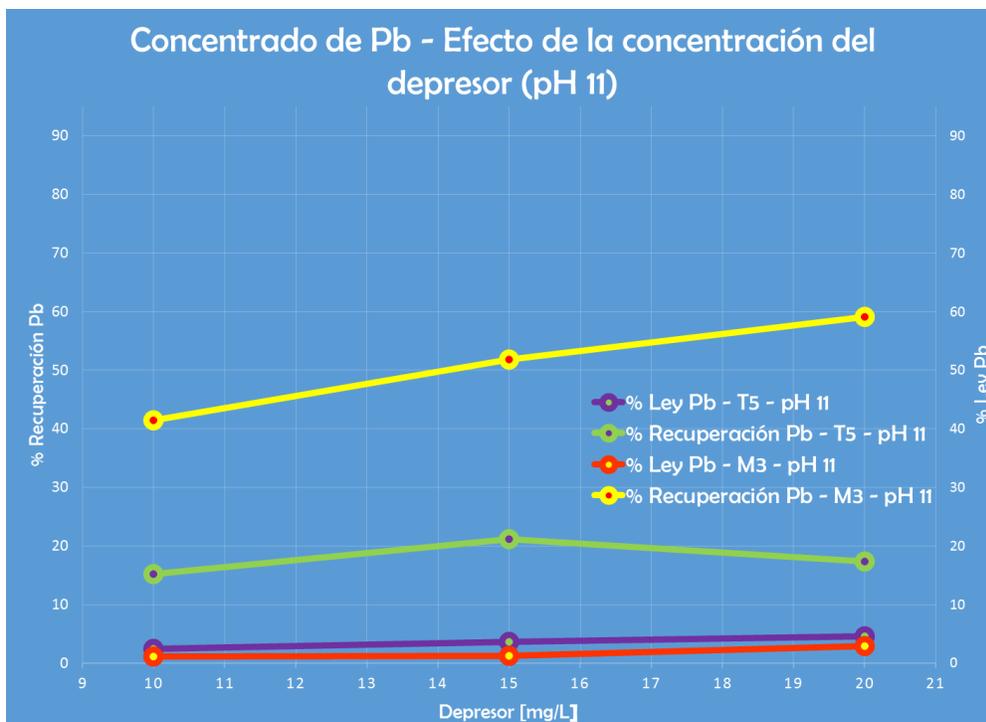


Figura 3.17 Efecto de la concentración del depresor en la ley y recuperación de PbS en el concentrado de Pb a pH 11.

La Figura 3.17 muestra el efecto de la concentración de los depresores T<sub>5</sub> y M<sub>3</sub> a pH 11 durante el proceso de flotación primaria de plomo. La ley más alta obtenida en el concentrado de plomo con el reactivo depresor T<sub>5</sub> fue de 4.53% Pb (17.30% de recuperación) con 20 mg/L y la mayor recuperación obtenida fue de 21.17% (3.62% de ley) con 15 mg/L de depresor. Sin embargo con el depresor M<sub>3</sub> la mayor ley alcanzada fue de 2.95% Pb con una recuperación del 59.16% respectivamente, a la concentración de 20 mg/L.

Las figuras 3.15, 3.16 y 3.17 muestran que el aumento de concentración de depresor T<sub>5</sub> favorece un aumento poco significativo en la ley del concentrado de plomo, el aumento en la concentración de depresor disminuye la recuperación de plomo de acuerdo a lo esperado. Para el reactivo depresor M<sub>3</sub>



se observa que el aumento en la concentración repercute en la ley de plomo, con un comportamiento en la recuperación similar al observado con el reactivo T<sub>5</sub>, debido a que no se sigue una tendencia clara, aunque las recuperaciones con M<sub>3</sub> presentan un comportamiento más estable que las observadas con T<sub>5</sub>.

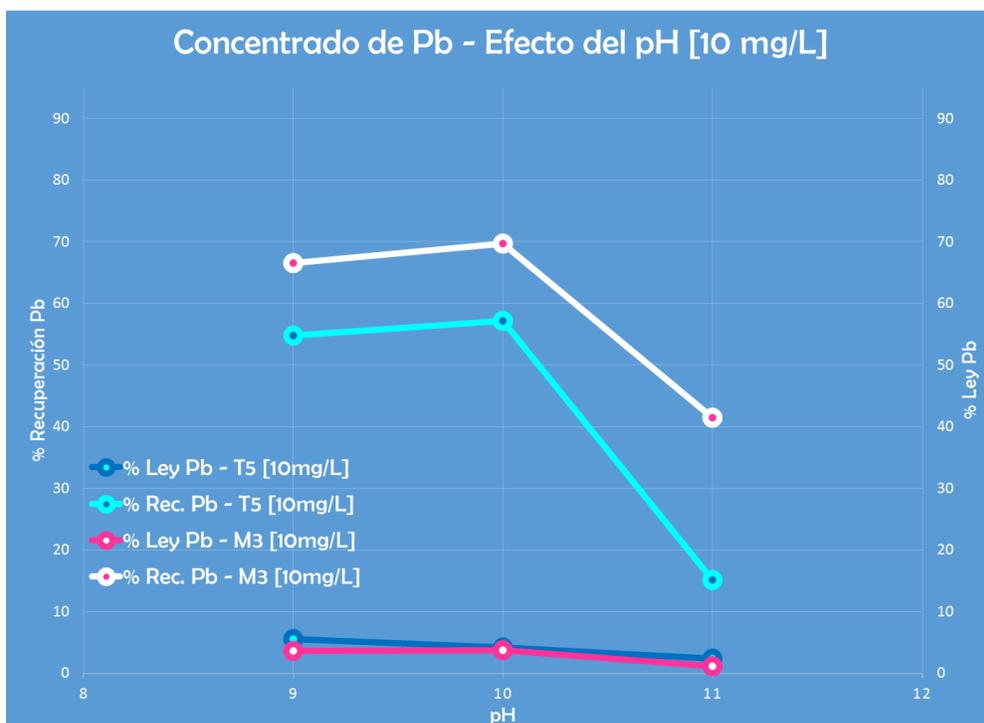


Figura 3.18 Efecto del pH en la ley y recuperación de PbS en el concentrado de Pb con [10 mg/L] de depresor.



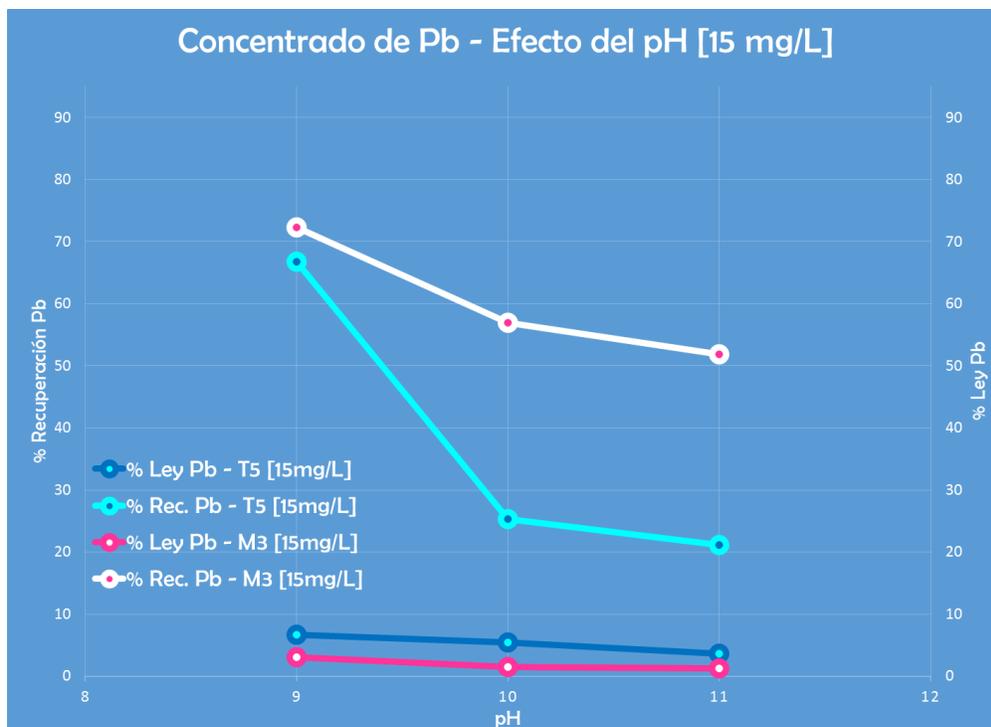


Figura 3.19 Efecto del pH en la ley y recuperación de PbS en el concentrado de Pb con [15 mg/L] de depresor.

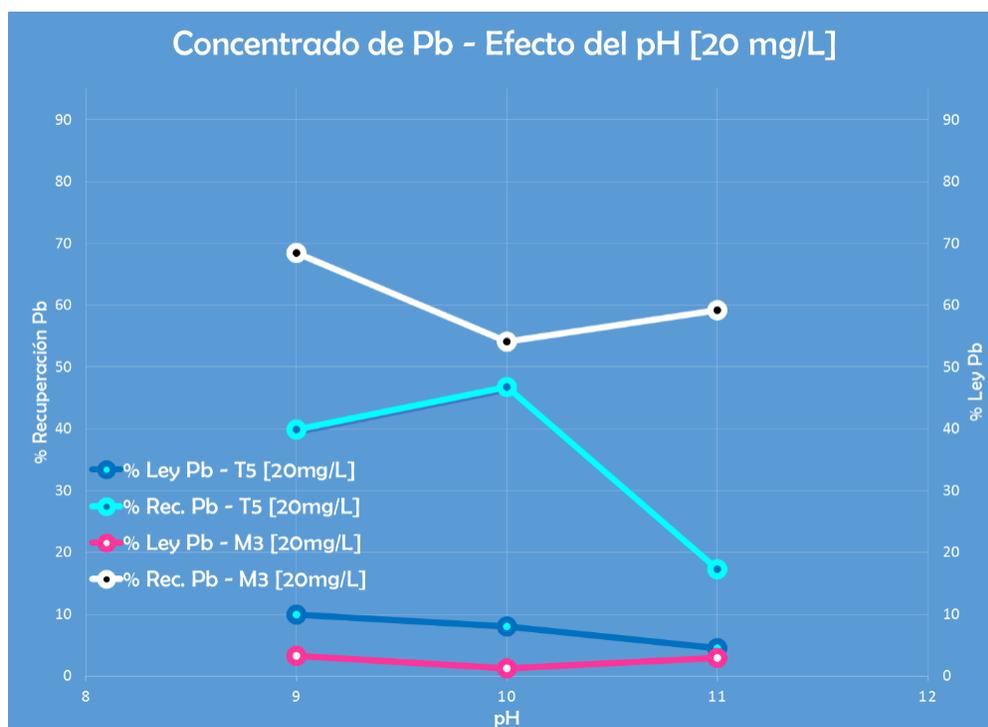


Figura 3.20 Efecto del pH en la ley y recuperación de PbS en el concentrado de Pb con [20 mg/L] de depresor.



Las figuras 3.18, 3.19 y 3.20 muestran el efecto del pH en función de la concentración de los depresores  $T_5$  y  $M_3$  durante el proceso de flotación primaria de plomo. Se observa que las mayores leyes y recuperaciones en los 3 sistemas [10, 15 y 20 mg/L] de  $T_5$  y  $M_3$ , se obtienen a pH 9 y en función de la alcalinización del medio, la ley y recuperación disminuyen.

Interpolando las pruebas realizadas en el circuito primario de plomo y las pruebas de potencial zeta, se comprobó que la mayor ley obtenida en el concentrado de Pb se encuentra a pH 9 con el reactivo depresor  $T_5$  con 20 mg/L. Se compara en forma prioritaria la ley, debido a que las pruebas de potencial zeta se realizan con minerales de alta pureza. Para el reactivo depresor  $M_3$ , las mayores leyes se obtienen también a pH 9, las pruebas de potencial zeta predecían que pH 11 se tendría la mayor ley en el concentrado, aunque a pH 9 los sistemas de Pb y Zn muestran una diferencia de potencial notable (Figura 3.13).

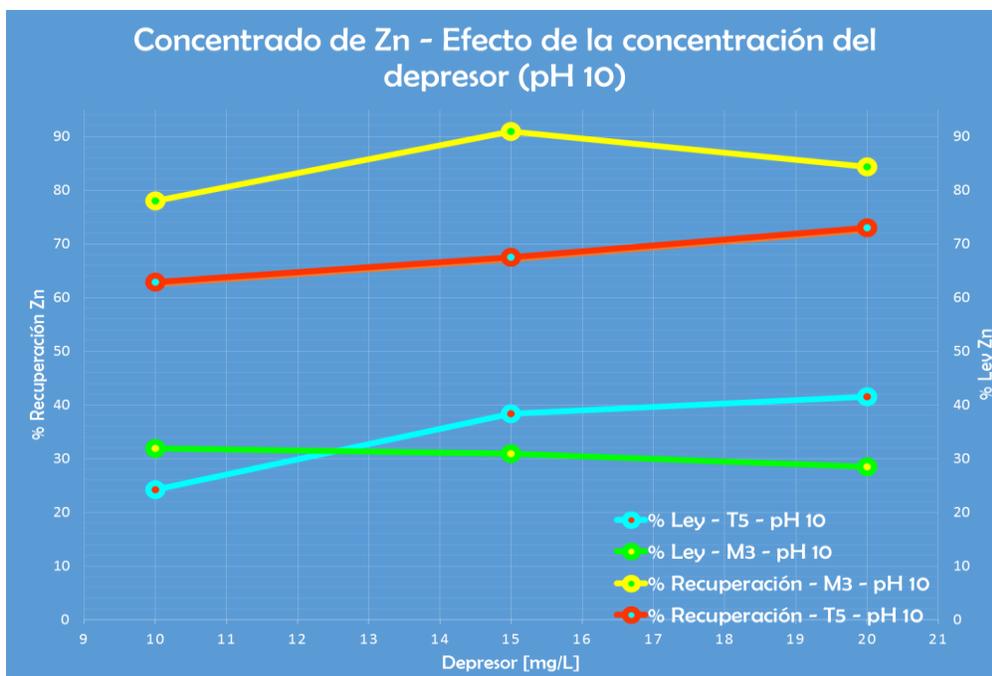


Figura 3.21 Efecto de la concentración del depresor en la ley y recuperación de ZnS en el concentrado de Zn a pH 10.



La Figura 3.21 muestra el efecto de la concentración de depresor  $T_5$  y  $M_3$  a pH 10 durante el proceso de flotación primaria de zinc. La mayor ley y recuperación obtenida en el concentrado de zinc con el reactivo depresor  $T_5$  fue de 41.58% y 72.97% respectivamente, con 20 mg/L. Para el reactivo depresor  $M_3$  la mayor ley obtenida en el concentrado de zinc fue de 31.90% (77.98% de recuperación) con 10 mg/L y la mayor recuperación obtenida fue de 90.97% (30.88% de ley) con 15 mg/L de depresor.

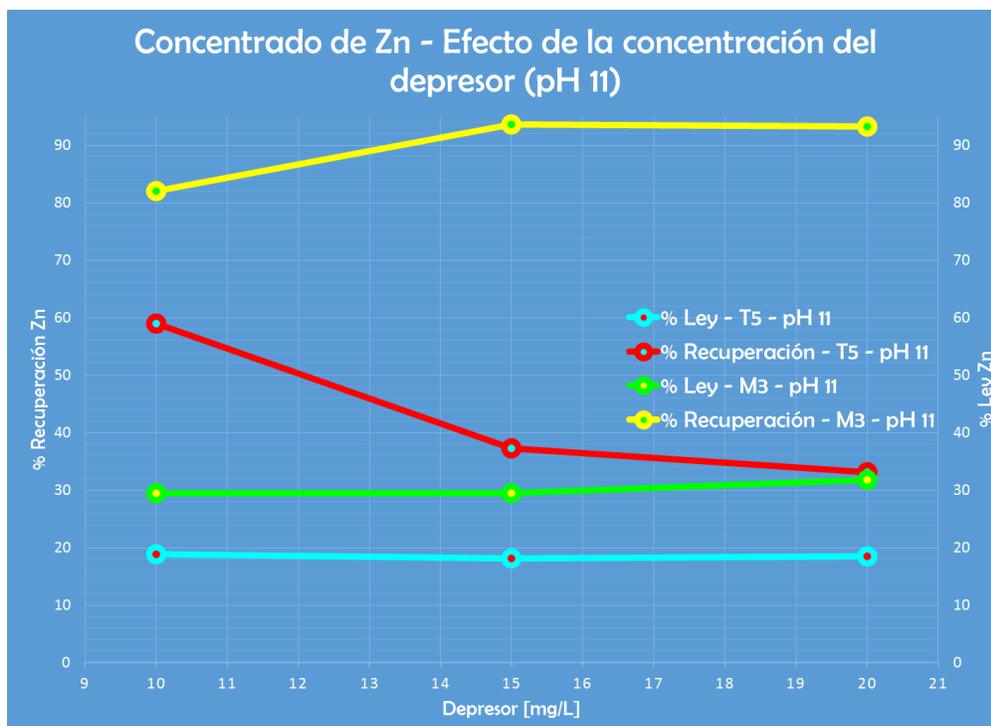


Figura 3.22 Efecto de la concentración del depresor en la ley y recuperación de ZnS en el concentrado de Zn a pH 11.

La Figura 3.22 muestra el efecto de la concentración de depresor  $T_5$  y  $M_3$  a pH 11 durante el proceso de flotación primaria de zinc. La mayor ley y recuperación obtenida en el concentrado de zinc con el reactivo depresor  $T_5$  fue de 18.90% y 58.99% respectivamente, con 10 mg/L. Para el reactivo depresor  $M_3$  la mayor ley obtenida en el concentrado de zinc





fue de 31.74% (93.21% de recuperación) con 20 mg/L y la mayor recuperación obtenida fue de 93.56% (29.52% de ley) con 15 mg/L de depresor.

La mayor ley alcanzada en el circuito de flotación primaria de zinc se obtuvo a pH 10 con 20 mg/L de T<sub>5</sub>, este resultado está en armonía con lo obtenido en las pruebas de potencial zeta. Los resultados con el reactivo depresor M<sub>3</sub> también son consistentes, debido a que potencial zeta predecía una alta flotabilidad de la partícula de Zn a pH 10.

Las pruebas de flotación realizadas muestran que las mayores leyes se obtienen con el reactivo depresor T<sub>5</sub>, las mayores recuperaciones se obtienen con el reactivo depresor M<sub>3</sub> y la relación ley-recuperación es más alta con el reactivo depresor M<sub>3</sub>.

Las mayores recuperaciones obtenidas con el reactivo M<sub>3</sub> con respecto al reactivo T<sub>5</sub> en la flotación primaria de zinc, se pueden deber, a que la molécula de T<sub>5</sub> tiene más grupos hidroxilo en su superficie, lo que le confiere una mayor mojabilidad a las partículas minerales, por lo que hay una menor recuperación de las partículas. El comportamiento muestra que la recuperación de Zn podría aumentar a un mayor tiempo de acondicionamiento con el activador CuSO<sub>4</sub>.





## 4. CONCLUSIONES

- La técnica de potencial zeta ofrece una predicción acertada del comportamiento de las partículas minerales durante el proceso de flotación.
- Los reactivos depresores *Schinopsis lorentzii* ( $T_5$ ) y *Schinopsis balansae* ( $M_3$ ) molecularmente, tienen en su exterior una gran cantidad de grupos hidroxilo, los cuales forman puentes de hidrógeno entre la carga superficial de la partícula de esfalerita y el colector, lo cual permite la mojabilidad de la partícula confiriéndole un comportamiento depresivo.
- El reactivo depresor *Schinopsis lorentzii* ( $T_5$ ) promueve la flotabilidad de la partícula de galena durante el proceso de flotación primaria de plomo.
- La interacción entre la superficie mineral y el reactivo colector XEK se lleva a cabo por medio de quimisorción, mientras que la interacción entre la superficie mineral y el reactivo depresor *Schinopsis lorentzii* ( $T_5$ ), se lleva a cabo por medio de fisorción.
- La concentración de 20 mg/L de *Schinopsis lorentzii* ( $T_5$ ), obtuvo las mayores leyes en el concentrado de Pb y Zn.
- Las mayores recuperaciones se obtienen con el reactivo depresor *Schinopsis balansae* ( $M_3$ ).





- El mayor porcentaje de la relación ley-recuperación en los concentrados de Pb y Zn se obtiene con el reactivo depresor *Schinopsis balansae* ( $M_3$ ), esto se debe a que el reactivo *Schinopsis lorentzii* ( $T_5$ ) tiene mayor número de iones hidroxilo.





## 5. BIBLIOGRAFÍA

[1] *Potencial Zeta* [en línea]. México: Ángeles Méndez, 21 de enero del 2011. [Consulta: 9 de julio del 2014]. Disponible en: <<http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/potencial-zeta>>

[2] "Electrical Phenomena at Interfaces". En: Lloyd I. Osipow. *Surface Chemistry: Theory and Industrial Applications*. Londres, Krieger, 1972, p. 78-96.

[3] "Definition of electrokinetic potential in IUPAC". En: A. D. McNaught & A. Wilkinson. *Compendium of Chemical Terminology*. Segunda edición. Oxford, 1997, p. 971.

[4] Zeta-Meter, Inc. *Potencial Zeta: Un Curso Completo en 5 Minutos* [en línea]. Virginia, Staunton: Zeta-Meter, Inc., [Consulta: 24 de junio del 2014]. Disponible en: <<http://www.zeta-meter.com/5min.pdf>>

[5] *Zeta Potential – Electrophoresis* [en línea]. United Kingdom: Leeds Innovation Centre [Consulta: 22 de Julio del 2014]. Disponible en: <[http://www.escubed.co.uk/sites/default/files/zeta\\_potential\\_\(an011\)\\_electrophoresis.pdf](http://www.escubed.co.uk/sites/default/files/zeta_potential_(an011)_electrophoresis.pdf)>

[6] *¿Cómo ayuda el Potencial Zeta en las formulaciones de suspensiones y emulsiones?* [en línea]. Mexico: Quiminet, 26 de julio del 2007. [Consulta: 9 de julio del 2014]. Disponible en: <<http://www.quiminet.com/articulos/como-ayuda-el-potencial-zeta-en-las-formulaciones-de-suspensiones-y-emulsiones-21731.htm>>





[7] "Basic Concepts: Rule of Thumb". En: Zeta-Meter. Inc. *Zeta-Meter System 3.0: Operating Instructions*. Tercera revisión. Virginia, Staunton. ZETA UI, 1992, p. 12.

[8] "Principios de la Flotación de Minerales". En: Nataniel Linares G. *Procesamiento de Minerales–Mineralurgia II*. MSC. Chile, 2008, p. 4.

[9] "Química de superficies y coloides". En: Alexander Findlay & B.P. Levitt. *Química física practica de Findlay*. Novena edición. Escocia, 1979, p. 413.

[10] *Apuntes de Concentración de Minerales I* [en línea]. Chile: Osvaldo Pavez, 2008. [Consulta: 18 de marzo del 2014]. Disponible en: <http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/Pavez/APUNTES%20DE%20CONCENTRACION%20DE%20MINERALES%20I.pdf>

[11] *Critical Micelle Concentration* [en línea]. Suecia: Biolin Scientific, 2007. [Consulta: 13 de agosto del 2014]. Disponible en: <http://www.biolinscientific.com/application/critical-micelle-concentration-measurement/>

[12] *Surfactant* [en línea]. Japón: Taga Group, 2012. [Consulta: 31 de julio del 2014]. Disponible en: [http://www.ach.nitech.ac.jp/~physchem/taga/1tagag\\_e.html](http://www.ach.nitech.ac.jp/~physchem/taga/1tagag_e.html)

[13] *The Contact Angle and the Beading Effect* [en línea]. Estados Unidos: Cenano, 2008. [Consulta: 6 de mayo del 2014]. Disponible en: <http://www.cenano.net/be-green/>





[14] "Sulphide Mineral Flotation". En: Ronald D. Crozier. *Flotation: Theory Reagents and Ore Testing*. Oxford, U.K. Pergamon Press. 1992, p. 44.

[15] Bravo Galvez Antonio. *Manual de Flotación: Unidad Minera Yauliyacu*. Perú: Casapalca, 2014.

[16] "Metallurgy". En: K. Singh. *Problems and Solutions in Chemistry for IIT-JEE*. Nueva Delhi. Tata McGraw-Hill, 2010, p. 1411.

[17] Impacto Ambiental Debido al Uso del Cianuro en la Minería a Cielo Abierto: Cianuro, Metales Pesados y Drenaje Ácido [en línea]. Argentina: Silvia González y Marta Sahores, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco UNPat SJB, 2004. [Consulta: 14 de marzo del 2014]. Disponible en: <<http://www.aldeah.org/files/IMPACTOS-CIANURO-AGUA-MINA.pdf>>

[18] Pieter B. Venter, Mirek Sisa, Marthinus J. van der Merwe, Susan L. Bonnet, Jan H. van der Westhuizen. "Analysis of commercial proanthocyanidins. Part 1: The chemical composition of quebracho (*Schinopsis lorentzii* and *Schinopsis balansae*) heartwood extract". *Phytochemistry* [en línea], 2012, Volumen 73, p. 95-105 [Consulta: 14 de marzo del 2014]. Disponible en: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031942211004742> >

[19] P. Sarquís; V. Ciribeni; M. Gonzalez. Depresión Selectiva de Sulfuros Usando Extractos Naturales [en línea]. Argentina: CONAMET, 7 de septiembre 2007. [Consulta: 14 de marzo del 2014]. Disponible en: <<http://www.materiales->





sam.org.ar/sitio/biblioteca/CONAMET-SAM2007/sam%20conamet%2007/pdf/T%C3%B3pico%201%20-%20Metalurgia%20Extractiva%20y%20de%20Elaboraci%C3%B3n/01-06%20Sarqu%C3%ADs%20P.%20(O).pdf>

[20] “Flotación por Espuma”. En: Barry Alan Wills, Antonio Huerta Cerdán. Tecnología de Procesamiento de Minerales: Tratamiento de Menas y Recuperación de Minerales. Séptima edición. Estados Unidos: Butterworth-Heinemann, 2006, p. 278.

[21] Cámara Minera de México. Situación de la Minería Mexicana en 2013 [en línea]. Mexico: CAMIMEX, 2014. [Consulta: 3 de agosto del 2014]. Disponible en: <  
[https://camimex.org.mx/files/9714/0544/1072/situacion\\_de\\_la\\_mineria.pdf](https://camimex.org.mx/files/9714/0544/1072/situacion_de_la_mineria.pdf)>



## 6. ANEXOS

### 6.1 Balance Metalúrgico

Flotación 1								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	10.50	5.54	5.57	37.63	0.58	3.95	54.83	24.62
T Pb	179.10	94.46	0.27	6.75	0.48	12.09	45.17	75.38
C Zn	18.20	10.16	0.68	44.64	0.12	8.13	25.86	67.18
T Zn	160.90	89.84	0.22	2.47	0.36	3.97	74.14	32.82
F	189.60	100.00	0.56	8.46	1.07	16.05	100.00	100.00

Tabla 6. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 9, Primaria de Zn: pH 11) con  $T_5$  [10 mg/L].

Flotación 2								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	13.20	6.78	4.23	11.94	0.56	1.58	57.14	12.57
T Pb	181.60	93.22	0.23	6.03	0.42	10.96	42.86	87.43
C Zn	20.70	11.40	0.40	18.91	0.08	3.91	19.68	35.71
T Zn	160.90	88.60	0.21	4.38	0.34	7.04	80.32	64.29
F	194.80	100.00	0.50	6.43	0.98	12.53	100.00	100.00

Tabla 7. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 10, Primaria de Zn: pH 11) con  $T_5$  [10 mg/L].

Flotación 3								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	6.50	3.38	2.42	12.64	0.16	0.82	15.20	8.22
T Pb	186.00	96.62	0.47	4.93	0.88	9.17	84.80	91.78
C Zn	28.60	15.38	1.20	18.91	0.34	5.41	39.27	58.99
T Zn	157.40	84.62	0.34	2.39	0.53	3.76	60.73	41.01
F	192.50	100.00	0.54	5.19	1.03	9.99	100.00	100.00

Tabla 8. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 11, Primaria de Zn: pH 11) con  $T_5$  [10 mg/L].



Flotación 4								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	10.60	5.38	6.72	12.74	0.71	1.35	66.79	9.18
T Pb	186.40	94.62	0.19	7.16	0.35	13.35	33.21	90.82
C Zn	25.30	13.57	0.26	17.91	0.07	4.53	18.49	33.95
T Zn	161.10	86.43	0.18	5.47	0.29	8.82	81.51	66.05
F	197.00	100.00	0.54	7.46	1.07	14.70	100.00	100.00

Tabla 9. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 9, Primaria de Zn: pH 11) con  $T_5$  [15 mg/L].

Flotación 5								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	5.10	2.63	5.45	12.14	0.28	0.62	25.28	3.90
T Pb	188.90	97.37	0.44	8.08	0.82	15.27	74.72	96.10
C Zn	24.00	12.71	1.37	18.51	0.33	4.44	40.10	29.09
T Zn	164.90	87.29	0.30	6.57	0.49	10.83	59.90	70.91
F	194.00	100.00	0.57	8.19	1.10	15.89	100.00	100.00

Tabla 10. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 10, Primaria de Zn: pH 11) con  $T_5$  [15 mg/L].

Flotación 6								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	6.30	3.24	3.62	12.83	0.23	0.81	21.17	6.12
T Pb	188.40	96.76	0.45	6.58	0.85	12.40	78.83	93.88
C Zn	25.50	13.54	1.23	18.11	0.31	4.62	37.03	37.25
T Zn	162.90	86.46	0.33	4.78	0.53	7.78	62.97	62.75
F	194.70	100.00	0.55	6.78	1.08	13.21	100.00	100.00

Tabla 11. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 11, Primaria de Zn: pH 11) con  $T_5$  [15 mg/L].

Flotación 7								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	5.00	2.62	10.00	12.44	0.50	0.62	39.92	3.86
T Pb	185.60	97.38	0.41	8.36	0.75	15.51	60.08	96.14
C Zn	27.80	14.98	0.62	18.51	0.17	5.14	22.79	33.18
T Zn	157.80	85.02	0.37	6.57	0.58	10.36	77.21	66.82
F	190.60	100.00	0.66	8.46	1.25	16.13	100.00	100.00

Tabla 12. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 9, Primaria de Zn: pH 11) con  $T_5$  [20 mg/L].



Flotación 8								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	6.10	3.21	8.02	12.44	0.49	0.76	46.79	4.30
T Pb	183.70	96.79	0.30	9.19	0.56	16.87	53.21	95.70
C Zn	11.60	6.23	1.10	18.51	0.13	2.15	23.03	12.72
T Zn	172.10	93.69	0.25	8.56	0.43	14.73	76.97	87.28
F	189.80	100.00	0.55	9.29	1.05	17.63	100.00	100.00

Tabla 13. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 10, Primaria de Zn: pH 11) con  $T_5$  [20 mg/L].

Flotación 9								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	3.90	2.05	4.54	12.04	0.18	0.47	17.31	3.00
T Pb	186.30	97.95	0.45	8.15	0.85	15.18	82.69	97.00
C Zn	22.70	12.18	1.21	18.11	0.28	4.11	32.60	27.08
T Zn	163.60	87.82	0.35	6.77	0.57	11.07	67.40	72.92
F	190.20	100.00	0.54	8.23	1.02	15.65	100.00	100.00

Tabla 14. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 11, Primaria de Zn: pH 11) con  $T_5$  [20 mg/L].

Flotación 10								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	7.60	3.97	6.33	34.28	0.48	2.61	44.28	23.75
T Pb	183.80	96.03	0.33	4.55	0.61	8.36	55.72	76.25
C Zn	21.70	11.81	0.72	24.25	0.16	5.26	25.75	62.94
T Zn	162.10	88.19	0.28	1.91	0.45	3.10	74.25	37.06
F	191.40	100.00	0.57	5.73	1.09	10.97	100.00	100.00

Tabla 15. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 11, Primaria de Zn: pH 10) con  $T_5$  [10 mg/L].

Flotación 11								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	11.90	6.24	5.97	30.91	0.71	3.68	57.14	21.88
T Pb	178.90	93.76	0.30	7.34	0.53	13.13	42.86	78.12
C Zn	23.10	12.91	0.46	38.35	0.11	8.86	19.86	67.47
T Zn	155.80	87.09	0.27	2.74	0.43	4.27	80.14	32.53
F	190.80	100.00	0.65	8.81	1.24	16.81	100.00	100.00

Tabla 16. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 9, Primaria de Zn: pH 10) con  $T_5$  [15 mg/L].



### Flotación 12

Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	7.90	4.11	7.36	11.94	0.58	0.94	53.27	6.41
T Pb	184.30	95.89	0.28	7.47	0.51	13.77	46.73	93.59
C Zn	22.60	12.26	0.48	18.91	0.11	4.27	21.15	31.04
T Zn	161.70	87.74	0.25	5.87	0.40	9.49	78.85	68.96
F	192.20	100.00	0.57	7.65	1.09	14.71	100.00	100.00

Tabla 17. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 10, Primaria de Zn: pH 9) con **T<sub>5</sub>** [20 mg/L].

### Flotación 13

Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	13.90	6.08	3.61	26.68	0.50	3.71	66.57	36.23
T Pb	214.80	93.92	0.12	3.04	0.25	6.53	33.43	63.77
C Zn	18.20	8.47	0.31	29.44	0.06	5.36	22.70	82.08
T Zn	196.60	91.53	0.10	0.60	0.19	1.17	77.30	17.92
F	228.70	100.00	0.33	4.48	0.75	10.24	100.00	100.00

Tabla 18. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 9, Primaria de Zn: pH 11) con **M<sub>3</sub>** [10 mg/L].

### Flotación 14

Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	14.80	7.14	3.77	25.77	0.56	3.81	69.69	39.30
T Pb	192.50	92.86	0.13	3.06	0.24	5.89	30.31	60.70
C Zn	15.50	8.05	0.32	28.94	0.05	4.49	20.40	76.17
T Zn	177.00	91.95	0.11	0.79	0.19	1.40	79.60	23.83
F	207.30	100.00	0.39	4.68	0.80	9.70	100.00	100.00

Tabla 19. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 10, Primaria de Zn: pH 11) con **M<sub>3</sub>** [10 mg/L].

### Flotación 15

Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	16.20	7.07	1.11	19.80	0.18	3.21	41.48	38.53
T Pb	213.00	92.93	0.12	2.40	0.25	5.12	58.52	61.47
C Zn	20.50	9.62	0.22	21.28	0.05	4.36	17.96	85.22
T Zn	192.50	90.38	0.11	0.39	0.21	0.76	82.04	14.78
F	229.20	100.00	0.19	3.63	0.43	8.33	100.00	100.00

Tabla 20. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 11, Primaria de Zn: pH 11) con **M<sub>3</sub>** [10 mg/L].



Flotación 16								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	16.80	7.29	3.10	23.88	0.52	4.01	72.29	48.29
T Pb	213.50	92.71	0.09	2.01	0.20	4.30	27.71	51.71
C Zn	14.10	6.60	0.30	27.67	0.04	3.90	20.95	90.81
T Zn	199.40	93.40	0.08	0.20	0.16	0.39	79.05	9.19
F	230.30	100.00	0.31	3.61	0.72	8.31	100.00	100.00

Tabla 21. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 9, Primaria de Zn: pH 11) con  $M_3$  [15 mg/L].

Flotación 17								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	15.80	6.81	1.46	19.86	0.23	3.14	56.91	35.84
T Pb	216.30	93.19	0.08	2.60	0.17	5.62	43.09	64.16
C Zn	17.80	8.23	0.17	29.53	0.03	5.26	17.02	93.57
T Zn	198.50	91.77	0.07	0.18	0.14	0.36	82.98	6.43
F	232.10	100.00	0.17	3.77	0.41	8.76	100.00	100.00

Tabla 22. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 10, Primaria de Zn: pH 11) con  $M_3$  [15 mg/L].

Flotación 18								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	17.50	7.62	1.21	21.70	0.21	3.80	51.82	40.51
T Pb	212.30	92.38	0.09	2.63	0.20	5.58	48.18	59.49
C Zn	18.70	8.81	0.25	27.81	0.05	5.20	23.50	93.26
T Zn	193.60	91.19	0.08	0.19	0.15	0.38	76.50	6.74
F	229.80	100.00	0.18	4.08	0.41	9.37	100.00	100.00

Tabla 23. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 11, Primaria de Zn: pH 11) con  $M_3$  [15 mg/L].

Flotación 19								
Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	16.10	7.04	3.30	27.05	0.53	4.36	68.46	45.64
T Pb	212.70	92.96	0.11	2.44	0.24	5.19	31.54	54.36
C Zn	15.80	7.43	0.31	30.36	0.05	4.80	20.24	92.48
T Zn	196.90	92.57	0.10	0.20	0.19	0.39	79.76	7.52
F	228.80	100.00	0.34	4.17	0.77	9.54	100.00	100.00

Tabla 24. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 9, Primaria de Zn: pH 11) con  $M_3$  [20 mg/L].



### Flotación 20

Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	16.80	7.31	1.28	19.98	0.21	3.36	54.16	40.29
T Pb	212.90	92.69	0.09	2.34	0.18	4.97	45.84	59.71
C Zn	17.20	8.08	0.18	26.73	0.03	4.60	16.89	92.45
T Zn	195.70	91.92	0.08	0.19	0.15	0.38	83.11	7.55
F	229.70	100.00	0.17	3.63	0.40	8.33	100.00	100.00

Tabla 25. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 10, Primaria de Zn: pH 11) con  $M_3$  [20 mg/L].

### Flotación 21

Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	15.40	6.67	2.95	22.71	0.45	3.50	59.17	38.07
T Pb	215.50	93.33	0.15	2.64	0.31	5.69	40.83	61.93
C Zn	16.70	7.75	0.72	31.75	0.12	5.30	38.54	93.22
T Zn	198.80	92.25	0.10	0.19	0.19	0.39	61.46	6.78
F	230.90	100.00	0.33	3.98	0.77	9.18	100.00	100.00

Tabla 26. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 11, Primaria de Zn: pH 11) con  $M_3$  [20 mg/L].

### Flotación 22

Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	15.50	6.70	3.35	24.95	0.52	3.87	67.00	37.88
T Pb	215.80	93.30	0.12	2.94	0.26	6.34	33.00	62.12
C Zn	15.50	7.18	0.36	31.90	0.06	4.95	21.74	77.98
T Zn	200.30	92.82	0.10	0.70	0.20	1.40	78.26	22.02
F	231.30	100.00	0.34	4.41	0.78	10.21	100.00	100.00

Tabla 27. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 10, Primaria de Zn: pH 10) con  $M_3$  [10 mg/L].

### Flotación 23

Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	16.80	7.23	3.33	26.22	0.56	4.41	70.55	50.14
T Pb	215.70	92.77	0.11	2.03	0.23	4.38	29.45	49.86
C Zn	12.90	5.98	0.27	30.89	0.03	3.98	14.91	90.97
T Zn	202.80	94.02	0.10	0.20	0.20	0.40	85.09	9.03
F	232.50	100.00	0.34	3.78	0.79	8.79	100.00	100.00

Tabla 28. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 10, Primaria de Zn: pH 10) con  $M_3$  [15 mg/L].



### Flotación 24

Producto	Peso (g)	%Peso	% Ley		C. M. Pb	C. M. Zn	% Rec. Pb	% Rec. Zn
			% Pb	%Zn				
C Pb	17.60	7.71	3.24	25.69	0.57	4.52	73.26	48.02
T Pb	210.60	92.29	0.10	2.32	0.21	4.90	26.74	51.98
C Zn	14.50	6.89	0.25	28.49	0.04	4.13	17.13	84.38
T Zn	196.10	93.11	0.09	0.39	0.17	0.76	82.87	15.62
F	228.20	100.00	0.34	4.13	0.78	9.42	100.00	100.00

Tabla 29. Flotación selectiva Pb-Zn (Primaria de Pb: pH 9, Primaria de Zn: pH 10) con  $M_3$  [20 mg/L].

