



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS**

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ZETA PARA
EVALUAR LA ADSORCIÓN DE REACTIVOS DE
FLOTACIÓN SOBRE CUARZO, PIRITA Y
CALCOPIRITA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

P R E S E N T A:

MARÍA DE LOS ÁNGELES ROMERO ASATO



MEXICO, D. F.

2000



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.

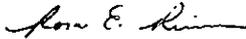
JURADO ASIGNADO :

PRESIDENTE: Prof. Rosa Elva Rivera Santillán.
VOCAL: Prof. Francisco Javier Rodríguez Gómez.
SECRETARIO: Prof. Carlos Rodríguez Rivera.
1er. SUPLENTE: Prof. Faustino Juárez Sánchez
2do. SUPLENTE: Prof. Marco A. Talavera Rosales

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

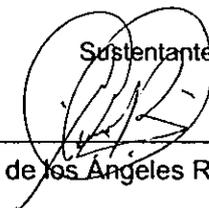
Universidad Nacional Autónoma de México.
Facultad de Química
Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Edificio "D" laboratorio 212
Cd. Universitaria, México D.F.

Asesor del tema:



Dra. Rosa Elva Rivera Santillán.

Sustentante:



María de los Angeles Romero Asato.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** porque en los momentos más difíciles de mi vida nunca me abandonó, cuando los obstáculos detenían el paso en el camino que me había trazado, lo iluminó y sentía las fuerzas necesarias para seguir adelante y no desistir, porque me enseñó que no es fácil, pero luchando con tesón y constancia se puede lograr.

Gracias porque me enviaste donde los dos seres más hermosos cuidaron de mí, me enseñaste a llamarlos **Padres** y hasta hoy su misión la han cumplido como nadie en el mundo, pues nunca me han abandonado y han dado a manos llenas lo más bello que has enseñado, Amor. En mi andar en por la vida me aconsejaron, guiaron y sobre todo me soportaron. Para ustedes **Gaspar y Leonor** que saben cuanto los amo.

Enviaste cinco seres más llamados **Hermanos**, con quienes he compartido juegos, travesuras, estudio, entre tantas cosas. Pero lo mejor de todo es que somos incondicionales, nos apoyamos, aconsejamos, amamos y estamos siempre unidos en todo momento y situación. Por ustedes **Jaime, Alejandro, Celestino, Norma y Alma**, por ser siempre más que amigos, gracias.

Me regalaste cuatro pequeños, que con su amor sincero y sus sonrisas puras levanta mi ánimo cuando estoy triste y siento que no puedo más. Porque llenan mi vida y yo sin dudar la daría por ellos. A mis **Sobrinos Jaime Adrián, Norma Silvia, Sara Noemí y Carlos Alejandro**, gracias por existir.

Para mis **Cuñados** Laura, Israel y Ricardo, que a pesar de todo sé que estamos unidos, por llegar a la vida de mis hermanos, por mis pequeños latosos y los que vendrán, muchas gracias.

Con lo anterior, dime Dios, ¿qué más puedo pedir? si, ¡me lo has dado todo!

A mis abuelos **Jesús, Kisei y Elvira** que aunque no están físicamente, estoy segura que donde quiera que se encuentren, siempre me acompañan. A ti **Luchita** por apoyarnos en los momentos difíciles, porque gozamos de tu compañía y sé que será por mucho tiempo.

Por **Mani Sara** que fue, es y será la imagen de valor, fortaleza, coraje y deseos de vivir, por ser un verdadero ejemplo a seguir y sobre todo una madre para mí.

Para ti tío **Rogelio** donde quiera que estés nunca te olvido.

Para un ángel que no necesita alas ni tampoco volar para serlo, por permitirme tomar su mano firme cuando sentía que no seguiría adelante, recordarme que la vida está llena de obstáculos y que es necesario dar el mejor de nuestros esfuerzos sin dejar que nada ni nadie nos agobie, por enseñarme que un nivel no da la grandeza, y sí lo que se construya con sencillez, humildad y deseos de ayudar a los demás vale más que todo, porque es consejo, apoyo y sobre todo amigo.

Por usted querido **Don Pedro**, gracias por regalarme algo que no tiene precio, su amistad.

A mis **tíos, primos y sobrinos** que creyeron en mí y de quienes recibí sus consejos, así como su apoyo y confianza.

A mis **amigos**, pues tengo la fortuna de contar con muchos y si los nombrara a todos y cada uno, necesitaría mucho más de lo que es el presente trabajo, pero estoy segura que ellos saben mejor que nadie quienes lo son. Por ustedes que creyeron en mí, gracias.

A mi **Universidad**, por permitirme iniciar este logro.

A la **Facultad de Química**, por otorgarme el placer estar en sus aulas.

Al **Departamento de Ingeniería Metalúrgica** por enseñarme a ser fuerte y no desistir a pesar de todo.

A mi Asesora, la **Dra. Rosa Elva Rivera S.** por su esfuerzo tiempo y dedicación, porque estoy segura que dejó lo mejor de ella para que el presente trabajo saliera adelante. Por lo anterior, mi infinito agradecimiento.

A los **miembros del Jurado**, por regalarme su tiempo y sus valiosos comentarios. Sinceramente, gracias.

Al **Sr. Gabriel Nieto**, porque sin su apoyo, consejo e incomparable ayuda éste trabajo no hubiera salido adelante.

Para el **Ing. Mario Antonio González Negrete**, el **Ing. Raúl Becerril H.** así como al **Ing. Francisco Brajas G.** por su invaluable apoyo para la realización del presente trabajo, por creer en mi y brindarme su amistad, mi eterno agradecimiento.

Al **I.Q.M. Hugo Salazar** por sus oportunos consejo como profesor y amigo.

CONTENIDO:

ÍNDICE	1
RESUMEN	3
I. INTRODUCCIÓN	5
II. GENERALIDADES	9
1.0 Minerales	
1.1 Cuarzo o dióxido de silicio	
1.2 Pirita	
1.3 Calcopirita	
2.0 Análisis granulométrico	
2.1 Determinación de tamaño y forma de las partículas	
2.2 Análisis de malla	
2.3 Forma de las partículas	
3.0 Flotación de minerales	
3.1 Reactivos de flotación	
3.2 Colectores	
3.3 Promotores	
4.0 Potencial electrocinético	
4.1 Sistemas coloidales	
4.2 Doble capa eléctrica	
4.3 Fenómenos electrocinéticos	
4.4 Potencial electrocinético	
4.5 Cambio de potencial electrocinético	
4.6 Importancia práctica del potencial zeta	
4.7 Potencial zeta y flotación	
III. EXPERIMENTACIÓN	63
1.0 Caracterización de los minerales	
1.1 Preparación de muestras	
1.2 Análisis granulométrico	
1.3 Análisis químico	
1.4 Análisis menagráfico	
1.4.1 Análisis óptico	
1.4.2 Análisis fotográfico	
1.4.2.1 Tiempos de exposición	
1.4.2.2 Dureza	
1.4.3 Microdureza	
1.5 Microanálisis MEB/EDS	

- 2.0 Comportamiento electrocinético de las muestras
 - 2.1 Preparación de muestras
 - 2.2 Determinación del potencial electrocinético de los minerales solos
 - 2.3 Determinación del potencial electrocinético de los minerales en presencia de colectores xantato
 - 2.4 Determinación del potencial electrocinético de los minerales en presencia de colectores xantato y de promotores

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 77

- 1.0 Caracterización de las muestras y
- 2.0 Comportamiento electrocinético de las muestras
 - 2.3 Potencial zeta de cuarzo
 - 2.3.1 Potencial zeta de cuarzo solo
 - 2.3.2 Potencial zeta de cuarzo en presencia de xantatos
 - 2.3.3 Potencial zeta de cuarzo - xantatos - promotores
 - 2.3.3.1 Etilxantato
 - 2.3.3.2 Amilxantato
 - 2.3.3.3 Isopropilxantato
 - 2.1 Potencial zeta de pirita
 - 2.1.1 Potencial zeta de pirita sola
 - 2.1.2 Potencial zeta de pirita en presencia de xantatos
 - 2.1.3 Potencial zeta de pirita - xantatos - promotores
 - 2.1.3.1 Etilxantato
 - 2.1.3.2 Amilxantato
 - 2.1.3.3 Isopropilxantato
 - 2.2 Potencial zeta de calcopirita
 - 2.2.1 Potencial zeta de calcopirita sola
 - 2.2.2 Potencial zeta de calcopirita en presencia de xantatos
 - 2.2.3 Potencial zeta de calcopirita - xantatos - promotores
 - 2.2.3.1 Etilxantato
 - 2.2.3.2 Amilxantato

V. CONCLUSIONES 84

VI. BIBLIOGRAFÍA 69

VII. ANEXO I 88

- 1.0 Índice de figuras
- 2.0 Índice de tablas
- 3.0 Lista de gráficos

RESUMEN

Aunque el proceso de flotación, introducido en México a principios del presente siglo, resultó más eficiente que los existentes y muy económico para la separación de minerales, el desarrollo tecnológico ha sido limitado. Probablemente la marginación de las plantas de beneficio ha propiciado el rezago general que la Metalurgia Extractiva ha sufrido.

La disminución de las reservas y la creciente pobreza y complejidad de los minerales hace indispensable tanto la optimización de los procesos convencionales como la búsqueda de nuevas tecnologías de beneficio de minerales. Si bien, el potencial electrocinético no es un concepto nuevo pues se conoce desde hace 100 años, en la práctica ha sido muy poco utilizado como herramienta para evaluar la adsorción de colectores sobre la superficie del mineral y encontrar condiciones de flotación más selectiva, información indispensable en el caso de minerales complejos.

En el presente trabajo se correlacionan las características electrocinéticas de cuarzo, pirita y calcopirita, componentes de un mineral complejo de sulfuros de cobre, con su flotabilidad.

La evolución del potencial electrocinético en función del pH de cada una de las fases minerales mencionadas, solas y en presencia de colectores tipo xantato y de aditivos o promotores utilizados en la flotación de sulfuros de cobre, permitió evaluar la adsorción de éstos sobre la superficie del mineral y por tanto, su efecto sobre la flotación.

Específicamente se realizaron determinaciones de potencial zeta en función del pH para cada uno de los minerales cuarzo, pirita y calcopirita, solos y en presencia de xantatos etílico, amílico e isopropílico de potasio, así como, en presencia de los promotores de flotación Aerofloat®208 y Aerofloat®404 de la compañía Cyanamid.

Las curvas de potencial zeta del cuarzo y de la calcopirita muestran que éste es negativo en todo el rango de pH estudiado. El potencial zeta de la pirita, positivo en medio ácido, presenta un punto de inflexión a $\text{pH}=6.0$. La presencia de colectores tipo xantato vuelve más negativo el potencial zeta de los minerales lo cual es indicativo de la adsorción de éstos sobre su superficie. En el caso de la calcopirita la presencia de promotores no tiene un efecto significativo sobre el potencial zeta. En el caso de la pirita en presencia de amilxantato de potasio y de isopropilxantato de potasio en medio básico los promotores aumentan ligeramente el potencial zeta. En el caso del cuarzo en presencia de isopropilxantato de potasio el A404 aumenta ligeramente el potencial, disminuye la densidad de carga superficial y por tanto su flotabilidad. En general podemos decir que los colectores xantato se adsorben sobre la superficie de los tres minerales aumentando su flotabilidad, mientras que los promotores contrarrestan ésta, mostrando un efecto ligeramente depresor.

I. INTRODUCCIÓN

No es posible contemplar la vida moderna sin los enormes y rápidos cambios tecnológicos aplicados a la Metalurgia

El hombre primitivo aprendió a usar herramientas producidas mediante un rudimentario labrado de piedras. Muchos milenios después, durante el período Neolítico, descubrió el uso de los metales. En el área del cercano Oriente y Egipto, se desarrollaron herramientas de Cobre, esto 6 mil años a.c. y más tarde se complementó con el Bronce.

El Acero se desarrolló en Europa alrededor del año de 1850. A partir de entonces, ha tenido lugar un desarrollo enorme en la Metalurgia y en la aplicación de toda clase de metales y aleaciones para la fabricación de diversos objetos o componentes, que se utilizan en una amplia gama de aplicaciones.

Por lo que respecta a los minerales, debemos recordar que los yacimientos son recursos no renovables, y aunque la naturaleza dotó a nuestro país con abundancia de éstos, una gran mayoría de los mismos contiene minerales de baja ley cuya explotación es marginalmente económica, aún cuando las cotizaciones por ejemplo, de la Plata, se mantengan a niveles bajos, como sucedió entre los años de 1990 a 1993 cuando el promedio del Dólar USA se mantuvo a 4.27 por Onza Troy. La Plata ha perdido su valor comunitai precioso, así como sucedió con el oro, que ha perdido su interés como objeto de ahorro ante las economías inflacionarias donde su cotización promedio en el mercado de Londres durante los años de 1994-1996, fue de 385.00 DLS. por Onza. Actualmente se cotiza un poco mejor debido a la venta de reservas de oro de varios bancos centrales.

Uno de los factores que se reflejan importantemente en los costos de producción por unidad de metal producido, es el grado de recuperación metalúrgica, ya que la mena extraída de la mina debe de procesarse en la planta de beneficio, donde es triturada y molida para pasar al proceso de separación de minerales metálicos de la ganga sin valor.

En México, los mineros españoles aplicaron el único sistema que conocían, que era el de fundición directa de las menas trituradas. Este método era muy costoso y además sufría fuertes pérdidas metalúrgicas. En 1557, Bartolomé De Medina, español con ciertos contactos con las minas de Río Tinto, inventó el proceso de Patio, es decir, amalgamación de tortas de menas agregando ciertos reactivos. La aplicación de esta nueva tecnología hizo posible la producción de muchas minas que ya no eran costeables, pues este proceso era de menor costo que el de fundición directa.

Los siguientes avances tecnológicos fueron los procesos de Cianuración, en 1896, y el de flotación introducido en México a principios del siglo XX, el cual era mucho más eficiente en la recuperación de metales, además de ser más económico.

Durante el presente siglo se han desarrollado mejoras importantes, tanto en reactivos como en equipos, pero ha sido muy limitado el desarrollo tecnológico que pudiera revolucionar la Metalurgia Extractiva.

Es también objeto de consideración el hecho de que los costos de extracción aumentan conforme se van profundizando las minas.

La marginación de las plantas de beneficio ha propiciado el rezago general que la metalurgia extractiva ha sufrido. La investigación es sumamente limitada en México, lo que redundará en nuestra economía ya que, dependemos en gran medida de la tecnología extranjera, por lo que toda investigación debe ser alentada.

JUSTIFICACION

La disminución de las reservas y la creciente pobreza y complejidad de los minerales hace indispensable tanto la optimización de los procesos convencionales como la búsqueda de nuevas tecnologías de beneficio de minerales.

Si bien el potencial electrocinético no es un concepto nuevo, en la práctica ha sido muy poco utilizado como herramienta para evaluar la adsorción de colectores sobre la superficie del mineral y encontrar condiciones de flotación más selectiva indispensable en el caso de minerales complejos.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Correlacionar las características electrocinéticas de los principales componentes minerales con la flotabilidad de un mineral complejo de sulfuros de cobre.

Objetivos particulares:

- Conocer el comportamiento electrocinético de los principales componentes minerales contenidos en el sulfuro complejo: calcopirita, pirita y cuarzo.
- Evaluar la adsorción de diferentes colectores tipo xantato sobre la superficie de estas especies minerales mediante medidas de potencial zeta.
- Evaluar el efecto de los promotores utilizados durante el proceso de flotación sobre las medidas de potencial zeta.
- Correlacionar los resultados obtenidos con la flotabilidad del mineral.

II. GENERALIDADES

1.0 MINERALES^[1-4]

LA MINERALOGÍA Se encarga de estudiar a los Minerales, los cuales se encuentran unidos en masas de rocas o de forma aislada en el interior de la tierra o en la superficie, así como en yacimientos minerales.

LOS MINERALES Son cuerpos inorgánicos de composición química definida. Se forman en condiciones favorables como resultado de procesos naturales. La estructura atómica es cristalina característica que les proporciona sus propiedades físicas.

Son sustancias heterogéneas puesto que son agregados de cristales de una o más clases. Su composición se expresa en fórmulas químicas, las cuales en algunos casos varían dentro de ciertos límites y acorde a una ley definida. Dos ejemplares que en apariencia son similares, al observarse al microscopio muestran diferencias significativas en la composición, y al existir asociaciones con otros elementos, aún en cantidades mínimas las propiedades cambiarán ligera o considerablemente otorgándoles características propias, como lo son:

Químicas:

- Composición
- Punto de fusión
- Gravedad específica
- Densidad

Físicas

- Estructura atómica
- Simetría del cristal
- Características ópticas
- Dureza
- Color

La combinación de las propiedades anteriores define la clasificación de la especie mineral.

UN CRISTAL es un cuerpo el cual por afinidad molecular presenta una estructura interna definida en forma de un sólido regular, constituido por cierto número de planos superficiales con arreglos que van de acuerdo a leyes de la simetría.

Los cristales en la naturaleza se encuentran en forma de sólido derivados de tres estados físicos:

1. Solución
2. Vapor
3. Fusión

Un cristal está conformado por un número infinito de partículas con tamaños y formas conocidas las cuales regulan su arreglo y simetría. Éste presenta tres características muy importantes:

- Planos de Clivage: Fracturas con superficies definidas, normalmente paralela a sus caras cristalinas naturales.
- Propiedades ópticas: Efecto característico y bien definido que posee un cristal al pasar un haz de luz a través de su estructura. Esto ocasiona que la naturaleza de la luz sea descompuesta mostrando un espectro o sombra propia del mineral. En el caso de las estructuras heterogéneas este efecto no se produce.
- Formas externas regulares y constantes: Es la propiedad que poseen las partículas con formas y tamaños iguales para agruparse y apilarse acorde a un plano regular con arreglo estructural similar, dando como resultado una masa que presenta forma definida con una estricta relación a las características de las partículas individuales que lo conforman.

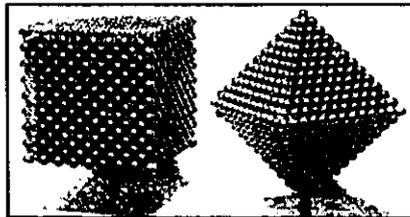


FIGURA 1: UNION Y APILADO DE LAS PARTÍCULAS MINERALES ^[1-3]

CLASIFICACIÓN DE LOS MINERALES

Los yacimientos minerales se localizan en diferentes regiones de la corteza terrestre. De los elementos asociados y de las condiciones de formación dependerá la composición química que posean. Son cuerpos tales como vetas (formadas en las fracturas de las rocas), mantos o masivos, o reemplazos en las rocas (principalmente calcáreas) en que se alojan. Según la forma geométrica del cuerpo pueden ser explotados a cielo (o tajo) abierto o subterráneos. En el primero la excavación debe ser cónica para evitar el derrumbe de la roca encajonante lo que eleva considerablemente el costo a medida que se profundiza por la eliminación de roca estéril.

La mineralización se clasifica en nueve grupos :

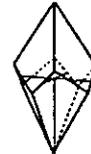
1. Elementos Nativos: Formados por átomos de la misma clase los cuales corresponden con los elementos químicos. En su mayoría son metales poco oxidables pero los hay también no metálicos. Ejemplos: plata, oro, cobre, mercurio, fierro, zinc y plomo.
2. Sulfuros: Minerales con propiedades semiconductoras y que por su aspecto se asemejan a los semi-metales. Algunas especies son de gran valor industrial ya que de ellos se extraen casi todos los minerales no ferrosos. Ejemplos: bornita, argentita, pirita, calcopirita, gálena, esfalerita, etc.
3. Halogenuros: Grupo pequeño de minerales formados por substancias similares a las sales. Proviene de la evaporación de aguas estancadas o bien se derivan de la transformación de otros minerales e incluso de depósitos de fumarolas volcánicas. Ejemplo: fluorita en todas sus formas.
4. Óxidos: Minerales en cuya composición se encuentran los metales (o semi-metales) en asociación con el oxígeno. Son de gran interés industrial y pueden presentarse en grupos cristalizados muy vistosos los

que pueden encontrarse de colores muy oscuros hasta muy claros, opacos y cristalinos. Ejemplos: magnetita, hematita, tenorita, cuprita, zincita, etc.

5. Boratos, Nitratos y Carbonatos: Es un grupo muy pequeño de minerales donde los más frecuentes son aquellos que contienen calcio y magnesio, entre otros. Existen los minerales secundarios que contienen especies metalíferas como plomo, níquel, cobalto, etc. Ejemplos: turmalina, nitratina, calcita etc.
6. Sulfatos : Es un grupo numeroso de varias especies formadas por alteraciones de minerales metálicos, por ello sus colores son más vivos; ejemplo de ello es el sulfato de calcio conocido como yeso. Algunos son solubles en agua y fácilmente alterables. Ejemplo: calcantita, celestita, etc.
7. Fosfatos, Arseniats y Vanadatos: Grupo de minerales que junto con los sulfuros presentan las especies más bellas e interesantes para los coleccionistas. Es una clase formada por alteraciones de distintos minerales metálicos de colores atractivos y espléndidos cristales que en general son pequeños. Ejemplo: apatita, arsenopirita, piromorfita, vanadita.
8. Silicatos: Por la abundancia de silicio en la naturaleza es el grupo más importante. Se presentan en cristales que en ocasiones alcanzan tamaños considerables y su característica principal es su gran dureza. Ejemplos: cuarzo, zircón, andalucita, granate, etc.
9. Compuesto orgánicos: Aunque su clase es de poco interés llega a ofrecer ejemplares de excepcional belleza en sus cristales. Se caracterizan por presentar durezas muy bajas y en realidad no son considerados como verdaderos minerales. Ejemplo de este grupo es el ámbar.

1.1 CUARZO (DIÓXIDO DE SILICIO SiO_2).

Compuesto por 46.7 % de silicio y 53.3 % de oxígeno, cristaliza en el sistema rombohedral-trapezohedral. Su dureza en escala de Mohs es 7 y su gravedad específica en cristal es de 2.65 a 2.66. Estudios térmicos muestran la existencia de 2 modificaciones α y β o de baja y alta temperatura respectivamente. El color del cuarzo puede variar a causa de las impurezas



tetragonal trapezohedron

FIGURA 2: Una de las estructura del cuarzo.

presentes y va desde cristalino (el SiO_2 puro), o amatista por la presencia de Mn, hasta ahumado por la probable presencia de compuestos orgánicos entre otros.

El óxido de silicio se puede encontrar en formas tales como cuarzo, pedernal o arcilla, entre otros minerales de silicio. En roca se encuentra en sedimentarias, ígneas y metamórficas.

El óxido de silicio se puede encontrar en formas tales como cuarzo, pedernal, arcilla, entre otros minerales de silicio. En roca se encuentra en sedimentarias, ígneas y metamórficas.

Una de sus propiedades físicas es su elevada dureza, consecuencia de ello la gran variedad de usos en la industria.

Su importancia en este estudio proviene del hecho de que el cuarzo comúnmente incurre en proporciones importantes en la mayoría de los yacimientos de origen hidrotermal como "ganga" (mineral sin valor), acompañando a minerales tales como de Cu, Zn, Pb y otros metales comerciales.

El silicio junto con los otros elementos de la familia cuatro de la tabla periódica posee la propiedad de formar el óxido MO_2 . Todos estos compuestos presentan propiedades ácidas (característica de las rocas ígneas que lo contienen), excepto el CO_2 y el SiO_2 con un carácter anfótero.

La unidad estructural básica de la mayoría de las formas de la sílice y de los silicatos minerales es el arreglo tetrahédrico de los cuatro átomos de oxígeno que rodean al átomo central de silicio. La estequiometría del SiO_2 requiere de un promedio, cada oxígeno está compartido por dos silicios en dos tetrahedros compartidos, mientras que de acuerdo con la regla de la valencia electrostática un sólo átomo de oxígeno no puede compartirse entre dos o más tetrahedros.

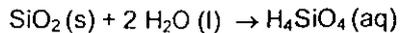
En todas sus formas el SiO_2 , como cuarzo y como calcedonia, es insoluble en ácidos exceptuando al fluorhídrico.

La sílice es químicamente resistente a temperaturas ordinarias a los reactivos comunes. No obstante no se considera un compuesto no reactivo, ya que bajo condiciones apropiadas a altas temperaturas, sufre una amplia variedad de transformaciones químicas. El cuarzo amorfo es más reactivo sobre todo en tamaños de partículas pequeñas, ya que existe una mayor área superficial de contacto con presencia de grupos hidroxilo de los cuales la mitad pueden ser retenidos aún a $400\text{ }^\circ\text{C}$.

El carácter ácido de la sílice se observa en la reacción de un gran número de óxidos ácidos con la formación de silicatos. Las reacciones del cuarzo a elevadas temperaturas con carbonatos alcalinos y alcalinotérreos y el desplazamiento del ácido más volátil, que en ésta reacción es el CO_2 , forma los silicatos correspondientes.

La solubilidad de cuarzo en agua (SiO_2-H_2O) alcanza un máximo alrededor de los $330\text{ }^\circ\text{C}$, temperatura a la cual la solución saturada contiene 0.07% de sílice declinando rápidamente conforme se aproxima al punto crítico, que para dicho sistema es cercano al del agua pura.

La sílice amorfa se disuelve (o depolimeriza) a 330°C en agua de acuerdo con la siguiente reacción:



A 1470°C su estructura se invierte a cristobalita la cual es muy estable hasta 1700°C.

El más importante e interesante de los óxidos de silicio, posee una característica de óxido ácido, además funde y reacciona con los óxidos metálicos. Los productos de dichas reacciones son los vidrios, líquidos sobre-enfriados no cristalinos de composición variable, entre otras muchas utilidades que se conocen del cuarzo.

En su estado puro sus propiedades adicionales lo convierten en un elemento de gran utilidad ya que por ejemplo:

- Transmite las radiaciones ultravioleta por lo que se emplea en lámparas de sol.
- Cuenta con propiedades piezoeléctricas con lo que convierte reversiblemente la energía mecánica en eléctrica.
- Se utiliza como prisma para espectrógrafos y espectrofotómetros.
- Controla la frecuencias de osciladores.
- Se utiliza como filtro eléctrico.
- Es un excelente generador y fonocaptador ultrasónico.
- En la industria metalúrgica como refractario, abrasivos, en la fundición para el moldeo (mezclado con otros productos tales como bentonita), etc.
- Como cerámico
- En la industria del vidrio.

En sus formas amorfas se utiliza como:

- Desecante, adsorbente, agente reforzador y componente de catalizadores.
- Constituyente de materiales de construcción tales como piedra, concreto y ladrillo, etc.

El tamaño de partícula está relacionado al uso al que sea sometido. En algunos casos se requiere grande y en otros muy fino, el contenido (o porcentaje) en ocasiones se necesita mayoritario o puro y en otros que su contenido sea insignificante. Lo anterior proporciona el precio con el que se adquirirá.

Por lo anterior la explotación del cuarzo constituye una rama importante de la industria por sus diversos usos y es necesario conocer todas las variables involucradas en la separación óptima de este elemento.

Tanto para su explotación como para su recuperación es importante conocer sus propiedades fisicoquímicas como lo es la superficie y la carga que ésta última posee, las cuales determinan el tipo de colector a utilizar en su flotación.

En la flotación (separación física del mineral con reactivos químicos), se busca la selectividad del mineral de interés, recuperarlo con alto grado de pureza.

En los métodos de flotación se hace uso de las propiedades superficiales de las partículas minerales que interactúan con los reactivos mejorando el proceso.

Dependiendo de la naturaleza del mineral, ya que existe una amplia gama de combinaciones de una sola especie, serán las características del colector a utilizar, las que se basan en la propiedad eléctrica de éste, así como de la solubilidad del mineral y de la estabilidad de la sal metal-colector.

Es importante hacer una caracterización de la superficie del mineral y observar su comportamiento frente a iones metálicos.

1.2 PIRITA (SULFURO DE FIERRO FeS_2)

Mineral con estructura cristalina cúbica centrada en las caras, donde los iones Fe^{2+} se localizan en las aristas y los iones S^{2-} (que presentan enlaces predominantemente covalentes) se ubican centrados en las caras arreglados por pares también conocido como "dum-bell". Su naturaleza no estequiométrica en componentes no naturales e inclusiones metálicas, le otorga una heterogeneidad fisicoquímica propia de los minerales de su tipo.

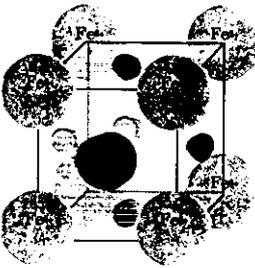


FIGURA 3: Estructura de la pirita

La pirita, a diferencia con otros minerales sulfurosos, se oxida con facilidad al contacto con el aire, tal vez esa es la causa por la cual su comportamiento electrocinético y de flotación se distingue de los de su clase.

En solución acuosa los productos de oxidación se encuentran conformados por Fe^{2+} , H^+ , SO_4^{2-} en el intervalo de pH ácido-neutro; por H^+ y especies oxidadas del hierro en medio alcalino. A pH muy bajo el azufre elemental es estable en el sistema de la pirita, donde se conjetura que este último, gracias a la solubilidad que posee en medio acuoso favorece el proceso de flotación. Esto explica la facilidad de cambio en su comportamiento en el proceso de distribución de especies en la red cristalina.

Por sus características electroquímicas en ocasiones el mineral se encuentra pasivado, es decir, recubierto por una película de productos de oxidación. Esto mismo sucede con especies minerales tales como: Calcopirita (CuFeS_2) y Bornita (Cu_5FeS_4).

TABLA 1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE PIRITA

COMPOSICION QUIMICA	
AZUFRE (S)	54.40%
FIERRO (Fe)	46.60%

TABLA 2: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PIRITA^[2]

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PIRITA	
COLOR	AMARILLO LATONADO PÁLIDO
LUSTRE	METÁLICO Y ESPLLENDETE
TRASPARENCIA	CRISTALES OPACOS
SISTEMA CRISTALOGRAFICO	TETRAGONAL A OCTAHEDRICO
CRISTAL EN LA NATURALEZA	BASICAMENTE ES CÚBICO PERO POSEE COMBINACIÓN DE FORMAS, MASIVO, REEMPLAZA A OTROS MINERALES Y FÓSILES EN FORMA DE PSEUDOMORFOS .
CLIVAJE	MUY INDISTINTO
FRACTURA	CONCHOIDAL
DUREZA MOHS	6-6.5
GRAVEDAD ESPECIFICA	APROX. 5.1 + (DEPÓSITO DE LOS MINERALES METÁLICOS CON LOS QUE SE ENCUENTRE ASOCIADOS)
RAYADURA	NEGRO VERDOSO A NEGRO CAFESOSO
OTRAS CARACTERÍSTICAS	ESTRIACIONES EN LAS CARAS CUBICAS CAUSADAS POR CORTES . NO ES MALEABLE.
MINERALES ASOCIADOS	CUARZO, CALCITA, ORO, ESFALERITA, GALENA, PLATA.*
INDICADORES DEL MINERAL	CRITALES DUROS, CON LUSTRE Y BRILLO, ADEMÁS PERMITE RAYADURA.

* En algunas ocasiones los cristales de piritita contienen pequeñas cantidades de níquel, cobalto y talio, así como Cu, el cual reemplaza al Fe en la estructura.

1.3 CALCOPIRITA (SULFURO FERROSO DE COBRE CuFeS_2)

Mineral con estructura tetragonal-esfenoidal el cual puede cambiar a octahedral si ambas fases se desarrollan en cantidades iguales. Los análisis por rayos X muestran una estructura similar a la de la esfalerita en donde las capas de átomos del zinc han sido reemplazadas por capas alternas de cobre y átomos de hierro. Mediante análisis se han determinado variaciones en la fórmula original, esto se debe generalmente a la mezcla mecánica de pirita. En ocasiones es aurífera, argentífera e incluso con ambas, así como puede contener trazas de selenio y talio.

TABLA 3: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CALCOPIRITA

COMPOSICIÓN QUÍMICA	
AZUFRE (S)	34.94%
COBRE (Cu)	34.63%
FIERRO (Fe)	30.43%

Peso Molecular : 183.53 g/mol

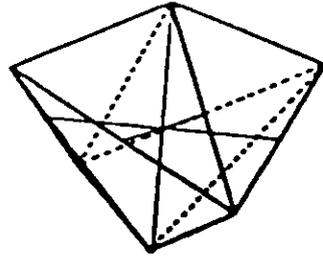
Es dúctil y maleable, la elongación está dentro de rangos bajos. Se encuentra en el mundo formando parte de los minerales económicos sulfurados más importantes, localizándose en rocas ígneas intrusivas también conocidos como pórfidos cupríferos (por su disseminación en rocas porfídicas), sus cristales pueden estar asociados a cualquier tipo de yacimiento.

TABLA 4: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CALCOPIRITA^[2]

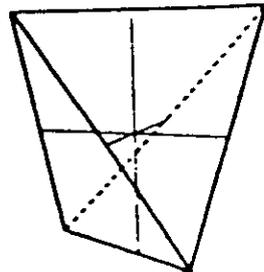
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CALCOPIRITA	
COLOR	AMARILLO BRONCE Y EN OCASIONES IRIDICENTE.
LUSTRE	METÁLICO
TRASPARENCIA	CRISTALES OPACOS
SISTEMA CRISTALOGRAFICO	TETRAGONAL
CRISTAL EN LA NATURALEZA	COMÚNMENTE MASIVO, ASOCIADO A OTROS CRISTALES, SU ESTRUCTURA COMÚNMENTE ES DISFENOIDAL Y EN OCACIONES CON FORMA BOTRIODAL.
CLIVAJE	INDISTINTO, EN UNA SOLA DIRECCIÓN
FRACTURA	EN FORMA DE CONCHA Y BRILLANTE (DODECAHEDRAL MUY PERFECTO)
DUREZA MOHS	3,5-4
GRAVEDAD ESPECÍFICA	4,2 (POR ARRIBA DE LOS MINERALES METÁLICOS)
RAYADURA	NEGRO VERDOSO
OTRAS CARACTERÍSTICAS	ALGUNAS ESTRIACIONES SOBRE LAS CARAS DE OTROS CRISTALES
MINERALES ASOCIADOS	CUARZO, FLUORITA, BARITA, DOLOMITA, CALCITA, PENTLANDITA, PIRITA ENTRE OTROS SULFUROS
INDICADORES DEL MINERAL	SE ENCUENTRA EN CRISTALES SUAVES Y BRILLANTES

FIGURA 4: ESTRUCTURAS DE LA CALCOPIRITA^[4]

**TETRAGONAL
ESCALENOHEDRON**



**TETRAGONAL
DISFENOIDAL**



2.0 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO^[5]

Permite determinar el tamaño y la forma de las partículas así como la calidad de la molienda al establecer el grado de liberación de los valores de la ganga, lo cual permite fijar el tamaño óptimo de la alimentación en el proceso de flotación.

2.1 DETERMINACIÓN DE TAMAÑO Y FORMA DE LAS PARTÍCULAS.

El conocer la distribución del tamaño de la partícula en el mineral de manera cuantitativa mostrará si el proceso de molienda se está realizando correctamente y asegura que al vaciar la carga al circuito de flotación éste se efectuará correctamente. Sin embargo como los tamaños son muy irregulares es difícil poder determinarlo con precisión, por lo que se recurre al método de *análisis de cribado o de abertura de malla*. Esta última medida se refiere al diámetro de una esfera igual al de la abertura a través de la cual pasa una partícula, pero como las partículas rara vez son esféricas el diámetro equivalente se refiere a una segunda dimensión más grande.

2.2 ANÁLISIS DE MALLA

Aunque es un método muy antiguo de análisis es el más utilizado en la industria por la gran variedad de tamaños de partícula que se pueden determinar, incluso ha permitido clasificar partículas hasta alrededor de $2\mu\text{m}$ utilizando microcribas con grados de exactitud muy altos.

El análisis se realiza haciendo pasar una carga conocida de muestra sucesivamente a través de una serie de cribas con aberturas de malla cada vez más finas. El conjunto de ellas es sometido a vibración o agitación con el fin de exponer a todas las partículas a las aberturas, las que al pasar por estas últimas se depositan en la malla de menor tamaño, y así sucesivamente. Las cantidades retenidas se pesan para calcular el porcentaje de cada fracción basándonos en el total de la masa cribada.

La partícula que presenta un tamaño próximo favorable pasa a través de la abertura nominal de malla. Los cambios en el tejido por el uso continuo del tamiz y la fractura de las partículas por exceso de tiempo de cribado, alteran el análisis del tamaño de la partícula.

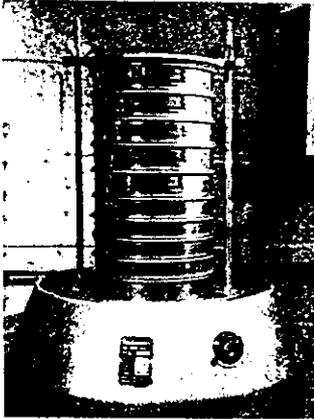


FIGURA 5

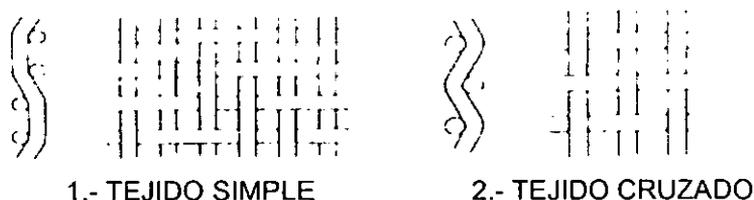
EQUIPO PARA TAMIZADO O ANALIZADOR DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS

Existen otros métodos de análisis de tamaño de partícula y son los siguientes:

TABLA 5: METODOS DE ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULA⁽⁵⁾

MÉTODO	ESCALA APROXIMADA EN MICRONES (μm)
Prueba de cribado	100 000-10
Elutriación	40-5
Microscopía óptica	50-0.25
Sedimentación (gravedad)	40-1
Sedimentación (centrífuga)	5-0.05
Microscopía electrónica	1-0.005

FIGURA 6: TIPOS DE TEJIDOS EN LAS CRIBAS^[5]



La selección de cribas a utilizar para el análisis dependerá de la naturaleza del mineral. Los tipos de tejido que se manejan son del tipo simple y cruzado.

A continuación se presenta la tabla que relaciona el tamaño de la abertura nominal (abertura redonda) BBS 410* con el número de malla.

TABLA 6: Cribas de malla de alambre BSS 410^[5]

NÚMERO DE MALLA	TAMAÑO DE ABERTURA NOMINAL (µm)	NÚMERO DE MALLA	TAMAÑO DE ABERTURA NOMINAL (µm)
3	5600	36	425
3.5	4060	44	355
4	4000	52	300
5	3350	60	250
6	2800	72	212
7	2360	85	180
8	2000	100	150
10	1700	120	125
12	1400	160	106
14	1180	170	90
16	1000	200	75
18	850	240	62
22	710	300	53
25	600	350	45
30	500	400	38

Las partículas de *tamaño próximo* a la retención en el tamiz causan el efecto llamado "cegamiento" u obstrucción de las aberturas reduciendo el área efectiva del medio de cribado, agudizando el problema en aquellas con aberturas pequeñas.

* Norma Inglesa (The British Standard)

2.3 FORMA DE LAS PARTÍCULAS

Los datos registrados de cualquier análisis de tamaño se deben acompañar de observaciones al microscopio indicando la forma aproximada, describiéndolas como granulares o aciculares, entre otros, que son las más adecuadas para indicarlas.

A continuación se describe una lista de los términos frecuentemente usados para describir la forma de las partículas:

- o Acicular: Forma de aguja
- o Angular: Puntiguda o burdamente polihedrica.
- o Cristalina: Geometría libremente desarrollada en un medio acuoso.
- o Dendrítico: Ramificaciones en forma cristalina.
- o Fibroso: Regular o irregularmente filamentado.
- o Escamoso: En forma de hojas o laminadas.
- o Granular: Con forma irregular equidimensional aproximada.
- o Irregular: Carece de cualquier simetría.
- o Modular: Redonda irregular.
- o Esférica: Forma globular.

3.0 FLOTACIÓN DE MINERALES^[5-13]

¿QUE ES LA FLOTACIÓN?: Proceso de separación física de partículas minerales (previamente molidas hasta tamaños adecuados de liberación) utilizando reactivos químicos orgánicos, que promueven la selectividad del mineral debido a la adsorción selectiva de éstos reactivos en la intercara sólido-líquido. Generalmente se utiliza inyección de aire formando un flujo ascendente de burbujas a través de la solución. Las partículas minerales se adhieren a la superficie de la burbuja y son transportadas hasta la superficie de la solución en forma de espuma facilitando el proceso de selección.

Dicho proceso consiste en agregar el mineral a celdas de separación (con un volumen de agua buscando una densidad de pulpa adecuada y agregando los reactivos necesarios en relación al mineral a separar) las cuales pueden ser de agitación o de inyección de aire, buscando flotar las partículas minerales valiosas deprimiendo la ganga (la que pasa a una 2da. celda llamada agotativa con el mismo fin que la anterior tratando de limpiar lo más posible el bulk).

La teoría de la flotación es compleja y difícil de comprender. Klassen, Mokrousov, Glembotskii y colaboradores se refieren al proceso en espuma (también llamada *directa*) como el aprovechar la diferencia en las propiedades fisicoquímicas de la superficie de las partículas minerales posterior al tratamiento con reactivos. El mineral se transfiere a la espuma o fracción flotantes dejando la ganga en la pulpa o colas (en el proceso de flotación inversa la ganga es flotada). Gracias a éstas una burbuja de aire se debe unir a las partículas minerales las que deben ser de tamaños finos (de lo contrario el exceso de peso evitará la adhesión por ser ésta menor cayendo la carga) y elevarlas hasta la superficie del agua. Este fenómeno se presenta solamente si la burbuja se adhiere a la superficie o intercara de la partícula mineral repeliendo en cierta medida al agua, esto es llamado hidrofobicidad. Cuando las burbujas de aire alcanzan la superficie, es necesario que la espuma sea estable o de lo contrario no podrán sostener a las partículas minerales reventando y dejando caer su carga. Para evitar ese efecto es necesario el uso de reactivos de flotación que estabilice la espuma.

La atracción en la interacción partícula-reactivo es posible gracias a las cargas superficiales o fuerzas de atracción entre ellos. Evidentemente, debe existir un equilibrio de cargas por lo que están presentes otras fuerzas que tienden a separar a la partícula de la burbuja las que llamamos fuerzas repulsivas. Estas provocan una tensión con una fuerza tal, que desarrollan un ángulo entre las superficies del mineral y de la burbuja llamado *ángulo de contacto*.

FIGURAS 7y 8: TIPOS DE CIRCUITOS DE FLOTACIÓN^[5]

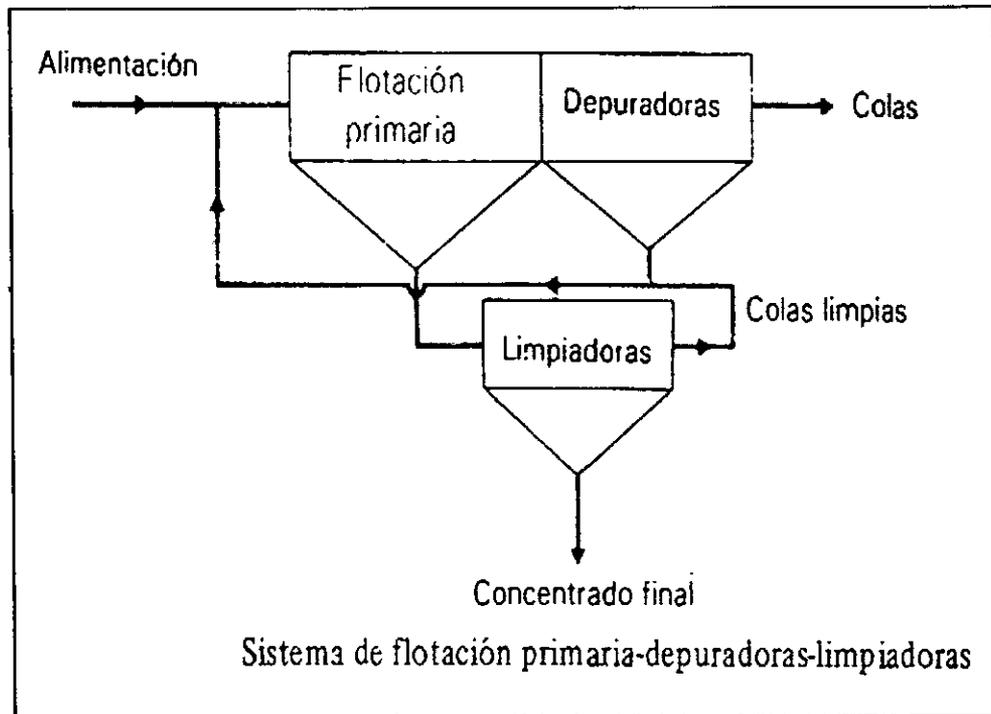
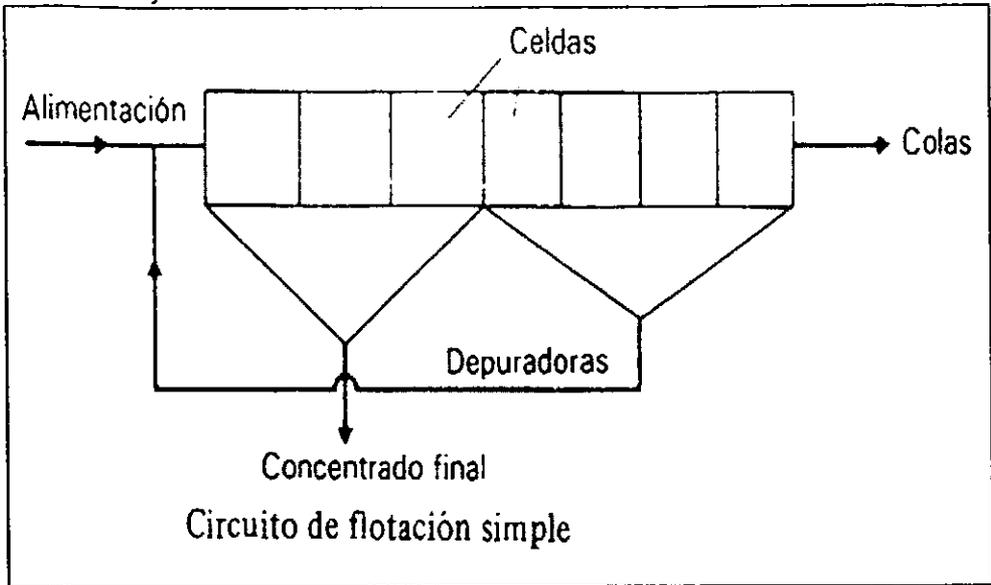


FIGURA 9: CELDA TIPO DENVER PARA FLOTACIÓN DE MINERALES⁽⁵⁾

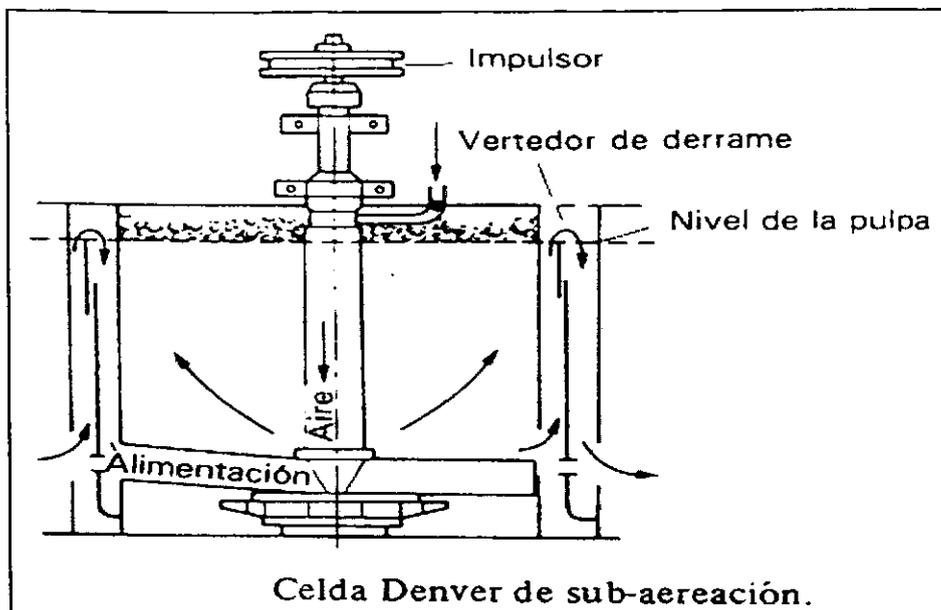
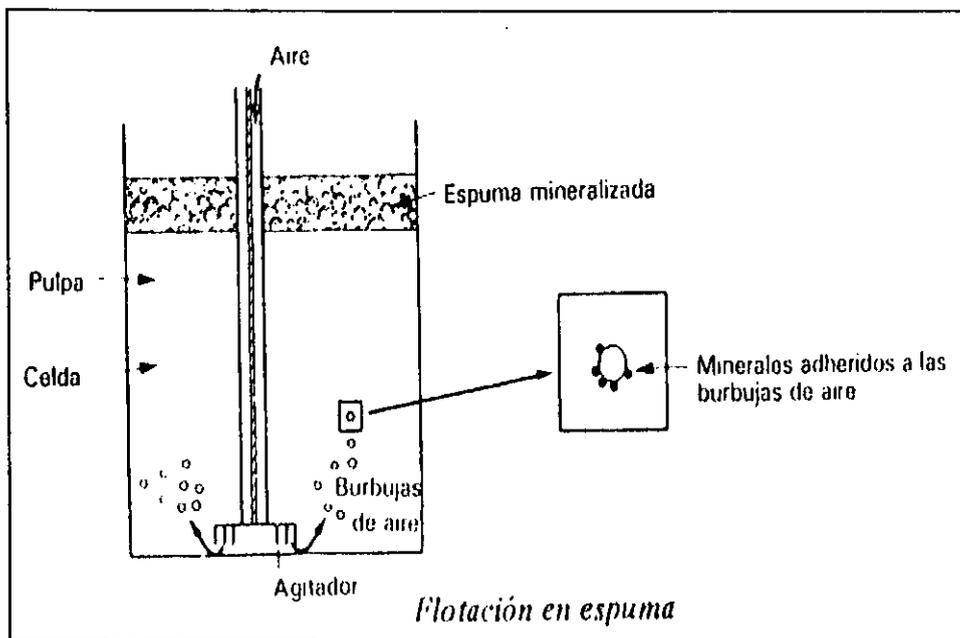


FIGURA 10: ADHESIÓN DE PARTÍCULAS A LA BURBUJA EN LA FLOTACIÓN⁽⁵⁾



El ángulo de contacto es directamente proporcional a la energía requerida para la adhesión entre partículas y burbujas, esto da como resultado un sistema con mayor estabilidad, es decir la resistencia se incrementa evitando un rápido rompimiento. Los minerales que muestran poca afinidad por el agua son llamados hidrofóbicos, sin embargo la mayoría de los minerales son hidrofílicos y consecuentemente son mojados por el agua. Si éste último sucede con el mineral a flotar, debe transformarse en no mojable por adsorción de surfactantes llamados colectores de flotación. Todo esto lo podemos enunciar como sigue:

- La flotabilidad de un mineral aumenta con el ángulo de contacto por lo que es llamado *aerofílico*, que quiere decir mayor afinidad por el aire que por el agua.

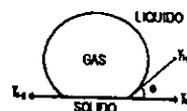


FIGURA 11: ÁNGULO DE CONTACTO^[5-8]

- La gran mayoría de los minerales por naturaleza presenta una repelencia al agua, por lo que es necesario el uso de los reactivos de flotación en la pulpa.

3.1 REACTIVOS DE FLOTACIÓN

Los colectores son los reactivos de mayor importancia en la flotación ya que son adsorbidos sobre la superficie de los minerales confiriéndoles hidrofobicidad (aerofílicos), lo que ayuda a la adhesión a la burbuja.

Los espumantes son reactivos químicos cuyas moléculas contienen un grupo polar oxigenado generalmente no ionizado y uno no polar, ejemplo: el aceite de pino o de eucalipto (polar: OH, no polar: C₁₀H₇). Estos se adsorben fuertemente en la intercara aire-líquido, lo cual confiere estabilidad en la espuma, y a altas concentraciones, también se adsorben sobre el mineral. Son solubles en agua y se utilizan como soluciones alcohólicas

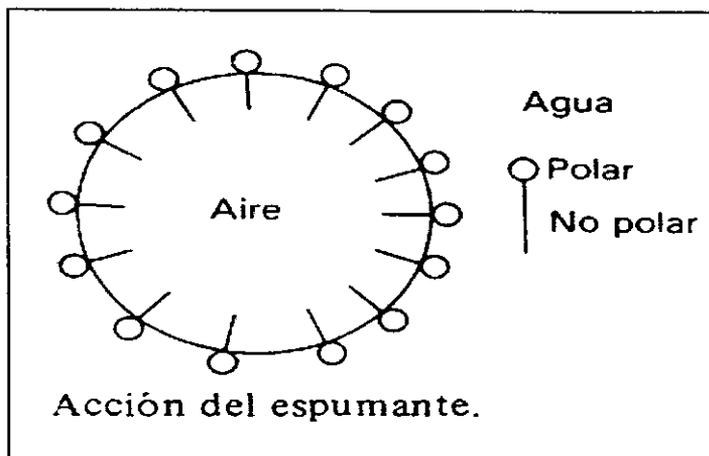
Los promotores o reguladores conocidos comercialmente como Aerofloats controlan los procesos de flotación activando o deprimiendo la adhesión de las partículas minerales a las burbujas de aire y regulando el pH.

Depresores su adición genera una superficie más hidrofílica y por tanto menos flotable. Generalmente se usan para evitar la flotación de la ganga y favorecer la flotación de los sulfuros o para realizar flotación selectiva de sulfuros. Son soluciones inorgánicas las cuales compiten con el colector por los sitios activos en la superficie de los sulfuros. El CN^- en solución alcalina evita la flotación de la pirita y la esfalerita, permitiendo la flotación selectiva de la galena.

Activadores: Sustancias que alteran la superficie de un sulfuro para que pueda adsorber un colector y flotar. Generalmente son sólo inorgánicas. El sulfato de cobre hace que la esfalerita flote con etilxantato.

Estos reactivos de flotación pueden tener más de una función, por lo que el control de sus concentraciones es de suma importancia. Un espumante puede ser utilizado como colector, un depresor para un mineral puede activar a otro, un colector con cadena larga es depresor en altas concentraciones dependiendo de la naturaleza del mineral. El uso de colectores potentes puede llegar a eliminar la necesidad de depresores y activadores substituyéndolos por el espumante adecuado.

FIGURA 12: FUNCION DE LOS ESPUMANTES^[5]



3.2 COLECTORES

Son adsorbidos por la superficie del mineral mediante fuerzas químicas o físicas. El mecanismo de quimisorción sobre la partícula, es el preferido en la práctica ya que generalmente proporciona una gran selectividad en la separación de las especies minerales y la flotación puede lograrse con una baja concentración de reactivos a menor costo. La adsorción física involucra fuerzas de Van Der Waals o enlaces de hidrógeno, sin embargo, el mecanismo usual de adsorción es la atracción electrostática entre un colector iónico y un mineral de la carga opuesta. La selección del colector depende del tipo de mineral a considerar. La selectividad en este caso es baja.

Los colectores están formados por dos partes de carácter contradictorio:

Parte hidrófoba o no polar: Constituida por una cadena hidrocarbonada, no reacciona con los dipolos del agua y posee una repelencia marcada a ésta, debido a presencia de fuerzas laterales de Van Der Waals extremadamente débiles entre cadenas hidrocarburo (las uniones C-C son fuertes).

Parte hidrófila o polar: Constituida por uno o varios grupos funcionales polares. Con características químicas tales que se adhiere a ciertos minerales y en contraste con las anteriores, tiene gran afinidad por el agua.

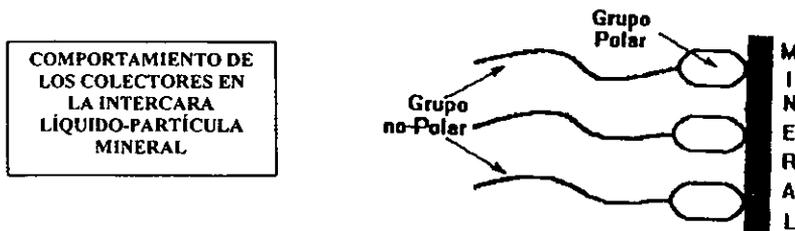


FIGURA 13⁽⁵⁾

Por las características anteriores la molécula recibe el nombre de heteropolar. Su estructura y composición predeterminan el comportamiento del colector sobre la partícula mineral al reaccionar con los dipolos del agua durante la adsorción.

La parte no polar de la molécula está orientada hacia la fase acuosa, y por consiguiente la polar se torna repelente al agua orientándose hacia la superficie del mineral.

Los colectores pueden tener carácter aniónico como los xantatos o los derivados de ácidos grasos, catiónico como las aminas y no iónico o neutro.

TIPOS DE COLECTORES

ÁCIDOS ALQUILCARBOXÍLICOS: Las primeras sustancias reconocidas con propiedades colectoras fueron los aceites insolubles en agua también llamados ácidos oleicos, que usualmente contenían una pequeña proporción de ácidos grasos y gran cantidad de aceites inactivos.

ÁCIDOS TIO ALQUÍL O ARÍL: Los aceites a base de petróleo carecen de propiedades colectoras a menos que contengan azufre. Esto tal vez dió la pauta para adicionar este elemento en los aceites, además con ello observar que los compuestos orgánicos con azufre divalente son excelentes colectores para los sulfuros metálicos.

ÁCIDOS ALQUÍL O ARÍL SULFÓNICOS Y SULFÚRICOS: Un tercer grupo surgió del uso de aceites de refinería de desperdicio como fuente barata, resultado de la purificación de éstos con ácido sulfúrico obteniendo ácidos alquilsulfónicos y alquilsulfúricos.

Los compuestos utilizados comúnmente son sales de álcalis tales como jabones y xantatos en el caso de óxidos minerales y sulfuros metálicos, respectivamente.

Por las características anteriores la molécula recibe el nombre de heteropolar. Su estructura y composición predeterminan el comportamiento del colector sobre la partícula mineral al reaccionar con los dipolos del agua durante la adsorción.

La parte no polar de la molécula está orientada hacia la fase acuosa, y por consiguiente la polar se torna repelente al agua orientándose hacia la superficie del mineral.

Los colectores pueden tener carácter aniónico como los xantatos o los derivados de ácidos grasos, catiónico como las aminas y no iónico o neutro.

TIPOS DE COLECTORES

ÁCIDOS ALQUILCARBOXÍLICOS: Las primeras sustancias reconocidas con propiedades colectoras fueron los aceites insolubles en agua también llamados ácidos oleicos, que usualmente contenían una pequeña proporción de ácidos grasos y gran cantidad de aceites inactivos.

ÁCIDOS TIO ALQUÍL O ARÍL: Los aceites a base de petróleo carecen de propiedades colectoras a menos que contengan azufre. Esto tal vez dió la pauta para adicionar este elemento en los aceites, además con ello observar que los compuestos orgánicos con azufre divalente son excelentes colectores para los sulfuros metálicos.

ÁCIDOS ALQUÍL O ARÍL SULFÓNICOS Y SULFÚRICOS: Un tercer grupo surgió del uso de aceites de refinería de desperdicio como fuente barata, resultado de la purificación de éstos con ácido sulfúrico obteniendo ácidos alquilsulfónicos y alquilsulfúricos.

Los compuestos utilizados comúnmente son sales de álcalis tales como jabones y xantatos en el caso de óxidos minerales y sulfuros metálicos, respectivamente.

CARACTERÍSTICAS DE LOS COLECTORES TIPO XANTATO

El ácido Xántico es considerado estructuralmente como un derivado sulfurado de ácido carbónico.



Los xantatos son considerados compuestos aniónicos por disociarse en solución acuosa. Los xantatos etílico, isopropílico, butílico y amílico de potasio son las sales más comunes empleadas como colectores, pues como muchos tioles, forman precipitados insolubles de metales pesado.



El factor más importante es el grupo solidofilico, el cual está compuesto por átomos de azufre bivalente (pertenecen al grupo sulfhidrilo) que condiciona la carga eléctrica en todo el xantato.

El radio del ión azufre bivalente es bastante grande por lo que es fácilmente polarizable, puede formar enlaces covalentes así como enlaces iónicos, y cuando reacciona con cationes capaces de polarizarse, el efecto es mutuo. En consecuencia se forma un enlace metálico entre ellos el cual es característico en las redes cristalinas del azufre, asemejando propiedades metálicas (brillo y alta conductividad). Por lo anterior se crean condiciones favorables para la atracción de este tipo de colectores con la superficie de las partículas minerales que contengan cationes fácilmente polarizables.

Al comparar las longitudes de los aniones de varios xantatos con su fuerza colectora, se ha observado que: "A mayor tamaño, el poder colector aumenta, pero su solubilidad en agua disminuye notablemente y por consiguiente si la cadena es corta, pierde selectividad".

Ahora bien, de estos últimos podemos decir que:

- Los de cadenas saturadas mejoran la selectividad, por ejemplo los amilxantato
- Aquellos que poseen un doble enlace tienen menor poder colector.
- Los basados en alcoholes alifático-aromáticos como los bencilxantato, son de baja actividad colectora.

RELACIÓN DE XANTATOS Y MINERALES

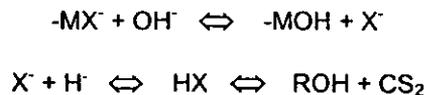
Durante la flotación de minerales se observa una adsorción química irreversible en la intercara sólido-líquido, ya que los iones xantato interaccionan formando enlaces iónicos en la superficie de las partículas minerales repelentes al agua.

Experimentalmente se determinó la existencia de enlaces estables y no estables del xantato con ciertos minerales, que al parecer es característica de todos los colectores; esto es debido a dos factores primordiales:

1. Falta de uniformidad en la superficie de la partícula mineral.
2. Formación de más de una capa de xantato sobre la misma partícula por exceso de reactivo.

En consecuencia, se obtiene una disminución en la fuerza de atracción xantato-superficie de la partícula.

Otra característica aprovechada en la flotación es el hecho de que en regiones con alta concentración de iones OH^- se observa una marcada atracción de la partícula hacia éstos por lo que la pulpa debe presentar un pH alcalino bajo, ya que de lo contrario su poder selectivo se verá afectado por los radicales OH^- que desplazarán a los iones xantato de la superficie mineral. En medio ácido el ión xantato se descompone con facilidad.



La falta de espumantes concede ventajas como lo es el controlar ampliamente el efecto colector sin bloquear el proceso.

Debido al mecanismo de adsorción-flotación de los xantatos, éstos son los colectores más utilizados en la flotación de sulfuros y metales preciosos, más no son recomendables en óxidos, silicatos, aluminosilicatos y sales de tierras alcalinas, por lo que es importante realizar un análisis minucioso de la fuerza de la superficie del mineral, previo al proceso para así determinar el tipo de reactivo con el que se trabajará.

Los xantatos más empleados son sales de sodio o potasio:

TABLA 7: CARACTERÍSTICAS DE LOS XANTATOS^[10]

XANTATOS	
SALES DE SODIO	SALES DE POTASIO
Elevada agua de cristalización, temperaturas altas disuelve fácilmente. Seco, es muy susceptible a la descomposición	No presenta problemas para su almacenaje por su gran estabilidad

En solución acuosa el xantato presenta cierta degradación por lo que la estabilidad depende del tiempo posterior a la preparación. Es recomendable adicionar soluciones preparadas minutos antes de utilizarse para evitar su descomposición.

La degradación del xantato se favorece con:

- La naturaleza alcalina del metal
- La temperatura (ya que por arriba de 10 °C presenta una rápida descomposición)
- La concentración de iones hidrónico se ve afectada cuando a pH < 5 el xantato se decompone y consecuentemente la longitud de la cadena de hidrocarburos cambia.

Para determinar si el reactivo se ha degradado es importante verificar las siguientes características:

1. Cambio de pH hacia valores alcalinos
2. Aumento en el contenido de impurezas
3. Cambios de concentración

COMPOSICIÓN DEL XANTATO O DITIOCARBONATO

Composición química del colector:

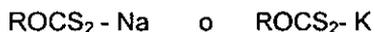
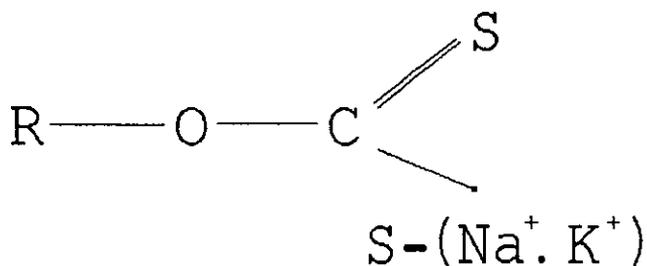


FIGURA 14: Estructura química de un xantatos o ditiocarbonato.



En la flotación de sulfuros de cobre los colectores usados son el xantato isopropílico o xantato amílico junto con los promotores AEROFLOAT 404 en dosificaciones de 10 a 100 g/t.

3.2 PROMOTORES

El circuito usual de flotación para el tratamiento de menas sulfurosas depende del uso de un colector y de un reactivo básico para recuperar el grueso de los minerales con valores en un concentrado primario.

La selección de éste último reactivo conocido como Aerofloat se basa en su eficiencia para obtener la máxima ley y recuperación en el producto final y en la debida consideración del costo por tonelada tratada.

La gran mayoría de los minerales responde fácil y rápido cuando se adiciona el reactivo adecuado, el cual es seleccionado previa investigación de la mena para su reacción y concentración individual. Sin embargo, después de flotar el grueso de los minerales promovidos por el reactivo, puede observarse una disminución en la velocidad de reacción durante la flotación. Esto indica la necesidad de utilizar un reactivo secundario más activo, que influya en las partículas minerales para responder más lento en comparación con el reactivo básico. Los reactivos secundarios conocidos comercialmente como Aerofloat poseen propiedades y limitaciones específicas como el promover partículas con superficies irregulares y de flotación lenta aumentando así la recuperación. Reacciona cuando disminuye la eficiencia del reactivo básico.

Los Aerofloats se dividen en tres categorías de acuerdo a su potencia :

TABLA 8: CATEGORÍAS DE LOS AEROFLOATS^[10]

TIPO DE REACTIVO	NOMBRE COMERCIAL
NORMALES	<ul style="list-style-type: none">• Aerofloat prometer C-4• Aeroxantato aumentar 301 (xantato secbutílico de sodio)
MAYORES	<ul style="list-style-type: none">• Aeroprometer 404• Neozin AA
MÁXIMOS	<ul style="list-style-type: none">• Aerofloat 202• Aerofloat 204, etc.

Los promotores líquidos Aerofloat son productos compuestos esencialmente por ácido aril-ditiofosfónico. Los del grupo de los cresoles contienen 7 átomos de carbón, esto es, 2 más que el alcohol amílico, por lo que la reactividad se atribuye a esta composición química. La diferencia se establece a partir de los componentes adicionados en la fórmula básica lo que les confiere propiedades y características especiales. El Kps de las sales metálicas aumenta con la longitud de la cadena.

Si se realiza la selección adecuada del reactivo secundario basándose en las necesidades del mineral en el circuito de flotación, se obtendrá la máxima recuperación, aún en los minerales resistentes a dicha operación ofreciendo una selectividad notable, siempre y cuando la adición sea en el lugar y cantidad requeridas, procurando que el pH se mantenga en la alcalinidad idónea.

Aunque estos promotores poseen propiedades espumantes y sólo en casos excepcionales se aprovecha esta característica, no se recomienda el uso como tal, ya que producen una espuma pesada la cual tiende a ser demasiado activa y poco selectiva.

TABLA 9: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS AEROFLOAT^[10]

CARACT. REACTIVO	APARIENCIA	pH	GRÁV. ESPECÍFICA	VISCOSIDAD (CPS)		PTO. EBULLICIÓN (°C)	CRISTALIZACIÓN (°C)	% DE SOLUB. EN AGUA
				0°C	30°C			
208	Líquido amarillo	10 – 13	(30°C) 1,15	25	7	103	-12	100
404		11,5 – 13	(25°C) 1,16	21	6	104	-2	

COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA ACUOSA SERIE 200

Colectores selectivos para minerales de cobre. Como metal responde rápidamente a la flotación con el promotor AEROFLOAT 208 entre otros. Excelente colector para oro, plata y cobre nativo.

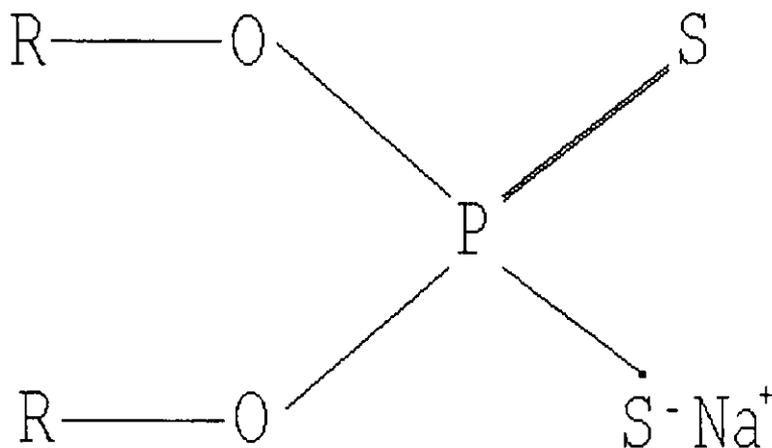


FIGURA 15: Estructura química de los promotores Aerofloat serie 200

COMPOSICIÓN DE LAS MEZCLAS ACUOSAS SERIE 400

Ampliamente usados en circuitos alcalinos para minerales de cobre acompañados de plomo, zinc y metales primarios y solos. Excelente colector para pirita y para pirita aurífera en circuitos ácidos.

En el caso de minerales de cobre ligado a óxidos se usa comúnmente el Aerofloat 404 junto con los xantatos mejorando resultados. Se adiciona en la molienda en concentraciones de 5-50 g/t.

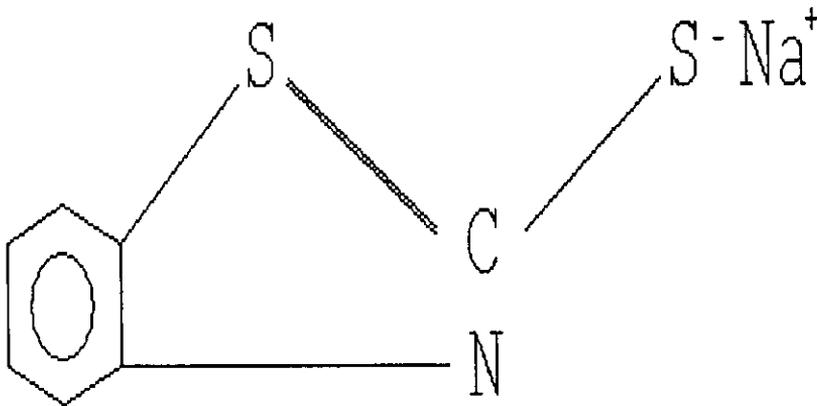


FIGURA 16: Estructura química de los promotores Aerofloat serie 400

4.0 POTENCIAL ZETA (ζ)^[14-18]

El estudio de los fenómenos electrocinéticos en la intercara sólido-líquido por medidas de potencial zeta(ζ) muestra la existencia de la carga superficial en los minerales inmersos en solución acuosa. Esta carga superficial controla la estabilidad o dispersión de partículas finas, la naturaleza y cantidad de especies adsorbidas a través de fuerzas electrostáticas y, la selección del colector a usarse para la separación de los minerales por flotación.

4.1 SISTEMAS COLOIDALES

Los coloides están en todas partes y el potencial zeta puede ser utilizado para su conocimiento y control.

Un coloide es un sistema de dos fases en el que las partículas o gotas de una fase, las cuales fluctúan de 1nm a 1 μ m, están dispersas en la segunda fase. Estos sistemas pueden ir desde muy espeso (como pastas) hasta infinitamente diluido (como aguas turbias) que es más común de encontrar.

Las soluciones coloidales son transparentes o translúcidas, presentan puntos de ebullición y de congelación vecinos a los del agua pura y son estables. Las partículas disueltas son demasiado pequeñas para precipitar y demasiado grandes para formar una solución verdadera, tienen la misma carga eléctrica y tienden a rechazarse lo cual las mantiene en dispersión.

Las propiedades de los coloides son las que definen de manera importante las cualidades y características físicas de las suspensiones. Al comprender las interacciones entre éstos, podemos modificar las características del sistema.

FUERZAS
DE
REPULSIÓN

Maximizando: Se producen suspensiones estables, ya que la repulsión entre partículas adyacentes impide las sedimentaciones rápidas y de gran tamaño.

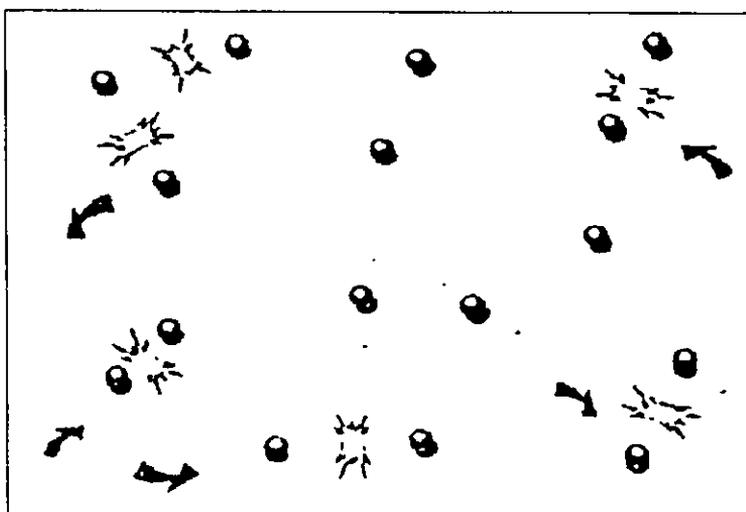
Minimizando: Se forma grandes aglomerados que sedimentan y se pueden filtrar con facilidad

Las fuerzas de unión entre la superficie del coloide y el líquido que las contiene determinan el comportamiento del sistema, esto sin perder de vista el tamaño microscópico de las partículas. Las partículas coloidales tienen carga eléctrica comúnmente de naturaleza negativa. Dicha carga genera fuerzas de repulsión electrostática entre los coloides. Si ésta es elevada los coloides permanecen dispersos y en suspensión. Reduciendo o eliminando las cargas los coloides se aglomeran y sedimentan fuera de la suspensión. Los coloides están en todas partes y el potencial zeta puede ser utilizado para su conocimiento y control.

FIGURA 17: PARTICULAS SIN CARGA ESTÁN LIBRES, PUEDEN CHOCAR O AGLOMERARSE^[15]



FIGURA 18: PARTÍCULAS CON CARGAS IGUALES SE REPELEN UNAS A OTRAS^[15]



BALANCE ENTRE FUERZAS DE REPULSIÓN Y ATRACCIÓN

Van Der Waals describe la atracción como el resultado de las fuerzas entre las moléculas individuales de cada coloide. Para conocer la variación en las fuerzas de Van Der Waals con la distribución entre las partículas utilizamos las curvas de energía de atracción.

La teoría de Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO) explica el comportamiento de los coloides en suspensión basándose en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y de atracción de Van Der Waals explicando por qué existe aglomeración entre algunos coloides.

La doble capa interfiere al existir repulsión entre partículas, por lo que es necesario inducir las a una máxima unión y obtener en consecuencia un incremento considerable de energía. Para sobrepasar la repulsión electrostática y conocer la cantidad energética que se debe aplicar venciendo dichas fuerzas se recurre a las *curvas de repulsión electrostática*.

Cuando DLVO combina esta curva con las teoría de atracción de Van Der Waals obtiene lo que se conoce como **Energía Neta de Interacción**.

Floculación, suspensión y otras propiedades pueden modificarse variando el balance entre las fuerzas de repulsión y atracción, es decir reduciendo ó aumentando la carga.

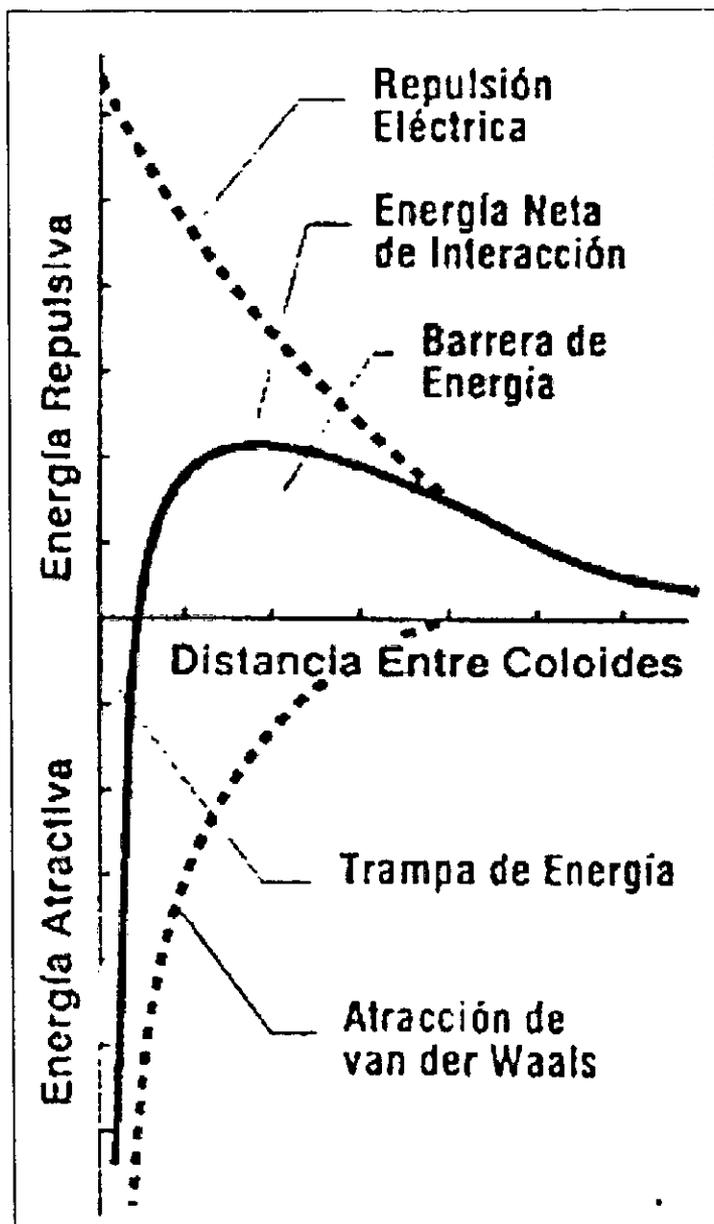
Al punto máximo de energía de repulsión se le llama *barrera de energía* y su altura nos indica la estabilidad del sistema. Al desaparecer dicha barrera las fuerzas de repulsión también se eliminan y en consecuencia la interacción neta entre partículas es atractiva unidas por fuerzas de unión de Van Der Waals.

Es posible aumentar o disminuir dicha barrera energética utilizando diferentes métodos tales como:

- Cambios en la atmósfera iónica
- Variación en el pH
- Agregando compuestos activos afectando directamente la carga de la partícula

Para todos y cada uno de los casos la medida del potencial zeta indicará los principales efectos y alteraciones con respecto a la estabilidad de la partícula.

FIGURA 19: ENERGÍA NETA DE INTERACCIÓN⁽¹⁵⁾



INTERACCIÓN: LA CURVA DE ENERGÍA NETA DE INTERACCIÓN SE FORMA AL SUBTRAER LA CURVA DE ATRACCIÓN DE LA CURVA DE REPULSIÓN.

4.2 DOBLE CAPA ELÉCTRICA

Cada vez que existe un contacto entre dos fases distintas, se genera una redistribución de cargas entre ambas; ésta se realiza en la intercara, donde se pretende un reacomodo u ordenamiento buscando un equilibrio. Cuando un sólido se pone en contacto con un líquido o solución, ocurre un rearrreglo de cargas en la región interfacial. Si la superficie del sólido adquiere una carga eléctrica, ésta es compensada del lado del líquido en la interfase por la carga de los contraiones, la cual es de la misma magnitud pero de signo contrario.

En el modelo físico de la doble capa electroquímica se describe ésta, como una capa de carga fija inmediata a la partícula o superficie sólida y una segunda capa de carga distribuida difusamente en el líquido en contacto con la partícula, resultante de las fuerzas eléctricas y del movimiento térmico al azar. Esta segunda capa contiene iones con carga de signo *contrario* a la carga fija y un déficit de iones con carga de *igual* signo que la carga fija. Los iones, contrarios e iguales, inmediatos a la superficie forman la capa de Stern y los iones alejados de la superficie forman la capa difusa o capa de Gouy. El sistema conserva su electroneutralidad:

$$\sigma_{\text{Superficie}} + \sigma_{\text{Stern}} + \sigma_{\text{Gouy}} = 0$$

La capa de Stern y la capa difusa o capa de Gouy forman la doble capa electroquímicas. Su espesor depende del tipo y concentración de iones en la solución.

La atracción de la partícula negativa hace que los iones positivos formen una capa rígida adyacente alrededor de la superficie del coloide conocida como capa de Stern. Otros iones positivos aún atraídos por el coloide son rechazados por la capa de Stern. Este equilibrio dinámico genera la formación de una capa difusa de contra-iones. La concentración de éstos es alta cerca de la superficie y disminuye con la distancia hasta alcanzar el equilibrio en el seno de la solución. Similarmente

la concentración de iones en la capa difusa se incrementa al alejarse del coloide. La densidad de carga es igual a la diferencia de concentraciones de iones (+) y de iones (-), a cualquier distancia de la superficie. Es mayor cerca del coloide y disminuye hasta cero cuando las concentraciones de los iones se asemejan.

POTENCIAL EN LA INTERCARA

La existencia de la doble capa eléctrica es una consecuencia general del encuentro de dos fases en un límite. Como resultado éstas adquieren una carga neta de igual magnitud pero de signo opuesto. La separación de las cargas genera una diferencia de potencial en la intercara, la doble capa eléctrica, cuando una partícula se pone en contacto con una disolución electrolítica.

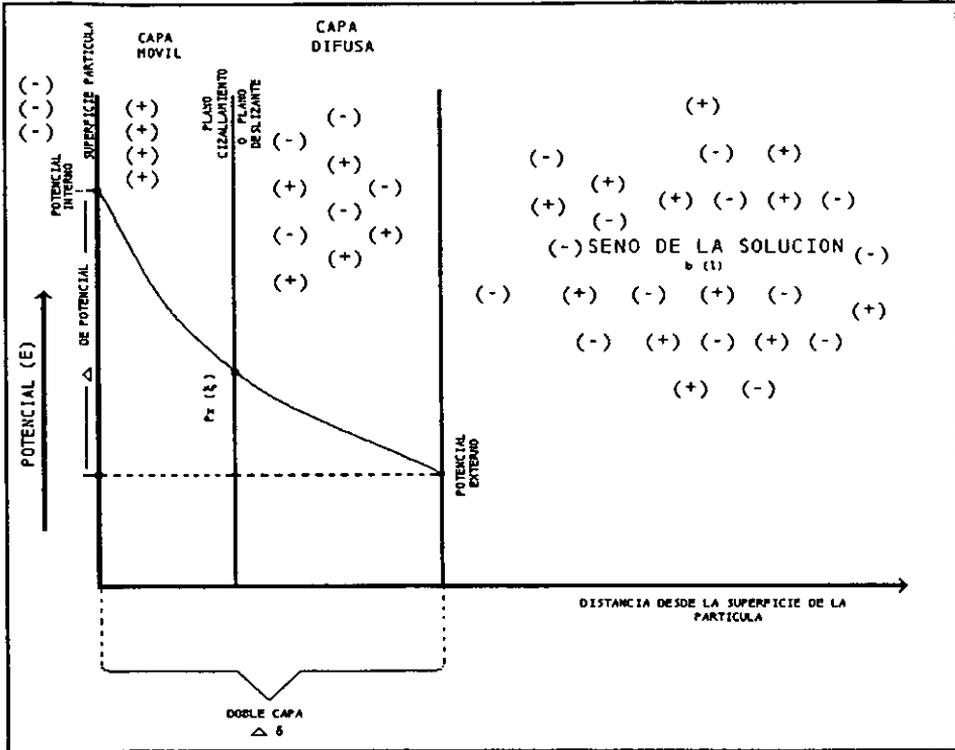
La diferencia de potencial partícula-disolución se genera por la aparición de cargas superficiales libres o inducidas (en exceso o en defecto) respecto al seno de las fases sólido-líquido. A este potencial generado se le denomina potencial externo, o de Volta (Ψ^α).

Cuando un sólido sin carga eléctrica inicial se pone en contacto en una disolución con moléculas polares, uno de sus extremos dipolares se orienta hacia la superficie, obteniendo así una orientación de todos (o casi de todos) los dipolos presentes en forma de capas en una misma dirección. En este último fenómeno la orientación de los dipolos en la superficie nos dará la diferencia de potencial la cual en fase α se conoce como potencial superficial representado como X^α .

En general la diferencia de potencial entre las dos fases se produce gracias a ambas contribuciones: la del potencial superficial y la del potencial externo. A esta suma se le denomina potencial interno o de Galván y se representa como ϕ^α , de dónde tenemos:

$$\phi^\alpha = \Psi^\alpha + X^\alpha$$

FIGURA 20: CAPA DE STERN : $(M_{\Delta} S_{\delta}) = M_{\Delta} S_{\phi} - M_{\Delta} S_{\psi}$



4.3 FENÓMENOS ELECTROKINÉTICOS.

Cuando una de las dos fases se mueve con respecto a la otra se manifiesta un fenómeno electrocinético, consecuencia de la combinación de fenómenos de movimiento y eléctricos. Cuando dichos fenómenos se presentan por la migración de partículas (sólidos, gotas o burbujas) con respecto a la fase continua que las rodea el fenómeno electrocinético se denomina *electrofóresis*.

La electrofóresis microscópica consiste en la determinación de la velocidad de movimiento de las partículas cargadas de una solución contenida en una celda cilíndrica o rectangular bajo un gradiente de potencial. Dicha determinación depende de la visibilidad al microscopio de las partículas en la celda.

La movilidad electroforética o velocidad de desplazamiento de una partícula cargada por unidad de campo eléctrico está dada por la siguiente ecuación:

$$(u/E) = f(\kappa, a) \cdot [(\epsilon\zeta) / (4\eta\pi)]$$

donde:

u = Movilidad electroforética

E = Diferencia de potencial de flujo

κ = Espesor de la doble capa difusa de iones de signo contrario

a = Radio de la partícula

ϵ = Permitividad del medio

ζ = Potencial zeta o Potencial electrocinético

η = Viscosidad del medio

De donde despejando ζ obtenemos la siguiente ecuación:

$$\zeta = (4\eta\pi u) / [(\epsilon\epsilon) \cdot f(\kappa, a)]$$

4.4 POTENCIAL ELECTROCINÉTICO

Cada partícula cargada está rodeada de una capa difusa de iones neutralizantes o contraiones. Ésta genera un potencial eléctrico del orden de milivolts a través de la capa difusa entre el coloide y la solución. La magnitud de este potencial es aproximadamente proporcional a la carga superficial del coloide, y este es llamado potencial electrocinético.

El potencial electrocinético también llamado potencial zeta, ζ , se conoce como la caída de potencial a través de la parte móvil de la doble capa responsable de los fenómenos electrocinéticos, es positivo cuando el potencial en la intercara sólido-líquido es mayor al potencial en la fase líquida.

Para calcular el potencial electrocinético se considera que el líquido adherido a la parte sólida y el que está en movimiento están separados por un plano de cizallamiento. La magnitud del potencial zeta (ζ) depende de la posición del plano. Éste se localiza muy cerca de la superficie, por lo que se considera que el potencial zeta es una medida del potencial en el plano de Stern. Corresponde a "la diferencia de potencial entre los iones de la capa difusa y los iones a la izquierda del plano deslizante tomando en cuenta su signo.

Las medidas de potencial zeta se hacen usando la técnica llamada microelectroforesis empleando un microscopio estereoscópico de alta calidad para observar las partículas dentro de una celda electroforética. La celda consiste de un tubo capilar de cuarzo en cuyos extremos o compartimentos se conectan los electrodos de platino y sobre éstos se aplica una diferencia de potencial la cual crea un campo eléctrico a través de la celda. Los coloides cargados se mueven en el campo y su velocidad y dirección están relacionados con su potencial zeta.

Al medir el potencial de una partícula que se mueve a través de una solución (potencial en el plano deslizante o potencial zeta), se obtiene el valor del potencial a cierta distancia de la superficie (ya que es importante recordar que ζ no es el

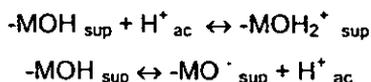
potencial de superficie), por lo que su valor cualitativo es realmente más importante que el cuantitativo.

El conocer el valor del potencial zeta ayuda a optimizar el uso excesivo de reactivos de flotación, de floculantes, de dispersantes, etc.

4.5 CAMBIO DE POTENCIAL ELECTROCINÉTICO

La carga eléctrica y la magnitud de potencial de superficie dependen del exceso de cationes o aniones (la concentración) en la superficie del sólido dando como resultado el signo (+ o -). Esto se presenta como consecuencia de que un mineral puede adquirir una carga superficial de acuerdo a los siguientes mecanismos:

- 1- Adsorción preferencial en la interfase de los iones constituyentes de la red cristalina del sólido iónico. Ejemplo: Adsorción de Ag^+ y S^{2-} sobre Ag_2S , adsorción de Ba^{2+} y SO_4^{2-} sobre barita. Estos iones pueden migrar entre la fase líquida y la fase sólida por lo que determinan el potencial de la superficie y se llaman iones determinantes del potencial.
- 2- Ionización de los grupos hidróxido superficiales de los óxidos. Ejemplo: Los óxidos reaccionan con el vapor de agua formando sitios hidróxido en su superficie y adquieren carga mediante la adsorción de H^+ o ionización del H^+ de los hidróxidos formados.



- 3- Adsorción directa de H^+ y OH^- sobre los óxidos.

En cualquiera de los dos últimos casos hay cambio en el pH de la solución.

$$\sigma_{\text{Superficie}} = zF(\tau_{\text{H}^+} - \tau_{\text{OH}^-})$$

- 4- Sustitución isomorfa en la red cristalina del sólido. Ejemplo: Desplazamiento del Si^{4+} por Al^{3+} en el tetraedro de la sílice o al desplazamiento de Al^{3+} por Mg^{2+} en el octaedro de la red cristalina de los silicatos estratificados. Las terminaciones de las hojuelas cristalinas se comportan como óxidos complejos. En las arcillas, las caras tienen carga negativa fija y los bordes tienen carga variable controlada por el pH.

- 5- Polarización de la interfase por la aplicación de un potencial con una fuente externa. Ejemplo: Polarización de un mineral semiconductor o de un metal en una celda de polarización.
- 6- Ionización de grupos iónicos. Ejemplo: Ionización de grupos carboxilato en el látex.
- 7- Adsorción específica de iones afines a la superficie. Ejemplo: Adsorción de surfactantes iónicos.

Si la superficie del sólido adquiere carga eléctrica, ésta se compensa por la carga de los contraiones del lado del líquido en la interfase, la cual es de la misma magnitud pero de signo contrario. El exceso de cationes o aniones en la superficie del sólido da como resultado el signo de la carga.

Los iones juegan un rol predominante en la definición de la naturaleza de la doble capa eléctrica y pueden tener diferentes funciones. Pueden ser iones determinantes del potencial por su alta afinidad por la superficie, iones indiferentes por sus interacciones electrostáticas con la superficie y iones adsorbidos específicamente los cuales no tienen afinidad electrostática por la superficie.

Los iones que dan lugar a la carga superficial σ_0 son los llamados iones determinantes del potencial, y son específicos de cada sólido. Dicha carga es función de la fuerza iónica y de los iones determinantes del potencial en la solución.

Estos iones tienen gran afinidad por la superficie y pueden pasar a través de las fases y llegar a ser parte de la superficie. Los iones H^+ y OH^- determinan la carga superficial en los óxidos, los iones Ag^+ y I^- en el AgI y los iones Pb^{2+} y SO_4^{2-} en el $PbSO_4$.

Los iones determinantes del potencial cambian el potencial de superficie Ψ_0 , comprimen la doble capa eléctrica cambiando el potencial de la capa de Stern Ψ_δ (ζ) y pueden cambiar el signo del potencial zeta.

La carga superficial $\sigma_{\text{superficie}}$ está dada por la diferencia de adsorción de los cationes y aniones determinantes del potencial:

$$\sigma_{\text{superficie}} = zF (\tau_{IDP^+} - \tau_{IDP^-})$$

donde F es la constante de Faraday, z es la valencia de los iones determinantes del potencial τ_{IDP^+} y τ_{IDP^-} son los cationes y los aniones determinantes del potencial adsorbidos en la superficie y no en la capa difusa.

La magnitud y signo de la carga superficial dependen no sólo de la concentración de los iones determinantes del potencial sino de la concentración y naturaleza de los iones indiferentes. Existe un valor particular en el que $\sigma_{\text{superficie}}$ es independiente de la concentración de electrolito e igual a cero, esta situación es llamada potencial de carga nula o potencial de carga cero:

$$\tau_{IDP^+} = \tau_{IDP^-} \text{ y } \sigma_{\text{superficie}} = 0.$$

El punto de carga nula o PCN es la característica más importante de la superficie de un mineral en solución acuosa. Es el parámetro que describe el fenómeno de doble capa eléctrica en la intercara mineral-agua. El PCN se refiere a la condición en la que $\sigma_{\text{superficie}} = 0$, es decir, dicho punto corresponde a una densidad de adsorción de cationes y aniones determinantes del potencial, IDP^+ y IDP^- , igual. Cuando $\sigma_{\text{superficie}} = 0$ y $\Psi_0 = 0$, la doble capa eléctrica no existe y esta condición corresponde al PCN del material.

Su importancia reside en el hecho de que el signo de la carga de superficie es el factor determinante en la adsorción de iones, particularmente de iones de carga opuesta a la carga de la superficie, lo cual debe ser considerado para cargar de manera adecuada un mineral.

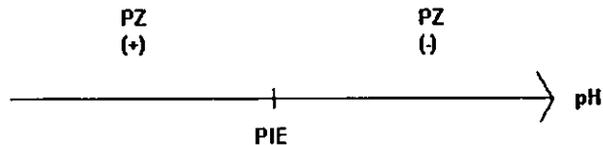
El punto isoeléctrico o PIE es la condición en la cual el potencial zeta es cero:

$$\sigma_{\delta} = 0$$

En el PIE la carga del sólido en la capa difusa es cero.

El PCN y el PIE frecuentemente se usan de manera indistinta debido a que en ausencia de adsorción específica PCN = PIE. Una partícula que no posee carga fija está en su PCN. Cuando ésta no muestra electroforesis está en su punto isoeléctrico PIE, como un macro-ión de un polianfolito, una proteína.

En óxidos de minerales insolubles los iones H^+ y OH^+ determinan el potencial y se cargan basándose en el punto isoeléctrico (PIE):



Los minerales pueden mostrar más de un PIE y diferentes minerales pueden presentar el mismo valor de PIE con un mismo catión.

Los iones indiferentes son adsorbidos sólo para mantener la electroneutralidad en el sistema. Cualquier tipo de electrolito puede tener esta función, pues se adsorben por atracciones electrostáticas y sólo están presentes como contraiones. La primera capa de contraiones está situada a una distancia δ de la superficie en el plano de Stern, determinada por el radio iónico.

Es el caso del NO_3^- y ClO_4^- para óxidos: Estos iones no afectan el potencial de superficie, aunque comprimen la doble capa eléctrica, no pueden cambiar el signo del potencial zeta, sólo pueden hacerlo tender a cero.

Otros iones presentan afinidad no electrostática por la superficie sin ser parte de ella. Son iones que se adsorben específicamente como cationes y aniones

divalentes y polivalentes y surfactantes catiónicos y aniónicos. No afectan el potencial de superficie Ψ_0 , comprimen la doble capa y pueden cambiar el signo del potencial zeta.

Los iones polivalentes pueden alterar la carga superficial de un mineral en solución (tales como Fe^{3+} , Al^{3+} y Co^{2+}), pues cerca de su valor de pH de precipitación en soluciones diluidas pueden ser específicamente adsorbidos, ocasionando que el potencial decrezca o que el signo de la carga del mineral en solución se invierta. Este último se aplica en los fenómenos de floculación y activación.

Hay especies iónicas que además de atracciones electrostáticas presentan actividad superficial, son llamados también contraiones de superficie activa. Los colectores de flotación, entran en esta categoría.

4.6 IMPORTANCIA PRÁCTICA DEL POTENCIAL ZETA

Controla la estabilidad de sistemas coloidales, así como la naturaleza y magnitud de los procesos de adsorción de especies iónicas.

La máxima agregación ocurre en el PCN ya que no hay doble capa eléctrica. Esta condición es aprovechada para la floculación, sedimentación y viscosidad de coloides, en tratamiento de aguas residuales, etc.

La sobreposición de las dobles capas eléctricas causa repulsión entre las partículas, lo cual es aprovechado en la estabilidad de suspensiones coloidales en suspensiones farmacéuticas, pinturas, etc.

La electroforésis y electrodeposición dependen de la diferencia del movimiento de las partículas en las fases de un sistema. El ζ se modifica mediante el proceso de adsorción de especies iónicas en la intercara controlando dichos procesos, es

decir, al cambiar la actividad de los iones determinantes del potencial o identificando las condiciones a los que los iones inorgánicos y orgánicos se adsorben específicamente en la intercara (el ζ varía al controlar los procesos de adsorción).

Las partículas minerales por naturaleza presentan hidrofobicidad la que depende de la irregularidad de la superficie, la cual se modificará en presencia de reactivos para su separación por flotación tales como xantatos y colectores, así como variaciones de pH, basándose en la naturaleza de cada uno de los minerales presentes. La composición química estequiométrica y estructural cristalina de los sólidos en contacto con el agua juega un papel importante en el grado de hidratación que ocurre en la interfase sólido-líquido y el fenómeno de adsorción que afecta el fenómeno de flotación.

4.7 POTENCIAL ZETA Y FLOTACIÓN

Las técnicas electrocinéticas proveen de un método para medir los efectos eléctricos debidos a la adsorción. En general la carga adquirida por lo minerales es de naturaleza negativa. En suma al control de la adsorción de colector, la doble capa controla también la cinética del contacto burbuja-partícula mineral en los procesos de flotación.

Los minerales para flotación deben presentar tamaños tan pequeños que faciliten la selectividad en el proceso de separación física de las partículas mediante procesos químicos.

La doble capa eléctrica controla la floculación y dispersión de las suspensiones minerales.

La magnitud y el signo de la carga eléctrica en la superficie controla la adsorción física de reactivos, si la carga muy alta impide la adsorción de reactivos que se adsorben químicamente, como los colectores en el caso de los sulfuros minerales.

Los floculantes no cambian la carga en el mineral y son muy valiosos puesto que provocan una agregación de coloides o floculación espontánea llevando el potencial zeta (ζ) a valores bajos, alrededor de -10 mV se han observado buenos resultados.

III. EXPERIMENTACIÓN

En el presente trabajo y de acuerdo al objetivo planteado primeramente se llevó a cabo la caracterización química, menagráfica y granulométrica de las muestras de mineral y de concentrado, y posteriormente se realizaron los estudios de potencial zeta (ζ) de los minerales solos (cuarzo, pirita y calcopirita) y en presencia de colectores (xantatos etílico, amílico e isopropílico de potasio) y de colectores (xantatos etílico, amílico e isopropílico de potasio)/promotores (Aerofloat 208 y Aerofloat 404 de Cyanamid), bajo el esquema siguiente:

- Las caracterizaciones química y menagráfica se realizaron con muestras minerales de cabeza y concentrado.
- Respecto a la caracterización granulométrica, para cabeza se determinó la distribución porcentual y para el concentrado se realizó el análisis de malla.
- En este trabajo se buscó reproducir las condiciones reales de operación en una planta de beneficio de minerales sulfurados. Se empleó un tamaño de partícula que oscilaba entre 38 y 45 micrones aproximadamente (38 a 45 μ). La concentración de los Xantatos y los Aerofloats fue de 4 g/ton en todas las corridas, similar a la utilizada en planta.
- Las determinaciones de potencial zeta se llevaron a cabo con los minerales cuarzo, pirita y calcopirita, todos ellos en función del pH. El efecto de los reactivos de flotación se evaluó midiendo también el potencial electrocinético de los minerales en presencia de éstos.
- Para cada experimento se midió el potencial zeta en función del pH a 10 diferentes valores de éste, en un rango de pH entre 3 y 12, en intervalos de una unidad, tanto para los minerales solos como para cada combinación mineral-colector y mineral-colector-promotores.

1.0 CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES

1.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

El mineral de cabeza fue homogeneizado para después realizar un cuarteo, con el fin de que presentara uniformidad. La muestra de mineral se molió a 250 mallas aproximadamente, para obtener la mayor liberación posible de Au y Ag, ya que por estudios anteriores se ha detectado cierto encapsulamiento. El concentrado fue homogeneizado y las muestras tomadas mediante el método de cuarteo.

1.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MUESTRA

1.2.1 ANÁLISIS DE MALLA

Se llevó a cabo para conocer la distribución granulométrica del mineral en estudio con el mineral de cabeza una vez molido, homogeneizado y cuarteado con el fin de que el análisis d

TABLA 1era resultados aceptables.

10: ANÁLISIS DE MALLA (CABEZA).

ABERTURA MALLA	TAMANO EN MICRÓMETROS	PESO (g)	
-100	+150	106	73.5471
-150	+200	75	47.9493
-200	+325	45	50.9442
-325	+400	38	16.9520
-400	Pan	> 38	64.7200
TOTAL			254.1126

Se realizó un análisis granulométrico para el concentrado procediendo nuevamente a la homogeneización y al cuarteo. Por la humedad el concentrado se encontraba aglutinado, se procedió a tratarlo con acetona para poder llevarlo a cribado. Las pruebas fueron realizadas por triplicado para garantizar resultados.

TABLA 11: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (CONCENTRADO)

N°. DE MALLA	CANTIDAD (%)
60	0
80	0.80
120	6.54
150	6.61
200	22.69
250	26.26
250	37.06
TOTAL	99.96

1.2.2 GRADO DE LIBERACIÓN

Se determinó la liberación de las partículas del mineral de cabeza una vez molido, homogenizado y cuarteado clasificándose en: primarias, secundarias y terciarias, seleccionando al azar muestras de cada uno de los retenidos en cada malla los cuales se observaron en un área de 0.25cm² a través del microscopio óptico.

TABLA 12: GRADO DE LIBERACIÓN (CABEZA)

Nº. DE MALLA	LIBERACIÓN (%)	OBSERVACIONES
20	Partículas terciarias 100	Partículas combinadas con cuarzo principalmente y otros minerales en gran porcentaje
40	Partículas primarias 10 Partículas secundarias 10 Partículas terciarias 50	Valores aún asociados con cuarzo, en todos los porcentajes.
60	Partículas primarias 20 Partículas secundarias 45 Partículas terciarias 35	Disminuye la asociación del cuarzo, sobre todo en las partículas primarias y secundarias.
80	Partículas primarias 10 Partículas secundarias 50 Partículas terciarias 40	La ganga sigue unida a algunas partículas.
120	Partículas secundarias 24 Partículas cuarzo 76	Se observan polvos que enmascara a partículas mayores.
150	Partículas secundarias 15 Partículas terciarias 85	Liberación casi total de partículas.
200	Partículas secundarias 5	Liberación en un 95 %

1.3 ANÁLISIS QUÍMICO

Se tomaron muestras del concentrado y del mineral de cabeza, ambos previamente homogenizados y cuarteados, para su análisis de contenido de oro y plata por copelación los cuales se realizaron en La Casa de Moneda, así como para análisis de otros elementos por espectrometría de adsorción atómica.

TABLA 13: ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS

ELEMENTO/MUESTRA	CONCENTRADO	CABEZA
Au (g/t)	73.0	1.3
Ag (g/t)	200.0	274.0
Cu (%)	16.42	0.26
Fe (%)	23.69	5.95

Para la determinación de insolubles se tomaron muestras de 0.5 g de mineral de cabeza, el ataque se realizó con 20 ml HNO₃ durante 15 min, hasta la desaparición de gases blancos. El residuo se filtró, se lavó con agua destilada, se secó en estufa a 90°C y se pesó.

TABLA 14: CONTENIDO DE INSOLUBLES

Nº. MUESTRA	W _r (g)*	INSOLUBLES (%)
1	0.4711	91.4934
2	0.4590	91.470
3	0.4649	91.6962

* W_r = pesos después del ataque

1.4 ANÁLISIS MENAGRÁFICO¹⁹¹.

1.4.1 ANÁLISIS ÓPTICO

Cuando se logró el tamaño deseado del mineral de cabeza nuevamente se homogeneizó y se cuarteó. Se tomaron muestras del mineral de cabeza y de concentrado, se montaron en resina, se pulieron a espejo (2 de concentrado y 2 de cabeza) para la identificación de especies minerales. El análisis menagráfico del mineral se realizó mediante un microscopio óptico de luz reflejada polarizable.

TABLA 15: CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS DE LOS MINERALES OBSERVADOS.

MINERAL IDENTIFICADO	COLOR EN LUZ BLANCA	OTRAS CARACTERÍSTICAS	TAMAÑO EN MICRONES (μm)
Calcopirita	Amarillo bronce	-	-
Pirita	Amarillo tenue	Asociada a calcopirita	-
Esfalerita	Gris metálico	Asociada a pirita	esfalerita 15.2X8.75, pirita 10.9X8.31
Calcopirita	Amarillo bronce con inclusiones azul claro	Asociada a covelita	-
Esfalerita	Gris metálico	Asociada a calcopirita	-
Calcocita	Blanco a gris	Inclusiones de covelita	
Esfalerita	Gris metálico	Asociado con covelita	Inclusiones 6.56X1.75
Galena	Gris oscuro	-	-

1.4.2 ANÁLISIS FOTOGRAFICO

Los minerales reflejan la luz. Su reflectancia (brillo) depende de la longitud de onda de la luz incidente, y se puede medir cuantitativamente con un fotómetro. Esta propiedad del mineral se puede correlacionar directamente con la cantidad de luz necesaria durante una toma fotográfica, y por tanto con el tiempo de exposición.

En una gráfica de por ciento reflectancia de minerales referencia contra tiempo de exposición por extrapolación se determinaron los valores de %R de los minerales a analizar. Con ayuda de tablas y otras propiedades de éstos se identifican dichos minerales.

1.4.2.1 TIEMPOS DE EXPOSICIÓN

TABLA 16: TOMA FOTOGRÁFICA GLOBAL

FASES	OBSERVACIONES
Café rojiza, Calcopirita, Pirita, gris claro y oscuro	A media luz de 9.55 seg. Y 12.02 seg. con toda la luz (diafragma cerrado).

A 100X se observaron las fases individuales :

TABLA 17: TOMAS FOTOGRÁFICAS A 100X

MINERAL O FASE	TIEMPO DE EXPOSICIÓN (SEG)	% REFLECTANCIA*
Bornita	9.55 a 10	29.14
Calcopirita	4.89 a 5.12	43-48
Pirita	2.04	54
Gris claro	4.57	34.65
Gris medio	7.07	32.21
Gris oscuro	≈ 30.20	9.71
Fase brillante	1.45	37.6
Cuarzo	12.5	8.0

1.4.2.2 DUREZA

Durante el análisis al microscopio se pudieron observar 7 diferentes fases, las cuales presentaron los siguientes colores :

1. Gris oscuro
2. Gris claro
3. Gris mate
4. Amarillo oro
5. Café rosado
6. Blanco Brillante
7. Violeta

La dureza relativa se puede determinar al desplazar la línea de luz del mineral (línea de Kalb) al movimiento de la platina del microscopio. Ésta se mueve del mineral más duro al mineral más suave al alejar la platina, es decir, al incrementar la distancia entre el objetivo y el espécimen.

La dureza relativa también puede observarse a la raya, ya que ésta se ajusta al atravesar un material más duro. Mediante el uso del micrómetro puede medirse fácilmente.

El análisis de dureza mediante raya Kalb (100X) entre las diferentes fases arrojó los siguientes resultados:

TABLA 18: DUREZA RELATIVA DE LAS FASES (KALB)

FASES PRESENTES	
DUREZA	TIPO MINERAL
MAYOR DUREZA  MENOR DUREZA	CUARZO
	PIRITA
	CACOPIRITA
	CAFÉ ROSADO
	GRIS OSCURO
	GRIS CLARO
	GRIS MATE

1.4.3 MICRODUREZA

En esta prueba se utilizó un equipo para medir dureza Vickers y para poder identificar las fases presentes en las muestras montadas previamente en resina y pulidas a espejo. Se tuvieron algunos problemas, ya que es muy importante utilizar el polarizador en tono verde el cual cambió completamente el color inicial de las muestras.

TABLA 19: RESULTADOS DE MICRODUREZA VICKERS

FASES OBSERVADAS AL MICROSCOPIO	PRIMERA DIAGONAL	SEGUNDA DIAGONAL	PROM. DIAGONAL EN MACRÓMETROS	PROMEDIO DIAGONAL EN MICRÓMETROS	CARGA (Kg)	DUREZA VICKERS
Matriz	31.0	30.5	30.75	0.03075	0.05	98.03
Línea blanca	56.5	57.5	57.00	0.057	0.05	28.53
Gris claro	38.0	39.0	38.50	0.0385	0.05	62.54
Amarillo oro	25.0	25.0	25.00	0.025	0.05	148.32
Blanco opaco	34.5	35.0	34.75	0.03475	0.05	76.77
Blanco brillante	39.0	38.5	38.75	0.03875	0.05	61.74
Gris oscura	25.0	25.0	25.00	0.025	0.05	148.32
Pirita	15.0	14.5	14.75	0.01475	0.05	1704.34
Placa blanca	44.0	42.5	43.25	0.04325	0.05	49.55

Al realizar las pruebas de dureza Vickers para estimar la dureza relativa entre las fases en el mismo microscopio a 100X se observó lo siguiente :

TABLA 20: DUREZA RELATIVA DE LAS FASES (VICKERS)

FASES PRESENTES	
MAYOR DUREZA	MENOR DUREZA
Pirita	Café rojiza
Café rojiza	Gris oscura
Gris oscura	Gris claro
Pirita	Calcopirita
Calcopirita	Café rojizo ligero
Gris medio	Gris claro
Gris claro	Café rojiza

La relación entre los dos parámetros más fáciles de medir, la reflectancia y la dureza Vickers, así como el uso de tablas, permite identificar a la mayoría de los minerales.

1.4.5 MEB y Microanálisis por Rayos-X.

El siglo pasado se analizaban rocas usando microscopios de polarización o petrográficos. Hoy día con la introducción del microscopio Electrónico de Barrido además de ver secciones delgadas de rocas, se puede observar el interior de las porosidades, identificar los minerales más pequeños, examinar la distribución de otros presentes dentro de los poros, examinar superficies rugosas, fracturadas, etc. Por su alta resolución, gran amplitud de campo y facilidad para preparar la muestra, el MEB ha llegado a ser una herramienta de investigación indispensable para los metalurgistas. La adición del detector de Rayos-X proporciona además la posibilidad de llevar a cabo un análisis químico de muestras microscópicas.

Cuando se hace incidir un haz electrónico sobre una muestra, los electrones pueden interactuar con los núcleos atómicos que contienen protones y neutrones, con la capa de los electrones de la órbita teniendo niveles de energía discretos o con los electrones de la última banda posesionándose de un alto rango de energías. Las alteraciones resultantes en la energía del electrón pueden ser medidas dando información de la naturaleza de la muestra.

Cuando electrones de alta energía inciden sobre la muestra los electrones de los orbitales pueden ser desplazados de un átomo generando una vacancia. Los electrones de los orbitales de mayor energía dentro del átomo llenan inmediatamente estas vacancias y la diferencia de energía entre estos dos orbitales es emitida como un fotón de Rayos-X. Estos Rayos-X son característicos del átomo emisor y los elementos del espécimen se identifican mediante el uso de detectores para la recolección de Rayos-X. El detector más comúnmente utilizado es el de estado sólido de energía dispersa.

2.0 COMPORTAMIENTO ELECTROKINÉTICO DE LAS MUESTRAS

Para la realización de dichos estudios fue necesario contar con un equipo determinador de potencial zeta (ζ) llamado Zeta-metro 3.0+ mediante el cual se observa el comportamiento de las partículas midiendo el potencial electrocinético de éstas partiendo de la aplicación de un voltaje (diferencia de potencial). Dicha técnica se llama *MICROELECTROFORESIS* y se basa en el principio de migración de transporte de masa donde la especie cargada es transportada por un gradiente de potencial eléctrico.

El equipo está compuesto por :

- Microscopio de alta resolución
- Cámara o celda capilar de cuarzo
- 2 Compartimentos electródicos unidos por la celda
- Dos electrodos de Platino
- Fuente de poder

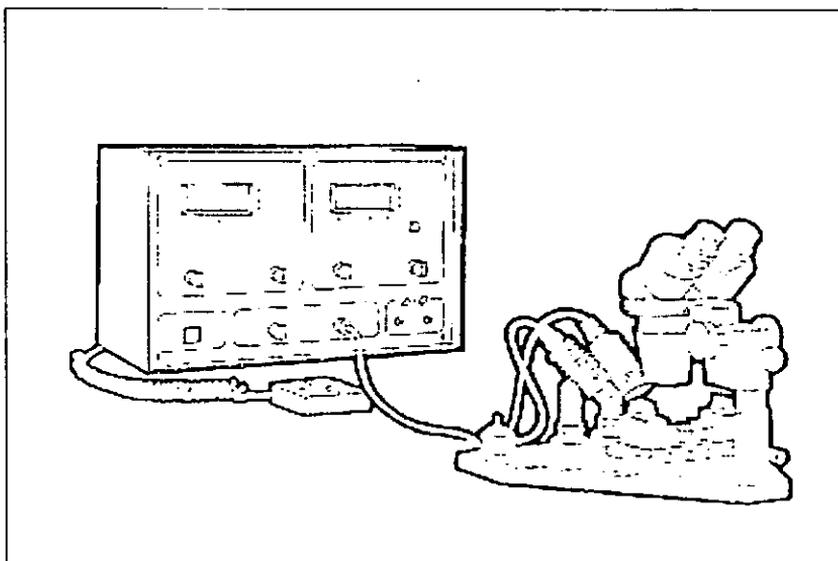


FIGURA 21: ZETA-METER 3.0+^[15]

Las partículas cargadas se transportan a través del tubo capilar y su movimiento y dirección está en relación con su carga de superficie, y por tanto, con su potencial zeta.

El concepto de l zeta se conoce desde hace 100 años. Con este estudio se busca conocer el potencial electrocinético, y por ende la carga superficial, de los minerales en función del pH, y su evolución en presencia de colectores y promotores utilizados en la flotación.

Los estudios de potencial zeta (ζ) se realizan en función del pH con el fin de observar el comportamiento de las partículas así como el valor de los puntos de carga cero con miras a determinar la mejor respuesta a la flotación selectiva.

Se estudió el comportamiento de las partículas de cuarzo, piritita y calcopiritita solos y en presencia de colectores y de colectores+promotores. Los colectores utilizados fueron amilxantato de potasio, etilxantato de potasio e isopropilxantato de potasio y los promotores Aerofloat 208 y Aerofloat 404 de marca Cyanamid.

2.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS.

Para cada sistema las soluciones se prepararon suspendiendo 0.5 g de mineral en 500 mL de H₂O destilada y dejando acondicionar por espacio de 10 min bajo agitación suave con el fin de permitir alcanzar el equilibrio entre el mineral y la fase acuosa.

La pulpa anterior se dividió en 10 partes iguales cada una de las cuales se acondicionó bajo agitación suave por espacio de 1Hr más. Finalmente se ajustaron los valores de pH distribuyendo los 10 puntos en un rango de 3.0 a 12.0.

2.2 MEDIDAS DE POTENCIAL ZETA (ζ) DE LOS MINERALES SOLOS

Cada pulpa se transfiere a la celda. Se insertan los electrodos y se mide el potencial zeta aplicando una diferencia de potencial de 100V. Para lo anterior se coloca la celda (cuyos compartimentos electródicos están unidos por un tubo capilar de cuarzo) bajo el microscopio y se conecta al zetámetro, el cual mide la conductividad específica de la muestra permitiendo seleccionar adecuadamente la diferencia de potencial de aplicación. Se enfocan las partículas en la parte media del capilar de la celda y se mide el potencial zeta.

La medida de potencial zeta se toma presionando el botón derecho o izquierdo según la dirección de la partícula, mientras esta última cruza la escala, de una marca a otra.

2.3 MEDIDAS DE POTENCIAL ZETA (ζ) EN PRESENCIA DE REACTIVOS DE FLOTACIÓN.

Una vez preparadas las 10 muestras y regulado el pH se adicionan a cada pulpa 200 microlitros (μ l) de solución de reactivo, colectores y colectores+promotores, preparados en agua destilada a una concentración de 4 g/ton, dejando se acondicione por espacio de 30 min.

A cada fracción se le acondicionó nuevamente sin dejar de agitar por espacio de 1 Hr, tiempo durante el cual se regularon los pH distribuyéndolo los valores entre 3 y 12 para cada una de las fracciones. Después de este período de tiempo se ajustaron a los valores iniciales de pH y se midió el valor del potencial zeta (ζ), bajo las mismas condiciones de potencial aplicado.

Las técnicas electrocinéticas proveen de un método para medir los efectos eléctricos debidos a la adsorción. En general la carga adquirida por los minerales es de naturaleza negativa. En suma al control de la adsorción de colector, la doble

capa controla también la cinética del contacto burbuja-partícula mineral en los procesos de flotación.

Los minerales para flotación deben presentar tamaños tan pequeños que faciliten la selectividad en el proceso de separación física de las partículas mediante procesos químicos. La doble capa eléctrica controla la floculación y dispersión de las suspensiones minerales.

La magnitud y el signo de la carga eléctrica en la superficie controla la adsorción física de reactivos, si la carga muy alta impide la adsorción de reactivos que se adsorben químicamente, como los colectores en el caso de los sulfuros minerales.

Los floculantes no cambian la carga en el mineral y son muy valiosos puesto que provocan una agregación de coloides o floculación espontánea llevando el potencial zeta (ζ) a valores bajos, alrededor de -10 mV se han observado buenos resultados.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

1.0 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS.

Los resultados de las caracterizaciones química y menagráfica por microscopía óptica y electrónica de barrido permitieron identificar en el mineral de cabeza y en el concentrado de flotación sulfuros de cobre: calcopirita, calcocita, covelita y bornita; pirita, esfalerita, galena, óxidos de hierro, plata y electrum. El oro nativo no fue observado en el mineral de cabeza debido a su composición (<1%), sin embargo se identificó en el concentrado de flotación por microscopía electrónica de barrido. Dichos estudios también muestran que el concentrado aún contiene cantidades considerables de ganga y de hierro, lo cual repercute en la recuperación por flotación.

La caracterización granulométrica muestra que las entidades mineralógicas no se encuentran suficientemente liberadas.

2.0 COMPORTAMIENTO ELECTROKINÉTICO DE LAS MUESTRAS

La micrografía electrónica MEB/EDS del concentrado muestra la presencia de oro asociado al cuarzo.

Micrografías a continuación.

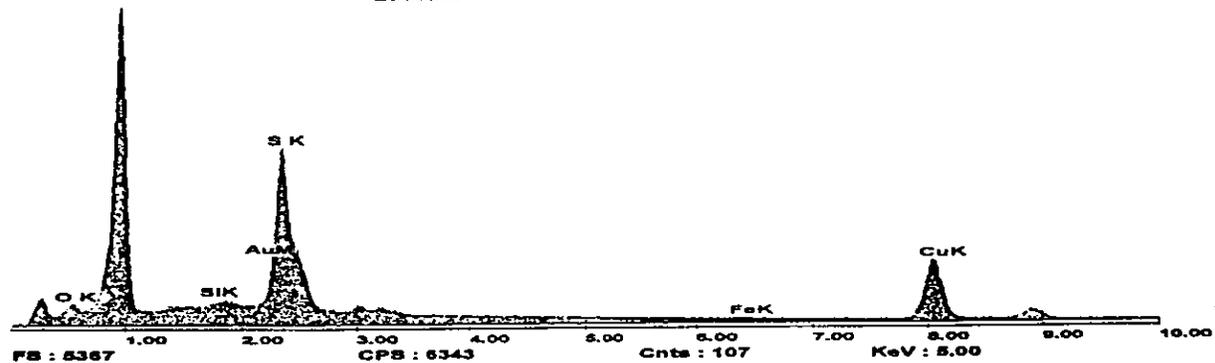
Label: Ore05 Spectrum
Pret: None

c:\dx4\eds\Ore05.spc

Lsec: 46

06:57:52

4-20-95



Label: Ore06 Spectrum

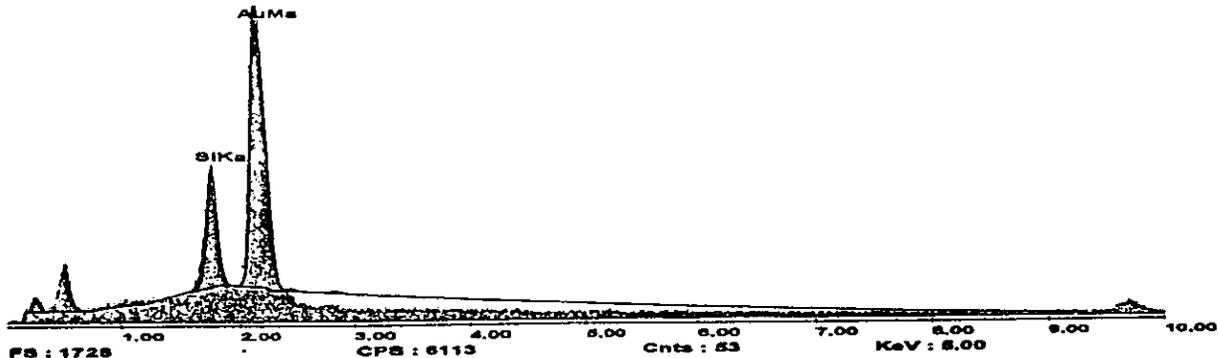
c:\dx4\edstore06.spc

Prat: 60L

Lsec: 12

09:07:19

4-20-95



EDS Quantification Method, Standardless

Element PEI Default Set : 1, Elements

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
SiK	0.0974	9.198	41.534
AlK	0.9026	90.802	58.466
Total		100.000	100.000

Element	Z	A	F
SiK	1.4159	0.6948	1.0000
AlK	0.9464	0.9764	1.0000

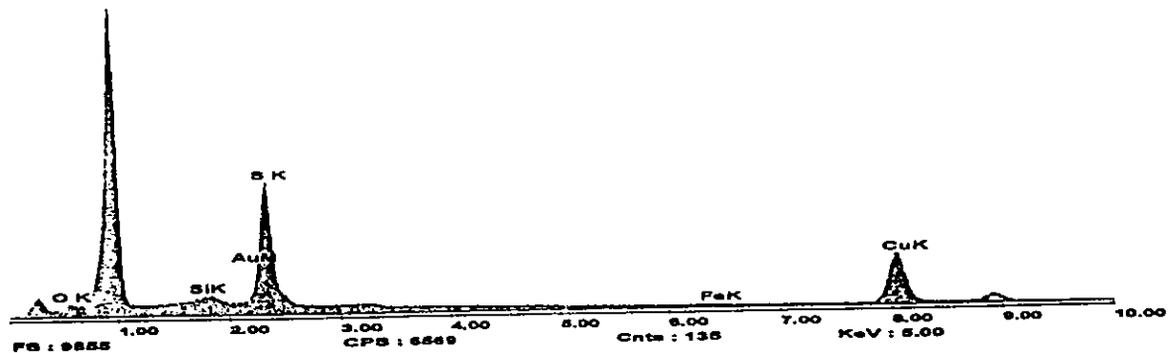
Label: Ore04 Spectrum.
Prst: None

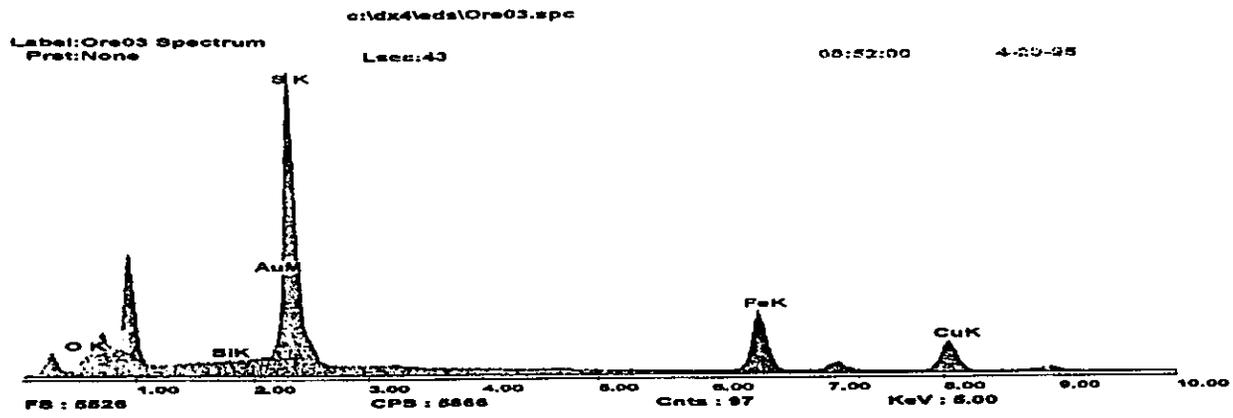
c:\dx4\veda\Ore04.spc

Lsec: 60

08:54:03

4-20-88





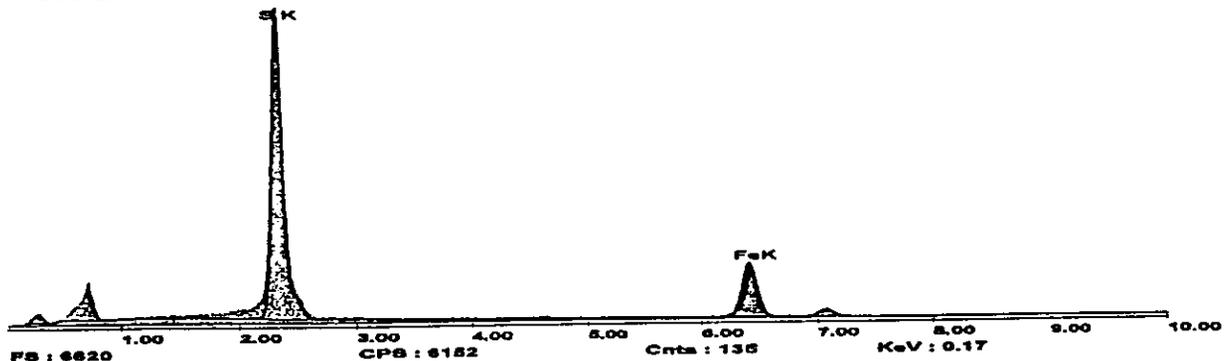
c:\dx4\edat\ore02.spc

Label_ore Spectrum
Prst:60L

Leec:29

05:48:02

4-20-85



EDX Quantification Method, Standardless

PEI Default Sec : 1, Elements

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
S K	0.5270	53.388	66.610
Fe K	0.4630	46.612	33.390
Total		100.000	100.000

Element	Z	A	F
S K	1.0526	0.9863	1.0016
Fe K	0.9330	0.9889	1.0000

2.1 POTENCIAL ZETA DEL CUARZO

Los estudios de potencial electrocinético del cuarzo muestran valores negativos y pequeños en todo el rango de pH estudiado (gráfica 1)

El cuarzo, adquiere su carga negativa debido a la adsorción directa de iones OH^- o a la disociación del H^+ de grupos o sitios hidroxilo superficiales formados probablemente por reacción con agua. El punto de carga nula reportado en la literatura para el cuarzo ocurre a $\text{pH} \approx 2.0$. La alta conductividad de dicho medio limita la medición del potencial zeta en el equipo utilizado y por tanto la determinación del PCN.

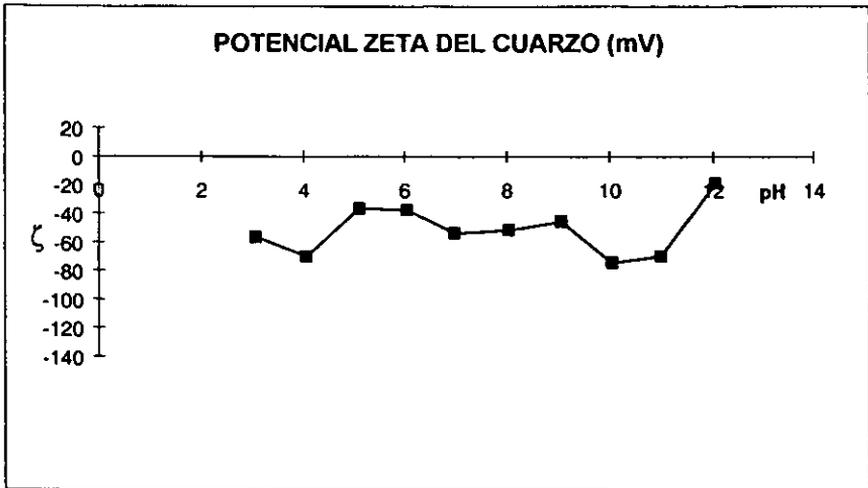
La presencia de colectores xantato aumenta en diferente magnitud la carga negativa del cuarzo debido a la adsorción de éstos (gráfica 2), como consecuencia de sulfuros metálicos presentes no liberados. Siendo el cuarzo un óxido cargado negativamente su flotación directa debe hacerse con colectores catiónicos (atracciones electrostáticas). Sin embargo, los xantatos, se adsorben en su superficie dándole cierta flotabilidad.

El comportamiento de los 3 colectores usados es diferente (gráfica 2). El efecto del IpX^- sobre el potencial zeta del cuarzo es menor al del EX^- y AX^- en todo el rango de pH estudiado. A partir de $\text{pH} 9.0$ el IpX^- prácticamente no se adsorbe.

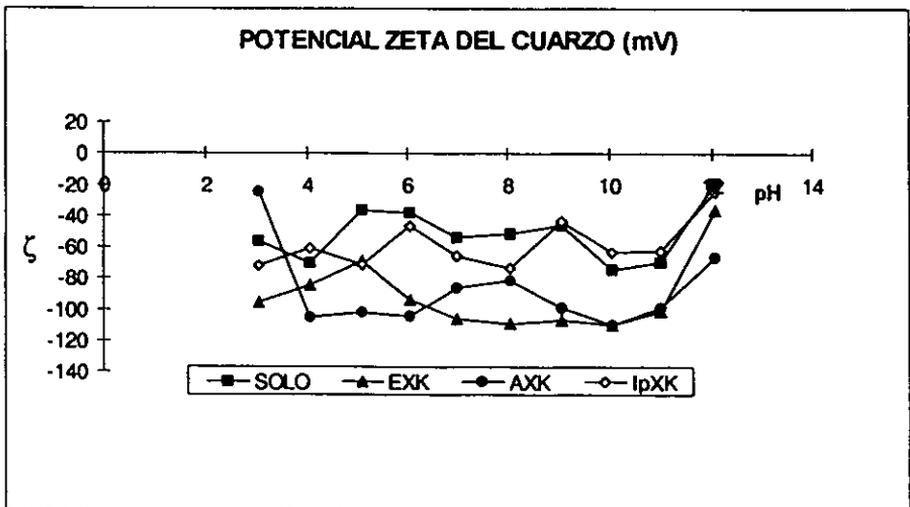
En presencia de etilxantato (gráfica 3) y de amilxantato (gráfica 4) sobre la superficie del cuarzo, los promotores no presentan efecto importante en el potencial zeta, en presencia de etilxantato a partir de $\text{pH} 8.0$ estos disminuyen ligeramente la carga superficial. Con isopropilxantato (gráfica 5) el promotor Aerofloat 208 a $\text{pH} < 7.0$ parece inhibir la adsorción del colector ya que aumenta el potencial zeta, a partir de $\text{pH} 7.0$ se adsorbe aumentando probablemente la flotabilidad. El promotor Aerofloat 404 se adsorbe en todo el rango de pH estudiado.

Los estudios anteriores indican que el cuarzo tiene cierta flotabilidad con los colectores tipo xantato, sin embargo, la disminución de la carga negativa debida a la presencia de promotores indica un efecto depresivo. A $\text{pH} > 9.0$ el isopropilxantato no se adsorbe. En general el Aerofloat 208 aumenta la carga lo que implica un ligero aumento en la flotabilidad del cuarzo para $\text{pH} > 6.0$. El Aerofloat 404 reduce ligeramente la carga negativa, lo que se traduce en un efecto depresivo en todo el rango de pH estudiado.

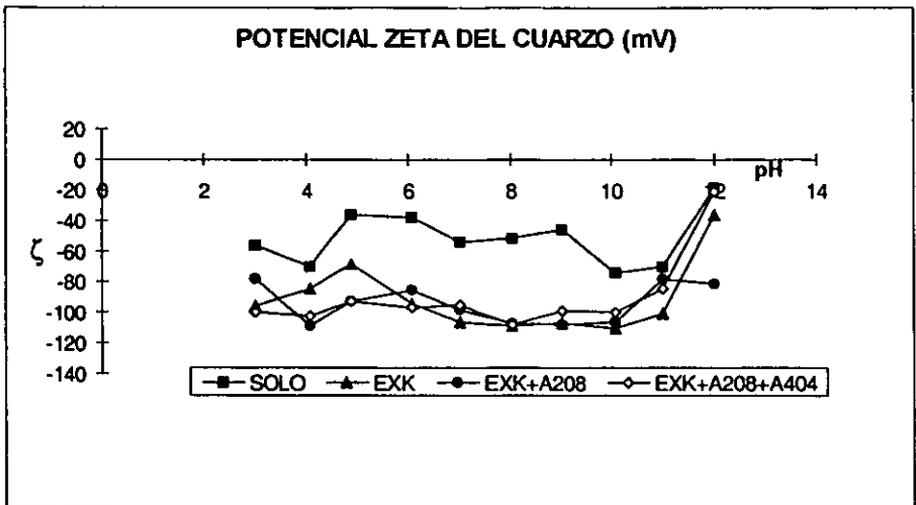
**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**



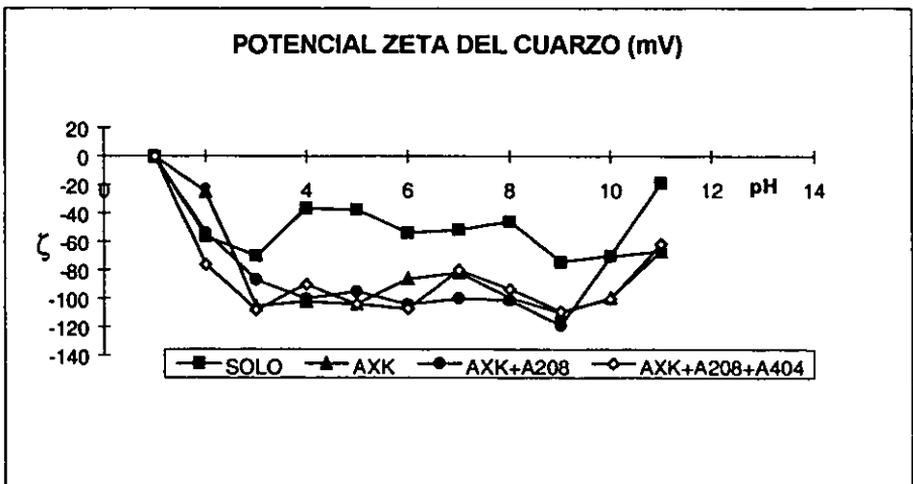
Gráfica 1: Potencial zeta de cuarzo solo. E= 100V



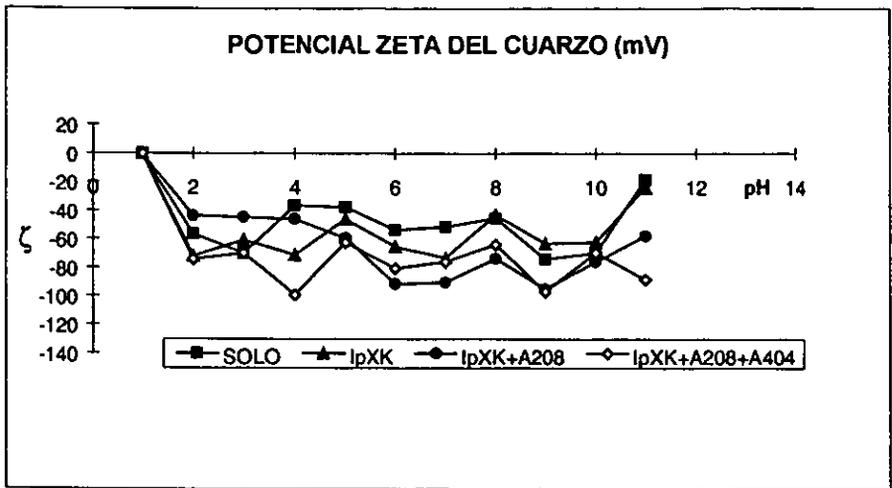
Gráfica 2: Potencial zeta de cuarzo en presencia de xantatos. $C_{RF} = 4g/t$. E= 100V



Gráfica 3: Potencial zeta de cuarzo en presencia de etilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404. $C_{RF} = 4$ g/t. $E = 100V$



Gráfica 4: Potencial zeta de cuarzo en presencia de amilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404. $C_{RF} = 4$ g/t. $E = 100V$



Gráfica 5: Potencial zeta de cuarzo en presencia de isopropilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404. $C_{RF} = 4$ g/t. $E = 100V$

2.2 POTENCIAL ZETA DE LA PIRITA.

La gráfica de potencial electrocinético de la pirita (ζ) contra pH (gráfica 6), muestra la variación de la carga superficial en función de éste. En medio ácido a $\text{pH} < 6.0$, la pirita presenta carga superficial neta positiva debido a la adsorción de iones H^+ . A partir de este valor de pH la carga superficial neta es negativa debido a la adsorción de iones OH^- .

La curva presenta un punto de inflexión el cual corresponde al punto de carga cero de la pirita. Este parámetro característico de la pirita se encuentra a $\text{pH} = 6.0$. A este valor de pH la pirita no tiene carga. Su densidad de carga de superficie y su potencial de superficie son iguales a cero. Como consecuencia, la doble capa eléctrica no existe.

En presencia de los colectores de flotación la magnitud del potencial zeta de la pirita aumenta considerablemente (gráfica 7), se adsorben sobre la superficie del mineral. Este cambio en la magnitud del potencial zeta de la pirita es indicativo de la adsorción química o específica de los 3 colectores utilizados, etil, amil e isopropil xantato de potasio sobre la superficie de la pirita.

En presencia de promotores se observa que con etilxantato (gráfica 8) los promotores aumentan la magnitud del potencial a $\text{pH} < 7.0$, el potencial zeta se vuelve más negativo. Esto se explica con la adsorción de los promotores sobre la superficie de la pirita, la cual aumenta su flotabilidad.

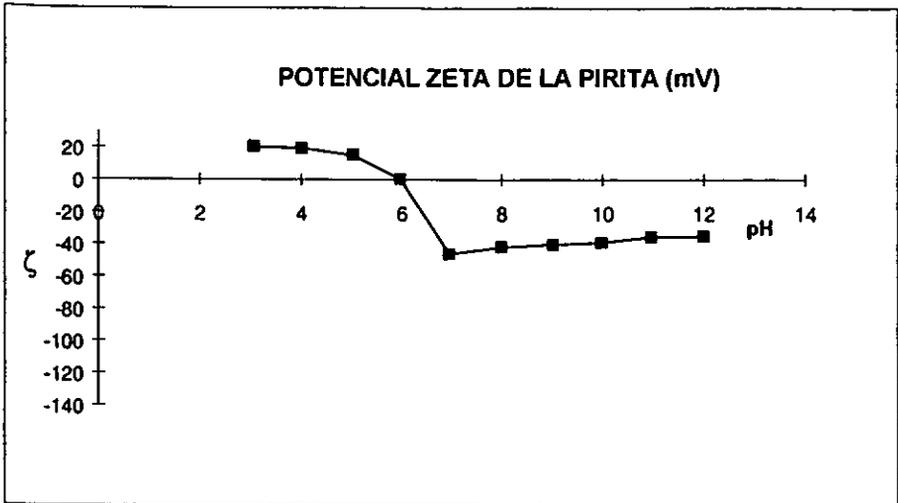
A partir de $\text{pH} 7.0$ los promotores no muestran efecto sobre el potencial zeta y por tanto sobre la superficie de la pirita.

Con amilxantato (gráfica 9) los promotores presentan el mismo comportamiento que en presencia de etilxantato hasta $\text{pH} < 7.0$, aumentan ligeramente la carga negativa, a partir de $\text{pH} 7.0$ la tendencia se invierte, el potencial electrocinético aumenta. Esto indica que los promotores se adsorben o favorecen la adsorción de

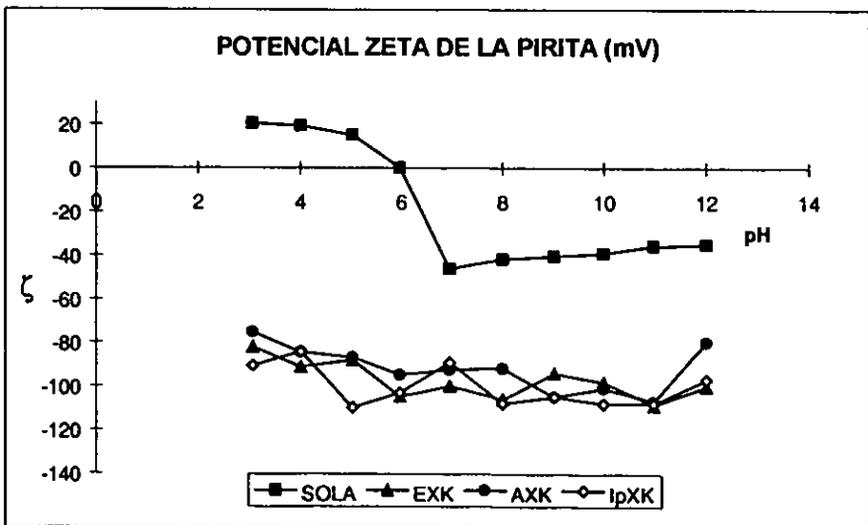
AX^- sobre la pirita a $pH < 7.0$, y que a partir de éste favorece la adsorción del colector y por tanto disminuye la flotabilidad.

En el caso del IpX^- (gráfica 10) no se observa ninguna tendencia clara. Sin embargo, puede decirse que a partir de $pH 7.0$ los promotores también aumentan ligeramente el potencial zeta, es decir disminuyen la densidad de carga de superficie negativa sobre la pirita y por tanto la flotabilidad.

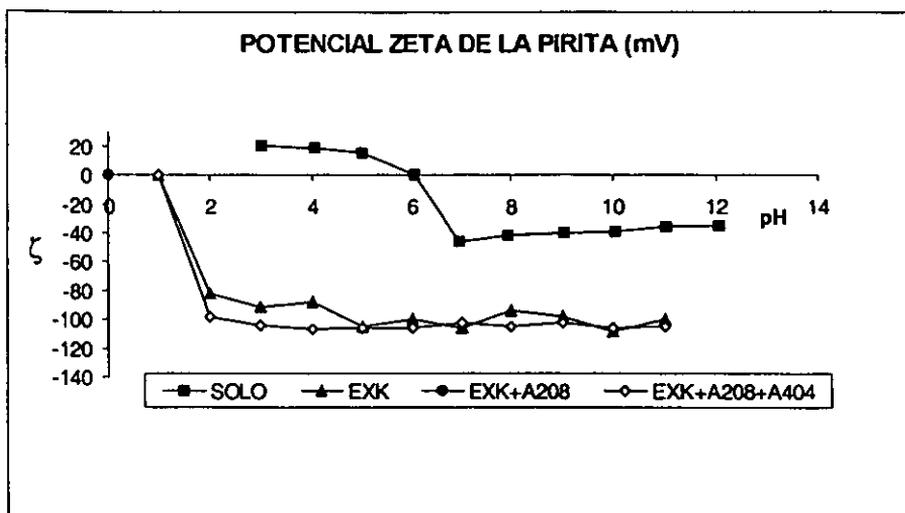
De manera general podemos decir que los tres colectores se adsorben sobre la superficie de la pirita, y que los promotores tienen cierto efecto depresivo sobre la flotabilidad de ésta en presencia de iones AX^- y IpX^- usados como colector. Dicho efecto es mayor con el Aerofloat 404, a $pH 9.0$ en presencia de amilxantato (gráfica 9) y a $pH 11.0$ en presencia de isopropilxantato (gráfica 10).



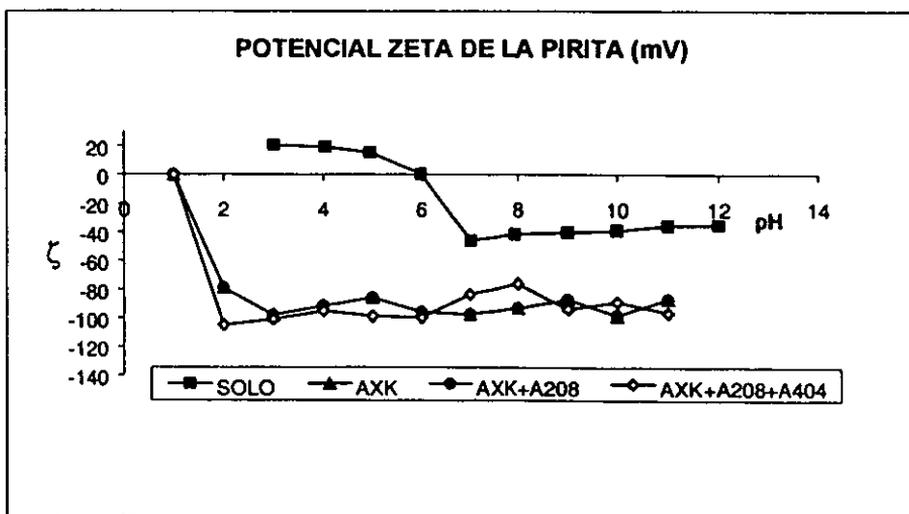
Gráfica 6: Potencial zeta de pirita sola. E= 100V



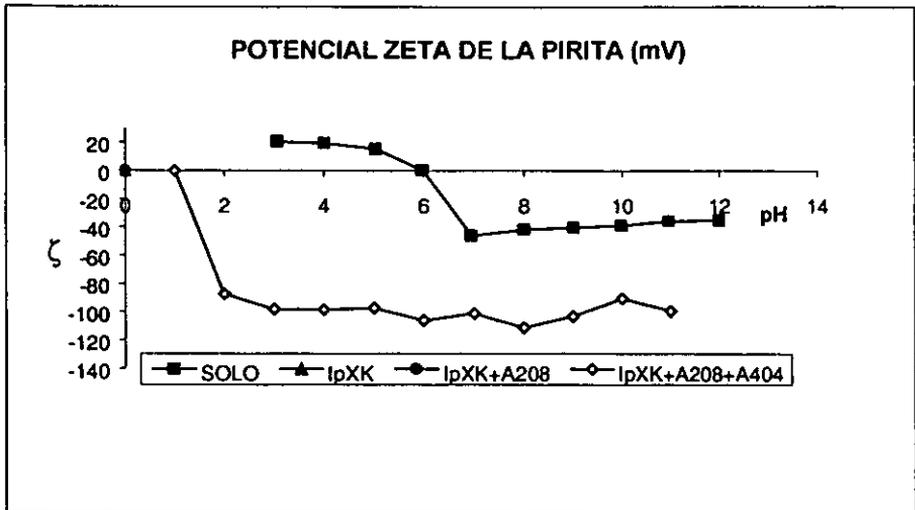
Gráfica 7: Potencial zeta de pirita en presencia de xantatos. C_{RF}= 4 g/t. E= 100V



Gráfica 8: Potencial zeta de pirita en presencia de etilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404. $C_{RF} = 4 \text{ g/t}$. $E = 100V$



Gráfica 9: Potencial zeta de pirita en presencia de amixantato de potasio y Aerofloat 208 y 404. $C_{RF} = 4 \text{ g/t}$. $E = 100V$



Gráfica 10: Potencial zeta de cuarzo en presencia de isopropilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404. $C_{RF} = 4$ g/t. $E = 100V$

2.3 POTENCIAL ZETA DE LA CALCOPIRITA.

En el caso del mineral de cobre, calcopirita principalmente, la curva de potencial zeta en función del pH no presenta ninguna inflexión en el rango de pH estudiado (gráfica 11). El comportamiento electrocinético es semejante al del cuarzo. En algunos puntos tienen el mismo valor, entre pH 5.0 y 9.0 es de mayor magnitud que el del cuarzo. La carga superficial neta es siempre negativa, probablemente se debe a la adsorción directa de iones OH^- .

La diferencia de magnitud del potencial zeta del mineral de cobre con respecto a la pirita puede explicarse en función de la estabilidad de los hidróxidos o xantatos involucrados probablemente en su superficie.

Es muy probable que la calcopirita presente su punto de carga cero a un pH cercano a 2.0, sin embargo, la alta conductividad de estos medios limita la determinación del potencial zeta en el equipo utilizado.

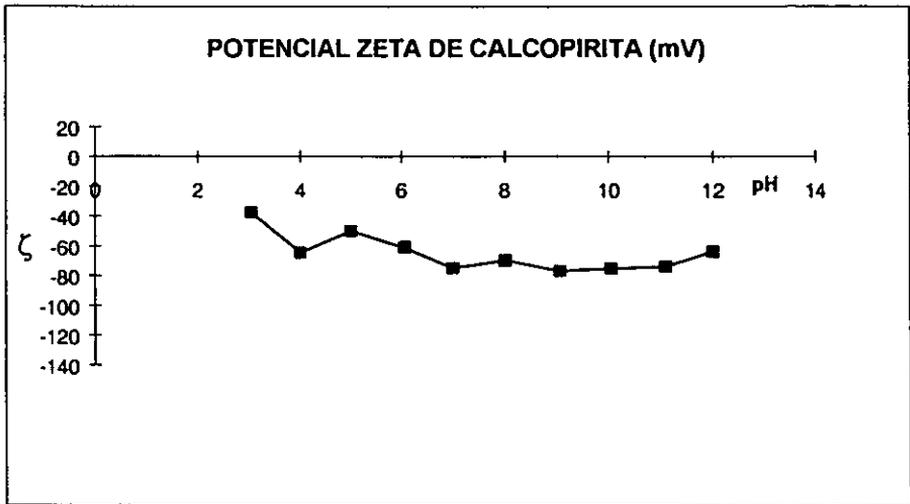
El potencial zeta de la calcopirita se vuelve más negativo en presencia de los colectores etilxantato y amilxantato de potasio (gráfica 12). El aumento en la magnitud del potencial zeta indica la adsorción de éstos sobre la superficie de la calcopirita.

La presencia de promotores no muestra efecto apreciable sobre el potencial zeta, tanto en el caso del etilxantato como en el del amilxantato, gráfica 13 y 14 respectivamente.

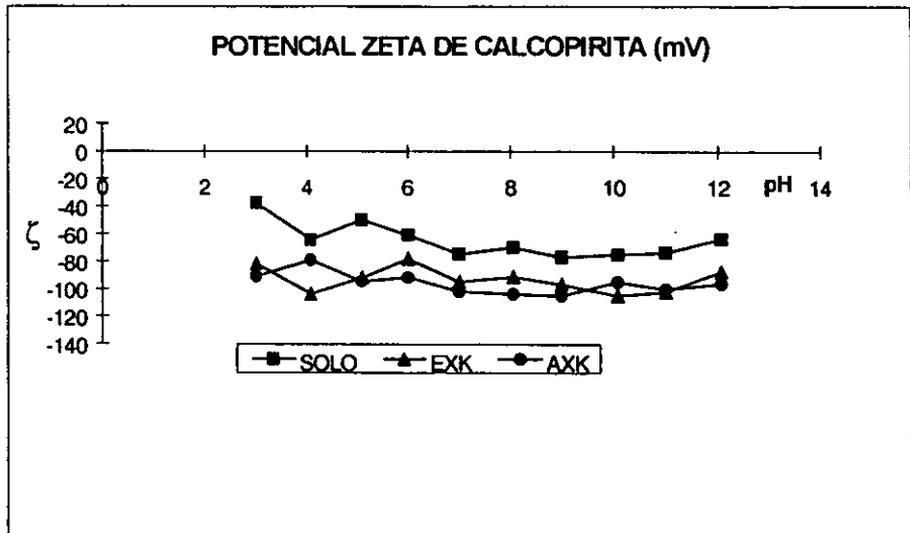
Los estudios de potencial zeta en presencia de isopropilxantato como colector no fueron realizados por falta de material, debido a la dificultad para conseguir la calcopirita.

De manera general podemos decir que los colectores xantato se adsorben sobre la superficie de la calcopirita aumentando su flotabilidad y que los promotores utilizados no tienen ningún efecto sobre ésta.

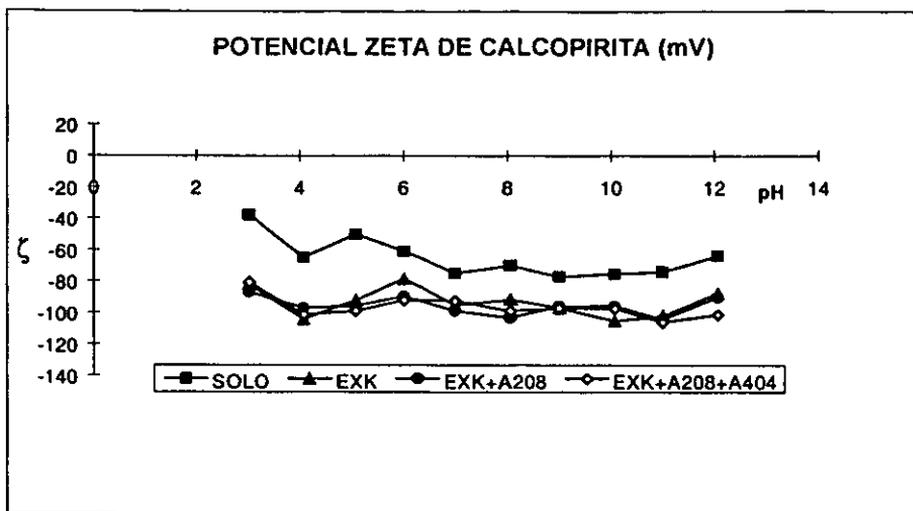
Los resultados anteriores indican que el mejor colector para la flotación de sulfuros de cobre es el isopropilxantato pues aunque en medio alcalino se adsorbe sobre la pirita, el aerofloat 208 y en menor grado el 404 deprimen su flotación, y en medio alcalino dicho colector no se adsorbe sobre el cuarzo, los promotores lo hacen ligeramente, por lo que un exceso de éstos afectará la calidad del concentrado.



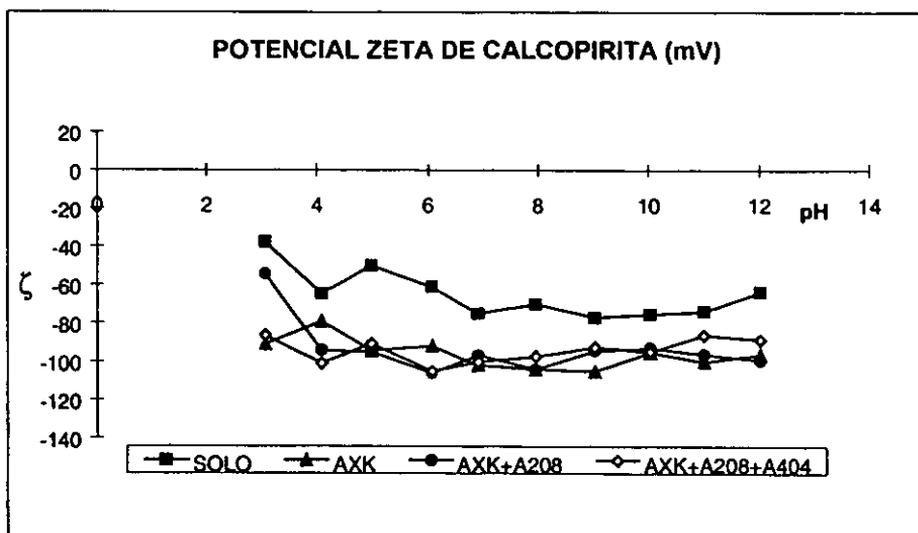
Gráfica 11: Potencial zeta de calcopirita sola. E= 100V



Gráfica 12: Potencial zeta de calcopirita en presencia de xantatos. $C_{RF}= 4 \text{ g/t}$
E= 100V



Gráfica 13: Potencial zeta de cuarzo en presencia de etilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404. $C_{RF}= 4 \text{ g/t}$. $E= 100V$



Gráfica 14: Potencial zeta de pirita en presencia de amilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404. $C_{RF}= 4 \text{ g/t}$. $E= 100V$

V. CONCLUSIONES

- Con el presente trabajo se logró resaltar la importancia que tiene el potencial zeta en la flotación de minerales.
- Los minerales identificados en las muestras de mineral de sulfuros de cobre fueron calcopirita, covelita, calcocita, cuarzo, pirita, esfalerita, galena, plata metálica y electrum.
- El oro nativo fue identificado por microscopía electrónica de barrido solo en el concentrado de flotación.
- El concentrado de flotación aún contiene cantidades considerables de ganga y de hierro, lo cual se refleja en una baja recuperación por flotación debido a que las partículas minerales no están totalmente liberadas.
- Las medidas de potencial electrocinético en función del pH mostraron evolución de la carga superficial de los minerales tanto en presencia de reactivos de flotación como colectores y promotores.
- Los iones xantato vuelven más negativo el potencial zeta de los minerales estudiados, debido a que se adsorben específicamente sobre la superficie de éstos, propiciando su flotabilidad.
- En el **Cuarzo** el potencial electrocinético muestra valores negativos y pequeños semejantes e inclusive menores a los de la calcopirita.
- Los xantatos se adsorben sobre su superficie debido a la presencia de sulfuros metálicos no liberados, ya que en la molienda las partículas no se liberan en su totalidad, lo cual le dá cierta flotabilidad.
- El comportamiento de los colectores es diferente. El EX^- y el AX^- se adsorben más que el IpX^- , el cual a partir de pH 9.0 prácticamente no se adsorbe.

- El potencial zeta de la **pirita** muestra un punto de carga nula a pH 6.0, antes del cual $\zeta > 0$ y después del cual $\zeta < 0$. La calcopirita y el cuarzo presentan potencial electrocinético negativo en todo el rango de pH estudiado.
- La pirita en presencia de los tres Xantatos presenta un comportamiento muy similar, el potencial zeta es negativo en todo el rango de pH estudiado. El potencial alcanza un valor dentro del rango -80 a -100 mV. Los colectores cambian el signo y la magnitud del potencial zeta.
- La presencia de promotores A208 y A404 a las concentraciones utilizadas, en presencia de amilxantato y de isopropilxantato, presentó un efecto depresivo sobre la flotabilidad de la pirita, en medio alcalino (pH entre 8 y 10), la densidad de carga disminuye. En presencia de etilxantato los promotores aumentan la flotabilidad.
- La **Calcopirita** presenta potencial negativo en todo el rango de pH estudiado.
- El potencial zeta de la calcopirita también es más negativo en presencia de colectores xantato debido a la adsorción de éstos sobre su superficie.
- La presencia de los promotores A208 y A404 no tiene efecto apreciable sobre la flotabilidad de la calcopirita.
- Los mejores resultados de flotación de minerales de sulfuros de cobre pueden obtenerse utilizando isopropilxantato de potasio como colector asociado con los promotores Aeros. El IpXK es un potente colector de minerales sulfurados y en medio alcalino a pH entre 8 y 10, asociado con Aeroftot 208 es mejor depresor de pirita y con Aerofloat 404 es depresor en menor grado de la pirita y del cuarzo, si bien el IpXK no adsorbe apreciablemente sobre el cuarzo en medio alcalino.

V. BIBLIOGRAFIA

- [1] Manual of Mineralogy. Dana Edward and William Ford. Ed. John Wiley & Sons, Inc. Inglaterra, 1912.
- [2] Text of Mineralogy. Dana Edward and William Ford. Ed. John Wiley & Sons, Inc. Inglaterra, 1932.
- [3] Los Minerales. Enciclopedia en 3 tomos (sin referencias).
- [4] Guide to Rocks & Minerals. Montana Aníbale, Crespi Rodolfo and Liborio Giuseppe. Ed. Simon & Schuster. Milan , 1987.
- [5] Tratamiento de Menas y Recuperación de Minerales. B.A. Wills. 2^{da} Edición. Ed. Limusa México, 1989.
- [6] Flotation Fundamentals. D. W. Fuerstenau, R. H. Urbina. In Reagents in mineral technology. Charper 1, pages 1-38. P. Somasundaran, B. M. Moudgil, Editors. Marcel Dekker, Inc. New York and Basel, 1987.
- [7] Mineral Separation by Froth Flotation. D.W. Fuerstenau and R. Herrera-Urbina. Chap. II pag. 259-320. Surfactant based separation processes. J.F. Scamehorn and J.H. Harwell. Ed. Marcel Dekker Inc. N.Y. (1989)
- [8] Efectos de los oxidantes sobre la flotación de la pirita. José Daniel Gómez Cruz. Tesis. Facultad de química. UNAM. México, 1994.
- [9] Efecto de los cationes metálicos sobre la flotación de cuarzo. Aida Lisea Franco. Tesis. Facultad de Química. UNAM. México, 1994.
- [10] Manual de Productos Químicos para Minería. Compañía Cyanamid. México (1988).

- [11] Decomposition of xanthate acid solution. I. Iwasaki, S. Cooke. J. Am. Chem. Soc. 80, 285-288 (1958).
- [12] Acid catalized hydrolysis of monoalkylxanthates. C. Bunton, P. Ng, L. Sepulveda. J. Org. Chem, 39 (8), 1130-1134 (1974).
- [13] G. Harris. In Surfactant Science Series. P. Somasundaran, B. M. Moudgil, Eds. Vol 27, 371-383 (1987).
- [14] Biología. C. A. Villée. Sexta edición. Editorial Interamericana. México, 1974.
- [15] Potencial zeta: Un curso completo en 5 minutos. Zeta Meter, Inc. 4ª Edición. USA, 1993.
- [16] Everything you want know about Coagulation & Flocculation ... Zeta Meter, Inc. 4ª Edición. USA, 1993.
- [17] Zeta potential in colloid chemistry. R. J. Hunter. Academic Press, Nueva York, 1981.
- [18] Zeta Potential of Magnesian Carbonates in Inorganic Electrolytes.
- [19] Tables for microscopy identification of ore minerals. W. Uytendogaardt, E.A.J. Burke. 2nd Edition. Dover Publications, Inc. New York, 1971.

VII. ANEXO I

INDICE DE FIGURAS

1.- Unión y apilado de las partículas minerales	11
2.- Una de las estructuras del cuarzo.....	14
3.- Estructura de la pirita	18
4.- Estructuras de la calcopirita	22
5.- Equipo para tamizado o analizador del tamaño de partículas	24
6.- Tipos de tejidos en las cribas	25
7 Y 8.- Tipos de circuitos de flotación	29
9.- Celda tipo Denver para flotación de minerales	30
10.- Adhesión de partículas a la burbuja en la flotación	30
11.- Ángulo de contacto	31
12.- Función de los espumantes	32
13.- Adhesión de los colectores en la intercara líquido-partícula mineral	33
14.- Estructura química un xantato o ditiocarbonato	39
15.- Estructura química de los promotores Aerofloat serie 200	42
16.- Estructura química de los promotores Aerofloat serie 400	43
17.- Aglomeración de las partículas sin carga	46
18.- Como se repelen las partículas con cargas iguales	46
19.- Energía neta de interacción	49
20.- Capa de Stern	52
21.- Zeta-Meter 3.0+	73

INDICE DE TABLAS

1.- Composición química de pirita	19
2.- Características físicas de pirita	19
3.- Composición química de la calcopirita	20
4.- Características físicas de la calcopirita	21
5.- Métodos de análisis de tamaño de partícula	24
6.- Cribas de malla de alambre BSS 410	25
7.- Características de los xantatos	38
8.- Categorías de los Aerofloats	40
9.- Características físicas de los Aerofloats	41
10.- Análisis de malla (cabeza)	64
11.- Análisis granulométrico (concentrado)	65
12.- Grado de liberación partículas (cabeza)	66
13.- Análisis químico de las muestras	67
14.- Contenido de insolubles	67
15.- Características ópticas de los minerales observados	68
16.- Toma fotográfica global de los tiempos de exposición	69
17.- Toma fotográfica a 100X	69
18.- Dureza relativa entre las fases (Kalb)	70
19.- Microdureza Vickers	71
20.- Dureza relativa entre las fases (Vickers)	71

LISTA DE GRAFICOS

- 1.- Potencial zeta de cuarzo solo
- 2.- Potencial zeta de cuarzo en presencia de xantatos
- 3.- Potencial zeta de cuarzo en presencia de etilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404
- 4.- Potencial zeta de cuarzo en presencia de amilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404
- 5.- Potencial zeta de cuarzo en presencia de isopropilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404
- 6.- Potencial zeta de pirita sola
- 7: Potencial zeta de pirita en presencia de xantatos
- 8.- Potencial zeta de pirita en presencia de etilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404
- 9.- Potencial zeta de pirita en presencia de amilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404
- 10.- Potencial zeta de cuarzo en presencia de isopropilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404
- 11.- Potencial zeta de calcopirita sola
- 12.- Potencial zeta de calcopirita en presencia de xantatos
- 13.- Potencial zeta de cuarzo en presencia de etilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404
- 14.- Potencial zeta de pirita en presencia de amilxantato de potasio y Aerofloat 208 y 404