



*Universidad Nacional Autónoma  
de México*

---

---

*Facultad de Química*

**EVALUACION CINETICO METALURGICO  
DE PROMOTORES Y COLECTORES  
SOBRE GALENA Y PIRITA**

**T E S I S**

*Que para obtener el Título de:  
Ingeniero Químico Metalúrgico*

*p r e s e n t a*

*Eduardo Javier Magdaleno Pérez*



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

# I N D I C E

	PAG.
RESUMEN . . . . .	1
I. INTRODUCCION . . . . .	3
II. CONSIDERACIONES TEORICAS.	
2.1. Características de los reactivos de flotación . . . . .	5
2.2. Características de los minerales sulfurados . . . . .	13
2.3. Principio de Microflotación . . . . .	15
2.3.1. Metodología de investigación . . . . .	16
2.4. Definición de Potencial Zeta . . . . .	19
2.4.1. Modelo de Helmholtz y Gouy Chapman . . . . .	23
2.4.2. Modelo de Stern . . . . .	24
2.5. Fenómenos Electrocinéticos . . . . .	27
2.6. Velocidad Electroforética y Potencial Zeta . . . . .	29

III. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO, MATERIAL Y REACTIVOS EMPLEADOS.

3.1.	Descripción del sistema de Micro flotación . . . . .	36
3.1.1.	Tubo Hallimond . . . . .	36
3.1.2.	Descripción y uso del sistema de alimentación del gas, para el tu bo Hallimond . . . . .	37
3.2.	Celda para medición de velocidad electroforética . . . . .	41
3.3.	Material y Reactivos . . . . .	44

IV. EXPERIMENTACION.

4.1.	Descripción de Pruebas . . . . .	49
4.1.1.	Prueba de Microflotación . . . . .	49
4.1.2.	Medición de Velocidad Electro forética . . . . .	53
4.2.	Cálculos . . . . .	57

	PAG.
V. DESCRIPCION DE GRAFICAS Y DISCUSION DE RESULTADOS . . . . .	59
VI. CONCLUSIONES . . . . .	76
VII. RECOMENDACIONES . . . . .	78
BIBLIOGRAFIA . . . . .	79
APENDICE # 1 . . . . .	81

## R E S U M E N

En la actualidad existe una gran problemática para adquirir los reactivos tradicionales o en el mejor de los casos los costos se han incrementado considerablemente. Esto ha sido motivo para el desarrollo del presente trabajo en el cual los reactivos que se pretenden implantar son propuestos por el departamento de desarrollo de Química Hércules. Dichos reactivos son principalmente Ditiofosfatos.

El objetivo de este trabajo consiste en realizar pruebas de microflotación a minerales de galena y pirita procedentes de la unidad Naica Chihuahua, Chih., de la compañía Minera Fresnillo, en presencia de los reactivos que en este caso son Ditiofosfatos y Xantatos. Estas pruebas se realizan en un invento de laboratorio llamado tubo Hallimond la primera celda de microflotación se debió a Hallimond que la desarrolló en el año de (1944) (3).

Los resultados que se obtienen de estas pruebas son el porcentaje de recuperación de un mineral en función del pH.

Otras de las pruebas a realizar son mediciones de velocidad electroforética a partículas minerales en presencia de los reactivos arriba mencionados y posteriormente determi-

nar el potencial Zeta ( $\zeta$ ).

Este potencial es la carga electrostática que se tiene en la superficie de un sólido cuando se encuentre inmerso en un líquido.

Los resultados de estas pruebas nos permitirán comprender mas claramente los mecanismos de reacción superficial.

## C A P I T U L O I

### INTRODUCCION

En el tratamiento de minerales existen operaciones tales - como flotación, floculación, filtración, etc., en que las características interfaciales son de importancia primor-- dial para lograr la factibilidad de la operación en cues-- tión:

De acuerdo a las teorías como la de Helmholtz (1879) Gouy (1910), y Chapman (1913) se conoce el origen de la carga - superficial y como se distribuye esto en la formación de - cualquier interfase; sin embargo; para aprovechar las ca- racterísticas interfaciales es necesario conocerlas y una de las formas es midiendo la velocidad electroforética y - posteriormente determinar el potencial Zeta ( $\zeta$ ) lo cual - nos permite comprender los mecanismos de adsorción superfi- cial de un reactivo.

Dicho potencial presenta variaciones con el pH debido a la cantidad de Iones en solución. por lo que se espera que la adsorción del reactivo no sea la misma en todo el rango de pH.

Para cumplir con los requerimientos de flotación se puede emplear el tubo Hallimond que se describe posteriormente. El mineral con agua y reactivo son introducidos en la celda, después de ser acondicionado durante cierto tiempo, una vez colocada la pulpa en la celda se efectúa una agitación y el paso del gas, las partículas que se mantienen en suspensión debido a la agitación se adhieren a las burbujas de gas permitiendo que las partículas asciendan hasta la parte superior de la celda, al llegar a la superficie dichas burbujas se rompen y el mineral cae en una trampa especial.

Cuando la prueba ha concluido el producto que se encuentra en la parte superior de la celda será el concentrado y el de la parte inferior serán las colas.

Estas pruebas se realizan en un rango de pH desde 1 hasta 12, graficando pH contra por ciento de recuperación, podemos conocer la eficiencia de los reactivos comparándolas entre sí.

Tanto el estudio de potencial Zeta (3) y Microflotación están en función del pH. Esto nos permite correlacionarlos y así comprender los mecanismos de adsorción y a su vez poder seleccionar el reactivo mas adecuado que nos permita realizar una flotación de minerales mas eficiente.

## CAPITULO II

### CONSIDERACIONES TEORICAS

#### 2.1. CARACTERISTICAS DE LOS REACTIVOS DE FLOTACION:

Cuando empezó a usarse la flotación, los minerales que se flotaban se les proveía de un colector que formara una película o cubierta en su superficie empleándose un aceite - constituido por un hidrocarburo, por ejemplo: petróleo crudo, brea de madera, etc.

Estos aceites eran adsorbidos en grados diversos por minerales que tenían lustre metálico, tales como los minerales sulfurados de los metales básicos. El proceso de revestir así a las partículas era conseguido mediante una vigorosa agitación del aceite en la pulpa en un tanque acondicionador o en celdas de flotación para emulsionarlo lo mas fuerte posible, en seguida salpicándolo en forma forzada, sobre la superficie de las partículas que formaban la mena.

Los sulfuros minerales retenían el aceite y llegaban a -- embarrarse con él. De tal modo que podían ser flotadas, - algunas de las partículas que componían la ganga, eran revestidas en grados diversos, pero el gran conjunto de --

ellas permanecía comparativamente inafectado. El proceso era tosco y el grado del concentrado era bajo comparado con la práctica moderna, puesto que muchas clases de minerales que formaban la roca mostraban tendencia a llegar a ser cubiertas por la película.

Para comprender la acción de un colector o cualquier reactivo de flotación, es necesario definir algunos conceptos de termo-dinámica de superficie.

Tensoactivo: es aquel agente químico capaz de modificar la tensión superficial de un líquido..

Los tensoactivos están clasificados en cuatro grupos de acuerdo a sus propiedades físico-químicas en la siguiente forma:

Aniónicos  
Catiónicos  
No-iónicos  
Anfoterros.

Agente tensoactivo aniónico: Son aquellos que en solución se ionizan en solución, el grupo hidrofobo queda cargado negativamente. Además se caracterizan por tener en su molécula de cationes orgánicos e inorgánicos

( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Ba}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^{++}$ ) y una parte hidrofílica que contiene los grupos aniónicos ( $-\text{COO}^-$ ,  $-\text{SO}^-$ ,  $-\text{O}-\text{PO}_3^-$ ) unida a la fracción orgánica.

Agente tensoactivo catiónico: Son aquéllos que en solución forman iones, resultando cargado positivamente el grupo hidrofóbico de la molécula. El término surfactante catiónico se refiere a los compuestos que contienen por lo menos una cadena de 8 a 25 átomos de carbón, derivado de un ácido graso o de un derivado petroquímico y un nitrógeno - cargado positivamente, el anión suele ser un  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ , la mayoría de los agentes catiónicos están constituidos por una cadena larga. Esta cadena constituye el grupo hidrofóbico, en tanto el hidrofílico lo constituye el nitrógeno.

Agente tensoactivo no-iónico: Son aquéllos que sin ionizar se solubilizan mediante un efecto combinado de un cierto número de grupos solubilizantes débiles (hidrofílicos). Tales como enlaces del tipo éter o grupo hidróxilo en su molécula.

Agente tensoactivo anfotero: Estos materiales presentan en su molécula grupos aniónicos y catiónicos, su comportamiento iónico será de acuerdo al medio de disolución según

sea éste; ácido o alcalino.

Las propiedades generales y comportamiento de los agentes tensoactivos se debe al carácter dual de su molécula. (grupo hidrófilo) es así como el antagonismo de las dos secciones de la molécula y el equilibrio entre ellas es lo que da al compuesto sus propiedades activas de superficie.

El grupo hidrofílico ejerce un efecto solubilizante y -- tiende a llevar a la molécula a disolución completa. El grupo hidrofobo, en cambio y debido a su insolubilidad, -- tiende a contrarrestar la tendencia del otro. Si se logra el equilibrio adecuado entre los dos grupos se ve que la sustancia no se disuelve por completo, concentrándose en la interfase líquido-gas con sus moléculas orientadas de tal forma que los grupos hidrofílicos se orientan hacia la fase acuosa, mientras que los hidrofobos hacia la no acuosa, como se muestra en la fig. (1).

Todos los agentes de superficie activa contienen en su molécula uno o varios grupos hidrofílicos de naturaleza de tipo iónico y no iónico y generalmente una estructura del tipo hidrocarbonada lipofílica no polar.

Grupo lipofílico: La parte lipofílica de la molécula puede ser o estar constituida por una variedad de estructu--

ras alifáticas o alifáticas aromáticas. Ya que las mate--  
rias primas empleadas en su preparación son hidrocarburos  
alifáticos formados por anillos simples o condensados.

Grupo Hidrófilos: Los grupos hidrofílicos pueden estar --  
cargados eléctricamente, debido a la presencia de un par --  
de iones de carga opuesta, o presentar cargas residuales,  
positivas o negativas que ponen de manifiesto la presencia  
de un dipolo.

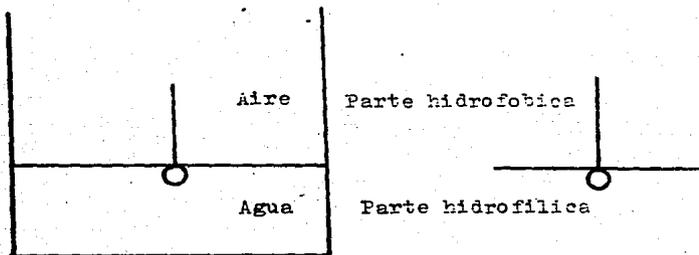


Fig. (1). Representación esquemática del comportamiento  
dual de la molécula de un tensioactivo.

Algunos minerales por su naturaleza, poseen repelencia al agua, debido al tipo de enlace y la estructura de la fase sólida por ejemplo (Molibdenita, grafito, mica).

Sin embargo otros poseen gran afinidad por el agua (halita, silvita, yeso). Entre estos dos extremos se tienen a la gran mayoría de los minerales y obviamente para que se tenga un proceso de flotación muy eficiente, es necesario el uso de surfactantes que den a la superficie de cada tipo de mineral las características adecuadas. Dichos surfactantes los podemos agrupar de la siguiente manera:

Colectores: Compuestos orgánicos que se caracterizan por tener un grupo no polar que imparte a la superficie características oleosas. La acción de un colector es promover el contacto y unión entre la partícula que se va a flotar y la burbuja del aire.

Los colectores se clasifican en dos tipos:

Aniónico: Es un colector aniónico la parte de la molécula que lleva una carga negativa, y que forma una superficie repelente al agua, sobre la partícula del mineral.

Catiónico: Una parte de la molécula está cargada positiva

vamente. Y al igual que el aniónico forma una superficie repelente al agua.

Espumante: Compuesto orgánico que se caracteriza por tener dentro de la misma molécula un grupo polar con afinidad hacia el agua y un grupo no polar con afinidad hacia el aire, es decir, son sustancias que inducen la formación de burbujas de propiedades específicas sobre las cuales los minerales son colectados y separados de la pulpa.

Modificadores: Son sustancias que favorecen la selectividad de los minerales, haciendo que las partículas acepten o rechacen el colector. Los agentes modificadores pueden ser clasificados en uno de los siguientes tipos de acuerdo a sus funciones.

Depresores: Son compuestos orgánicos e inorgánicos que permiten a la superficie permanecer mojada.

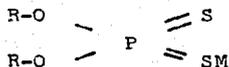
Promotores: Son sales de metales nobles que al comentarse en la superficie del mineral, facilitan la deshidratación de la misma presentando una mayor actividad sobre el colector.

Reguladores de PH: Son compuestos inorgánicos que permi-

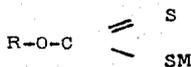
ten modificar el pH ya que la mayoría de los minerales presentan variación en sus recuperaciones a diferentes pH.

Colectores empleados en minerales sulfurados: Los colectores químicos son compuestos polar y no-polar, de un tipo especial. El grupo no-polar consiste de una cadena de hidrocarburos, las cuales varían en longitud y en estructura con los diferentes reactivos.

El grupo polar corresponde a un radical activo químicamente soluble en agua, el cual para el caso de colectores -- aplicables a minerales sulfurados, usualmente contienen -- uno o dos átomos de azufre. Los colectores mas comunes y poderosos son los Xantatos y los Ditiófosfatos, y cuya estructura se muestra en la figura (2).



a) DITIOFOSFATO



b) XANTATO

Fig. (2). Representación de las estructuras de los Ditiófosfatos y Xantatos.

En estos compuestos R, representa la cadena de hidrocarburos y M puede ser alkali o un metal alcalinoterreo, un ión

de amonio, o un hidrógeno, en los Xantatos M es un metal -  
alkalino. El radical polar -SM constituye al grupo solu--  
ble, ionizándose en la solución con la producción de un ca--  
tión  $M^+$  y los grandes iones respectivamente, que llevan la  
cadena o cadenas de hidrocarburos, quedando las siguientes  
estructuras:



## 2.2. CARACTERISTICAS DE LOS MINERALES SULFURADOS.

Sulfuros: Son todos aquellos minerales cuya composición -  
es la combinación no oxigenada de metales y metalóides. Fí-  
sicamente se caracterizan por su brillo metálico, peso es-  
pecífico elevado y opacidad. Económicamente, son muy ren-  
tables, ya que en ellas se hayan las menas metálicas más -  
importantes. Como la Argentita ( $Ag_2S$ ), Calcocita ( $Ca_2S$ ),  
Blenda ( $ZnS$ ), Calcopirita ( $FeCuS_2$ ), Cinabrio ( $HgS$ ), Gale-  
na ( $PbS$ ), Pirita ( $FeS_2$ ), etc.

Para los estudios de Microflotación y Potencial "Z" se --  
emplearon muestras de Galena y Pirita. Dichas pruebas re-

quieren ser ejecutadas con especies puras, de preferencia de origen natural ya que así se aproximan cada vez mas a la realidad.

Galena:  $PbS$ , Este tipo de minerales cristaliza en el sistema regular con estructuras tipo cloruro de sodio, en -- cristales de magnífica conformación, casi siempre implanta dos y de considerable magnitud, integrados principalmente por el cubo y el octaedro, tiene una dureza de 2.5 en la escala de Mohs, punto de fusión  $1115^{\circ}C$ . Color gris de plomo claro, lustre metálico, sobre todo en las superficies -- de exfoliación, que se vuelve mate por oxidación, raya negra grisácea, mate, el mineral es opaco e isotropo a la -- luz reflejada. De composición química muy constante, --- siempre contiene una pequeña cantidad de plata.

Pirita:  $FeS_2$ , la estructura de este mineral tiene como característica la aparición de grupos moleculares perfectamente definidos, los cuales están unidos por enlaces covalentes muy fuertes.

Magníficamente cristalizados en cubos o dodecaedros pentagonales, denominados piritohedros por la abundancia de su aparición, color amarillo latón, algunas veces con superficies abigarradas o bien pardo, lustre metálico, raya negro

verdosa, opaco a la luz reflejada, tiene coloración blanco crema, dureza de Mohs de 6 a 6.5, por percusión produce - chispas y olor a azufre, es paramagnético buen conductor y termoeléctrico.

Es el mas universal y abundante de todos los sulfuros, se presenta bajo todas las condiciones de deposición mineralógica.

### 2.3. PRINCIPIO DE LA MICROFLOTACION.

Cuando se tritura un mineral una cierta cantidad de energía libre sale de las caras nuevas expuestas, equivalente al trabajo realizado en vencer las fuerzas de cohesión que mantenían juntas las caras. Si se rompe en el aire, las moléculas de éstas son adsorbidas en las superficies frescas con cierta reducción de la energía libre. La cantidad de energía superficial que queda en las superficies del sólido cuando éstas han alcanzado un estado de equilibrio; - no se conocen puesto que no se han hayado medios para medirla. Una vez que la capa formada por moléculas del gas ha sido adsorbida, puede no ser siempre posible reemplazar la con molécula de agua, ésto es, humedeciendo la superficie. Sin embargo para realizar una flotación con éxito es

necesario disponer de una superficie adecuada, para que las moléculas de ciertos compuestos, llamados colectores que están disueltos o emulsionados en el agua, pueden estar adsorbidos en la superficie del mineral valioso y hacerlo flotable. Otras moléculas pueden también adherirse a los minerales no deseables de flotar para hacerlos no flotables.

Si la energía interfacial de la superficie es baja el humedecimiento es mas o menos completo. Una burbuja no puede entonces adherirse de por sí a la superficie, esto es, la partícula no es flotable. Cuando se eleva la energía interfacial, la adhesión de la burbuja llega a ser posible a un cierto valor crítico y entonces la partícula llega a ser flotable.

Por lo tanto podemos suponer, que para aumentar la energía interfacial de un mineral para ser flotado, se hacen pasar las moléculas del colector a través de la interfase las que tienen el poder de adherirse por sí solas en forma selectiva al mineral, forman una capa con alta energía interfacial.

La energía interfacial de una superficie varía de acuerdo con la naturaleza del mineral. Minerales que presentan cierta solubilidad tales como la calcita y la fluorita, se

sumergen en agua llegándose a una adsorción de moléculas - de agua seguido por un intercambio de iones entre el agua y el mineral.

La capa de transición forma un eslabón o liga íntima entre el sólido y el líquido y la energía interfacial es correspondientemente baja. Los minerales que no son solubles, - pero que se deshidratan facilmente, esto es, que se combinan con el radical hidróxilo (OH) del agua para formar hidróxidos, manifiestan una disminución en la energía interfacial. Los minerales que son apenas solubles, pero que - se oxidan rapidamente, tales como los sulfuros metálicos, la energía interfacial es probablemente más alta.

Una forma de poder modificar esta energía es creando una - nueva capa sobre el mineral, por lo general dicha capa con siste de un compuesto polar o no-polar ligado a la superfi cie por eslabón a través de un grupo polar. Varios compues tos capaces de producir la indispensable capa de hidrocarburo, se calsifican bajo el término de colector. La naturaleza de sus grupos polares varía, pero las partes no polares siempre consisten de un grupo o cadena de hidrocarburo.

El grupo polar es seleccionado por su tendencia a adsorber en la superficie el mineral valioso. Al hacerlo - así, forma una capa monomolecular orientada con el grupo polar hacia la superficie del mineral, en tanto que el grupo no-polar se aleja de ella, la película así formada presenta una capa de hidrocarburo a la fase acuosa, la cual tiene una energía interfacial mas alta que la anterior, siendo esto debido a la elevación de energía, principalmente al trabajo empleado en hacer que el colector entrase en la solución (se disolviese), y se adhiera a la partícula mineral.

Una superficie como esa, ofrece mas atracción para el aire que para el agua y una partícula así revestida o cubierta permanece adherida a una burbuja cuando se llega a que haga contacto con ella; esto es; ha llegado a ser flotable.

### 2.3.1. METODOLOGIA DE INVESTIGACION.

Los métodos de investigación en flotación son muy variables pero se pueden considerar los siguientes:

a) Determinar las características del mineral.

- b) Seleccionar los reactivos a emplear y las condiciones de prueba.
- c) Realizar pruebas con minerales lo mas puro posible.
- d) Trabajar con el mineral problema.
- e) Trabajar con los reactivos problema.
- f) Trabajar con los reactivos testigo.

Estos puntos tienen por objeto el de determinar las condiciones mas apropiadas de flotación para un mineral dado.

#### 2.4. DEFINICION DE POTENCIAL ZETA ( $\zeta$ )

Es la carga electrostática que se tiene en la superficie de un sólido cuando se encuentra en un líquido.

El compartimiento electrocinético depende del potencial en el plano de cizalla entre la superficie cargada y la solución, a este potencial se le denomina potencial Zeta ( $\zeta$ ).

El potencial Zeta también puede ser definido (6), como el potencial en el plano de cizalla entre la capa fija y el líquido adyacente a la partícula el líquido constituye la mayor parte de la solución.

Según Bruyn, (7), al estar inmerso un sólido en un líquido los componentes del sólido tenderán a disolverse en la fase líquida hasta que cada componente tenga el mismo potencial electroquímico en ambas fases.

Origen de la carga superficial.

Cuando se tiene la unión de dos fases ocurre un arreglo de sus componentes, estableciéndose un equilibrio por medio de un balance de efectos eléctricos y químicos, resultando un potencial electroquímico generado en el sistema que -- comprende la interfase.

El potencial eléctrico en un punto dado en el vacío es definido como la energía necesaria para traer una unidad de carga desde el infinito hasta el punto.

Considerando un caso mas real; donde  $\epsilon$  es cualquier medio menos el vacío y un material tal como fase  $\theta$ , la energía necesaria para traer la carga a través del medio depende de las interacciones entre el medio  $\epsilon$ , y la fase  $\theta$ . Para una especie (a) esta energía es llamada potencial electroquímica  $\mu_a$  y se define como:

$$\mu_a^- = \mu_a^* + Z_a e \psi_a^- \quad (1)$$

- Donde:  $Z$  = Número de valencia de (a)  
 $e$ : Cargas del electrón =  $4.80286 \cdot 10^{-28}$  ues  
 $\mu_a^-$  = Potencial químico  
 $\psi_a^-$  = Potencial interno  
 $Z_a e$  = Carga llevada por (a)

el potencial interno es constante dentro de la fase  $\theta$  y señala el trabajo realizado al transportar una unidad de carga a través de la fase  $\alpha$ . El potencial interno está definido como:

$$\psi_a^- = \phi^- + \chi^- \quad (2)$$

- Donde:  $\phi^-$  = Potencial externo  
 $\chi^-$  = Potencial superficial

Sustituyendo la ec. (2) en la ec. (1).

$$\mu_a^- = \mu_a^* + Z_a e (\phi^- + \chi^-) \quad (3)$$

El potencial externo señala el trabajo hecho para traer una unidad de carga desde el infinito a un punto justo fuera de la interfase  $\alpha/\theta$ , fig. (6). Esta interfase es vi

sualizada como contenido de una capa de carga ( $q_m$ ) y sus cargas contrarias ( $q_s$ ) representando una capa de dipolos.

El potencial superficial señala el trabajo necesario para cruzar la capa que forman las cargas ( $q_m$ ), ( $q_s$ ).

Cuando un sólido es rodeado por un líquido las cargas de ambas fases tienden al equilibrio formándose la doble capa fig. (7), la cual se forma debido al potencial químico y -

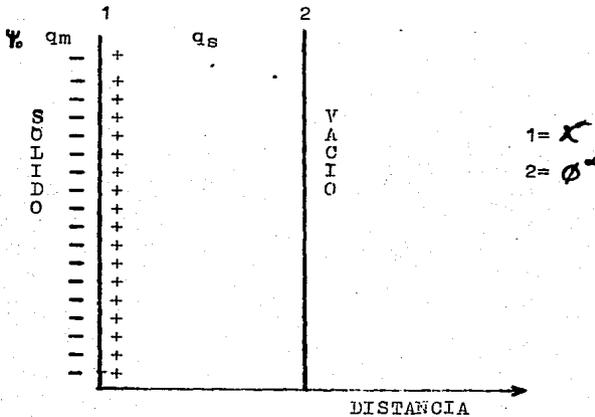


Fig. (6) Representación de la Capa Superficial.

eléctrico desarrollado por parte de cada una de las fases.

#### 2.4.1. MODELOS DE HELMOLTZ Y GOUY - CHAPMAN.

El primer modelo que mostró la distribución de las cargas fue el de Helmholtz (1879) y Perrin (1904), quienes propusieron que el arreglo de las cargas eléctricas en el sólido como una superficie y los iones contrarios en el electrolito, aparentan ser unas placas paralelas cargadas.

El modelo de Gouy (1910) y Chapman (1913) se conoce también con el nombre de capa difusa (8). Sugirieron independientemente, que las cargas forman una difusión continua de iones en una estructura dieléctrica.

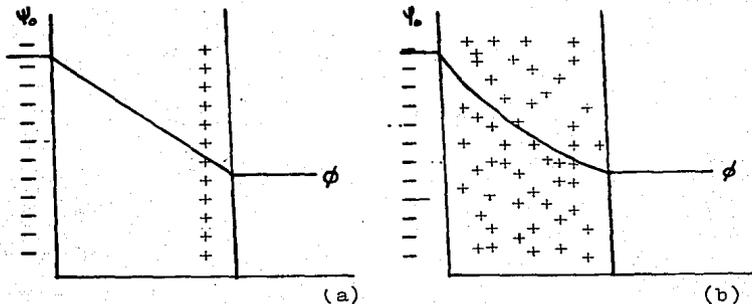


Fig. (7). Representación de los Modelos de Helmholtz

(a) Y Gouy - Chapman (b).

Ellos consideran que la concentración decrece progresivamente con la distancia, desde el sólido hacia el seno de la solución Fig. (8).

#### 2.4.1. MODELO DE STERN.

Posteriormente Stern (1924) modificó el modelo de la capa difusa, pues encuentra que no debe despreciarse el tamaño finito de los iones. Stern propone una capa inmóvil de iones contrarios adsorbidos y una capa difusa la cual se obtiene de combinar los modelos de Helmholtz y Gouy-Chapman y es conocida como doble capa.

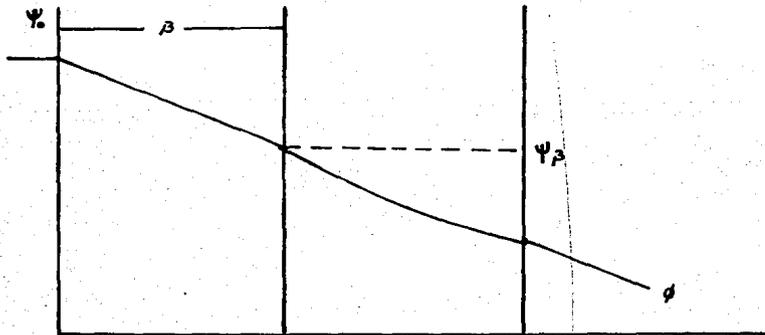


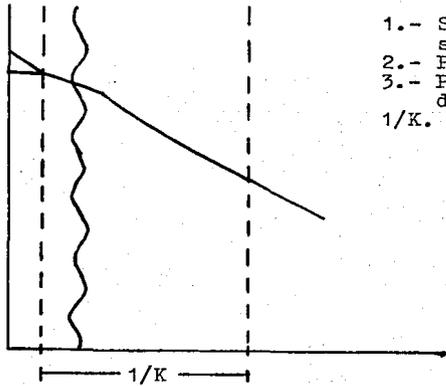
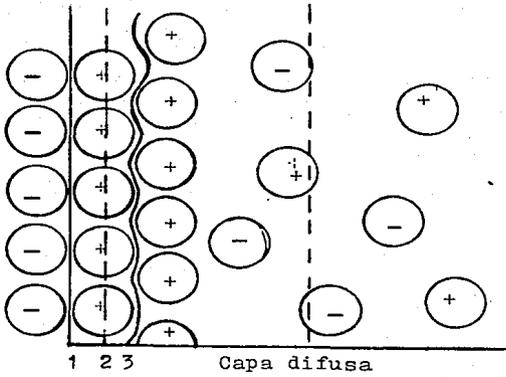
Fig. (8) Representación del Modelo de Stern.

Donde existen iones adsorbidos específicamente se le llamó plano de Stern el cual se considera situado a una distancia de la superficie aproximadamente igual a la del radio iónico hidratado fig. (9).

Generalmente la doble capa eléctrica se considera constituida por dos regiones; una interior en la que se consideran los iones adsorbidos (entre la superficie y el plano de Stern) y una región difusa en la que los iones se distribuyen según la influencia de fuerzas eléctricas y movimientos térmicos al azar (a partir del plano de Stern).

Se consideran iones adsorbidos específicamente a aquéllos que están unidos aunque sea temporalmente a la superficie por fuerzas electrostáticas o de Van Der Waals lo suficientemente fuertes para superar la agitación térmica.

El comportamiento del potencial en el plano de cizalla entre la superficie cargada y la solución, este potencial se llama Potencial Electrocinético o Potencial Zeta ( $\zeta$ ). La localización exacta del plano de cizalla, que en realidad es una zona en que la viscosidad cambia rápidamente es otra característica desconocida en la doble capa eléctrica.



- 1.- Superficie del solido.
- 2.- Plano de Stern.
- 3.- Plano de cizalla dura
- $1/K$ . Espesor de la doble capa.

Fig. (9). Representacion esquematica de la estructura de la doble capa eléctrica.

## 2.5. FENOMENOS ELECTROCINETICOS.

Electrocinético: Es el calificativo general que se aplica a cuatro fenómenos que aparecen cuando se intenta arrancar de una superficie la parte móvil de la doble capa eléctrica. Si se aplica un campo tangencial a la superficie cargada en contacto con agua o un electrolito, se ejerce una fuerza en las dos partes de la doble capa: la superficie cargada junto con la partícula tiende a moverse en la dirección apropiada mientras que los iones en la parte de afuera de la superficie de cizalla, junto con el agua de hidratación asociada tienden a mostrar una migración neta en la dirección opuesta, recíprocamente se creará un gradiente de potencial si la superficie cargada y la parte móvil de la doble capa, se mueven una respecto a la otra.

Electroforésis: Es el movimiento de las partículas cargadas respecto a un líquido estacionario cuando se aplica un gradiente de potencial es decir, si aplicamos un campo eléctrico o una suspensión tal, las partículas se desplazan en el campo en la dirección determinada por la carga de la partícula.

Electro-osmosis: Trata del movimiento del líquido respecto a una superficie cargada estacionaria cuando se aplica

un gradiente de potencial.

Consideremos una celda, la cual tiene un disco poroso de cuarzo en una posición fija y está llena de agua si aplicamos un potencial eléctrico entre los electrodos, se produce un flujo de agua hacia el compartimiento catódico. En el caso de agua y cuarzo, la parte difusa móvil de la doble capa en el medio líquido está cargada positivamente. Esta carga positiva se desplaza hacia el electrodo negativo y el agua fluye con ella.

Potencial de flujo: Consiste en la creación de un gradiente de potencial cuando se hace fluir un líquido a lo largo de una superficie estacionaria.

Potencial de sedimentación: La parte difusa de la doble capa, siendo móvil, tiene signo opuesto y es atraída por el otro electrodo. Inversamente, si se dejan sedimentar las partículas, éstas llevan su carga hacia el fondo de la celda y dejan la carga sobre la capa difusa en la parte superior. Generando una diferencia de potencial entre la parte superior y el fondo de la celda.

La magnitud de todos los efectos electrocinéticos dependen de la fracción de carga eléctrica que queda en la parte mó

vil de la doble capa. El potencial en la línea divisora entre la porción fija y móvil de la doble capa es el Potencial Zeta ( $\zeta$ ).

El fenómeno de la electrofóresis es el que tiene mayor aplicación práctica en la determinación del Potencial Zeta ( $\zeta$ ), la aplicación de los demás fenómenos en la determinación de dicho potencial ha sido limitado debido a dificultades experimentales.

## 2.6. VELOCIDAD ELECTROFORETICA Y POTENCIAL ZETA ( $\zeta$ ).

Mientras en electro-osmosis se mueve el líquido en relación al sólido, en la electrofóresis el líquido como un todo está en reposo y la partícula se mueve a través del líquido bajo la acción de un campo eléctrico.

En ambos fenómenos (electrofóresis y electro-osmosis), las fuerzas actúan en la doble capa eléctrica y controlan los movimientos relativos del líquido y sólido. De aquí que la ecuación:

$$V_s = \frac{E D_o \zeta}{4 \pi R_o} \quad (4)$$

La cual se emplea para calcular la velocidad electro-osmótica, esta ecuación se aplica también a la primera aproximación para electrofóresis, solamente que ahora ( $V_g$ ) es la velocidad del movimiento electroforético.

$$V_p = \frac{E D_o \zeta}{4 \pi \eta_o} \quad (5)$$

Donde:     $V_p$ :    Velocidad electroforética  
           $E$ :    Potencial  
           $D_o$ :    Constante dieléctrica  
           $\eta_o$ :    Viscosidad del líquido (constante)  
           $\zeta$ :    Potencial Zeta ( $\zeta$ ).

De acuerdo a la ecuación (5) el tamaño y forma de la partícula no se ha tomado en cuenta, para tal efecto, es necesario introducir dos factores, (R) y (F) donde: (R) toma en cuenta el retraso de relajación de la atmósfera iónica en la excitación de la movilidad de las partículas, (F) considera simultáneamente la interacción del campo aplicado con la doble capa eléctrica y con la superficie de la partícula. Para la electrofóresis de sólidos esféricos no conductores, la ecuación:

$$V_p = \frac{RFE' D_o \zeta}{6 \pi \eta_o} \quad (6)$$

El efecto de relajación es una consecuencia de la interacción del campo eléctrico aplicado con la atmósfera iónica de la partícula, como la partícula es atraída a través del líquido existe una retardación en la formación de una atmósfera iónica enfrente de ella y una relajación de esta atmósfera detrás de la misma. El resultado, es usualmente una retardación de la partícula. Cuando el potencial Zeta ( $\zeta$ ) es menor de 25 mv. se considera despreciable este efecto de relajación. Para partículas esféricas de radio ( $r$ ), el factor ( $F$ ) es dado por:

$$F = \frac{(K' - 2K'_s / r_s) (3f-2)}{2 (K' + K'_s / r)} \quad (7)$$

Donde:  $K'$  : Conductividad específica de la solución  
 $K'_s$  : Conductividad específica de la superficie.  
 $f$  : Es función ( $r$ )  
 $r$  : Radio de la partícula.

El procedimiento de medir  $V_p$  es haciendo una observación directa de la partícula en microscopio, siendo colocada la pulpa en un tubo de sección rectangular o circular. Para obtener la velocidad electroforética, es usual observar su movimiento en una región del tubo donde el movimiento del

líquido sostenido es cero, obteniéndose posteriormente, -  
con la siguiente ecuación:

$$V_p = \frac{R F E' D_o \zeta}{6 \pi \eta_o} \quad (8)$$

Pero si  $K'$  es despreciable  $F=3/2$  y si  $R=1$ , para agua a --  
20 C,  $\eta_o = 0.01$  poise y  $D_o = 80$ , si  $\eta_o = 0.009$  poise y --  
 $D_o=78.3$  respectivamente las ecuaciones resultantes son:

$$\text{a } 20 \text{ C} \quad \zeta = 14.2 \quad * \quad V_p / E' \quad (9)$$

$$\text{a } 25 \text{ C} \quad \zeta = 12.9 \quad * \quad V_p / E'$$

Para determinar la velocidad electroforética ( $V_p$ ) se si-  
gue el desarrollo matemático que efectuaron Mori, Okamoto,  
Hara y Aso (1980,) estos autores (4) se basaron en el tra-  
bajo hecho por Smolouchowski (1921), Komagata (1933), y -  
White (1937), quienes consideran una celda electroforéti-  
ca de sección rectangular, tomando como principales varia-  
bles el ancho y profundidad de la celda, Mori considera -  
las mismas variables, pero con condiciones límite diferen-  
tes.

La velocidad observada  $V_p$  de una partícula en un microscopio es el resultado de la velocidad electro-osmótica --

( $V_s$ ) del líquido y la velocidad electroforética de la partícula  $V_p$ .

$$V_o = V_p + V_s \quad (10)$$

Cuando la relación ancho espesor ( $\beta$ ) es suficientemente grande, la velocidad observada en el centro de la celda es expresada por la siguiente ecuación:

$$\frac{V_s(O,Y)}{\tau} = 1 + \frac{\Delta\tau}{\tau} - \frac{y}{b} - \frac{3/2 (1-y^2/b^2)}{\frac{1+192}{\pi^5} \beta + 1.004524} \quad (11)$$

Donde:  $V_s$  = Velocidad electro-osmótica

$\tau$  =  $W_1 + W_o$

$W_1$  = Velocidad electro-osmótica en la parte superior de la celda.

$W_o$  = Velocidad electro-osmótica en la parte inferior de la celda.

$\beta$  = Relación ancho/espesor.

$$V_o = \frac{\Delta\tau}{b^2} y^2 + \frac{\Delta\tau}{b} y + (1-A)\tau + V_p \quad (12)$$

$$A = \frac{3/2}{1-192/\pi^5 \beta + 1.004524}$$

La ec. 12 de  $V_o$  nos representa la ecuación general de una parábola la cual es:

$$Z = K_2 Y^2 + K_1 Y + K \quad (13)$$

Se tiene que:

$$K_2 = \frac{A}{b^2} \quad K = (1-A) + V_p$$

$$K_1 = \frac{A}{b} \quad Z = V_o$$

De la ecuación (12) se tiene.

$$V_p = K_o + [ ((1/3 + 0.04201660) / \beta) ] K_2 \quad (14)$$

La velocidad electroforética está relacionada con la ec. - (14).

Las constantes  $K_o$  y  $K_2$  se obtienen de la siguiente forma:

Hacer mediciones de velocidades observadas a diferentes -- profundidades de la celda ( $i=1 \rightarrow N$ ),  $N$  es el número de mediciones que debe ser más grande que 4, obteniéndose arreglo de datos ( $Y_1, Z_1$ ).

Con los datos obtenidos experimentalmente las constantes  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  se determinan mediante regresión multilínea -- utilizando el método de mínimos cuadrados.

La cual consiste en hacer mínima la suma.

Las ecuaciones resultantes que cumplen la minimización son

$$\Sigma Z = NK_0 + k_1 \Sigma y_1 + K_2 \Sigma y_2$$

$$\Sigma y_1 Z = K_0 \Sigma y_1 + k_2 \Sigma y_2 + k_2 \Sigma y_1 y_2 \quad (15)$$

$$\Sigma y_2 Z = k_0 \Sigma y_2 + k_1 \Sigma y_1 y_2 + k_2 \Sigma y_2^2$$

Las cuales son para una colección de datos tipo:

$$Z = K_0 + k_1 y_1 + k_2 y_2 + \dots + K_1 y_1$$

Una vez conocidas las constantes  $K_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  podemos conocer el potencial  $Z$  aplicando la ec. (9)

$$\text{a } 20^\circ\text{C} \quad \mathcal{S} = 14.2 * V_p/E$$

$$\text{a } 25^\circ\text{C} \quad \mathcal{S} = 12.9 * V_p/E$$

## CAPITULO III

### DESCRIPCION DEL EQUIPO, MATERIAL Y REACTIVOS EMPLEADOS

#### 3.1. DESCRIPCION DEL SISTEMA DE MICROFLOTACION.

En la práctica actual, con la flotación de minerales, el operador tiene que optimizar los efectos de un gran número de variables interactuantes. Para entender la química básica de la operación unitaria de flotación, y en particular la fisico-química que es crítica en la separación selectiva, es necesario manejar las variables mecánicas y químicas muy estrechamente.

##### 3.1.1. TUBO HALLIMOND.

Para cumplir con tales requerimientos, se dió a conocer un invento de laboratorio llamado "Tubo Hallimond".

La primera celda de microflotación se debió a Hallimond (3) que la desarrolló en el año de (1944), revisada por Ewers (Sutherland and Wark, 1955) y por Fuerstenau (1957). (3).

Es conveniente hacer resaltar de que en los últimos años se han reportado una gran cantidad de trabajos científicos de todo el mundo y su equipo de laboratorio ha sido esta sencilla celda de flotación.

La celda tal y como se muestra en la fig. (3) está constituida por dos partes de vidrio (A), y (B) que se unen por medio de una junta. (C)

La parte inferior tiene una entrada para el gas, una pastilla de vidrio poroso (D) (poro - 90 micras), la cual permite la entrada del gas pero no permite que se transmita el agua y el mineral.

La parte superior está ligeramente inclinada y la mitad del tubo tiene una trampa lateral (E). Esta celda tiene que ser construida por un técnico en vidrio, ya que no es posible conseguirla en establecimientos comerciales.

### 3.1.2. DESCRIPCION Y USO DEL SISTEMA DE ALIMENTACION DEL GAS PARA EL TUBO HALLIMOND.

Como se habrá observado en los puntos anteriores de la mi-

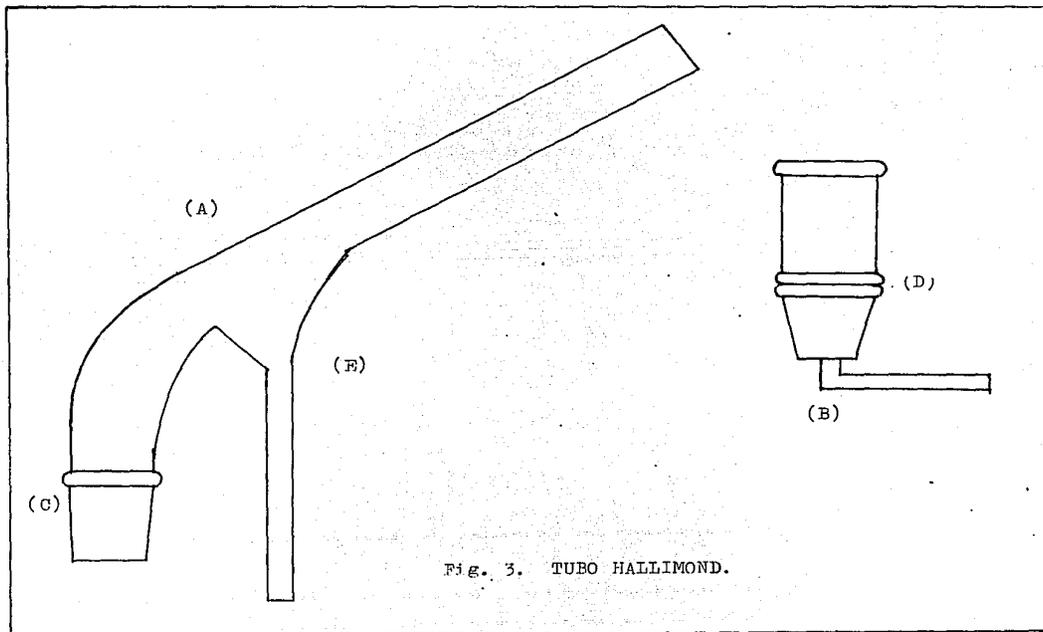


Fig. 3. TUBO HALLIMOND.

crocelda es del tipo neumático y por ende, se requiere una alimentación de gas el cual colecte las partículas minerales. El gas empleado es aire. La instalación del sistema se muestra en la fig. (4). El equipo usado es un garrafón de dos galones aproximadamente, un tubo de vidrio de 1000 cc. con salida lateral inferior graduado, tres pinzas de Hoffman y manguera de hule.

La secuencia para el uso del sistema de alimentación del gas es el siguiente:

- a) Al garrafón se le agrega agua hasta la mitad de su capacidad.
- b) Se coloca un tapón con tres orificios donde son colocados tres tubos, de los cuales uno debe llegar casi al fondo y los otros dos arriba del nivel del líquido, el tapón con los tubos debe quedar bien sellado para evitar fugas.
- c) El tubo que llega al fondo es conectado a la columna, de los otros dos tubos, uno va conectado a la toma de aire y el otro a la celda.
- d) Asegúrese de que las válvulas estén cerradas, abrir la válvula (1) y (2) para permitir el paso del gas provocando que el líquido ascienda por la columna hasta una

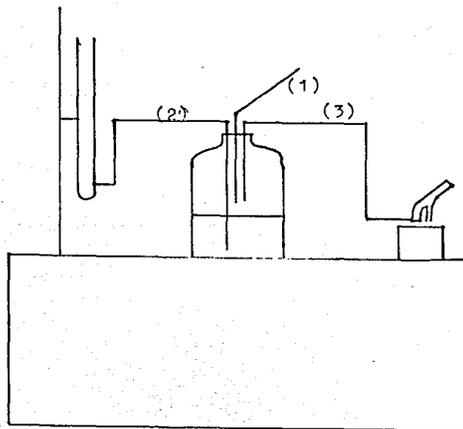


Fig. 4. Sistema empleado para obtener un flujo y presión constante de aire en las pruebas de Microflotación.

altura de referencia.

- e) Al llegar el líquido a la altura deseada, cerrar la válvula (1) para impedir que siga pasando aire.
- f) Si el líquido sube a una altura mayor, abrir la válvula (3) para que salga el gas provocando un descenso del líquido.
- g) Cuando la celda esté lista para la prueba, se abre la válvula, (3) para permitir el paso del gas. Este flujo de gas deberá permanecer constante durante toda la flotación (1 min.).
- h) Cuando el gas esté saliendo se notará un descenso en la columna de agua del tubo, la cantidad de líquido que se desplaza es igual al volumen de aire empleado y éste va de (100 - 150 cc), es la cantidad máxima de gas por minuto, ya que de lo contrario provoca que el líquido deforme en la parte superior.
- i) Una vez que ha transcurrido el tiempo de flotación, se cierra la válvula (3) para impedir el paso del aire.

### 3.2. CELDA PARA MEDICION DE VELOCIDAD ELECTROFORETICA.

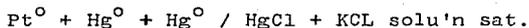
La fabricación de la celda está basada en el diseño hecho por Mori (1980) (4). Esta es rectangular de vidrio plano con las siguientes dimensiones.

	EXTERIORES (mm)	INTERIORES (mm)
LARGO	75.00	75.00
ANCHO	25.00	22.00
PROFUNDIDAD	2.85	00.95

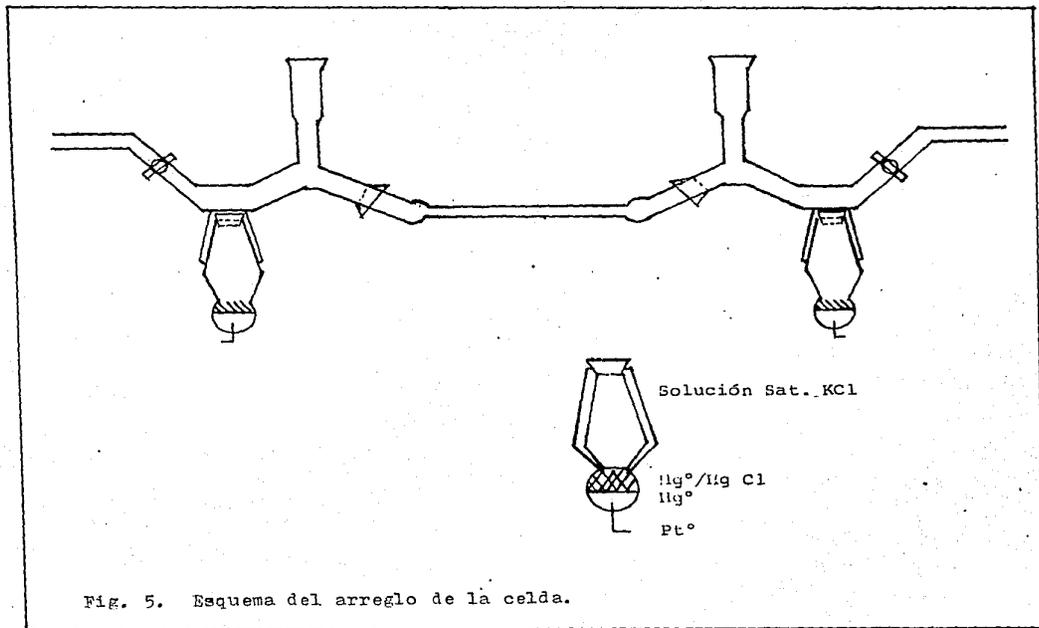
A esta celda se le acoplan dos juntas en las cuales se colocan dos electrodos, como se muestra en la fig. (5).

Fabricación de los electrodos:

Los electrodos se construyen de calomel con la siguiente composición:



Se emplea una fuente de poder de las siguientes características, la fuente de poder cambia la corriente alterna a corriente directa y tiene un paso de diferencia de potencial más elevado que 117 volts. y un máximo de 335 volts.



El medio para efectuar las observaciones es un microscopio Vickers, dotado de un ocular graduado de 10 X y un objetivo de la misma capacidad en aumentos, dando un total de -- 100X.

La medición de las profundidades de la celda se realizaron con el micrometro ocular del mismo microscopio.

### 3.3. MATERIAL Y REACTIVOS DE LABORATORIO EMPLEADOS.

<u>Descripción.</u>	<u>Cantidad</u>
Potenciómetro . . . . .	1
Balanza Analítica . . . . .	1
Parrilla con agitador magnético . . . . .	2
Pastilla magnética . . . . .	3
Vasos de precipitado de 250 cc. . . . .	25
Vasos de precipitado de 400 cc. . . . .	10
Pipeta graduada de 10cc. . . . .	2
Matraz aforado de 1000cc. . . . .	2
Soporte universal . . . . .	1
Pinzas de tres dedos . . . . .	3
Manguera de hule (0.8 cm.) . . . . .	2 mt.

Tubo de vidrio (0.8 cm.) . . . . .	1 mt
Piceta de 250cc. . . . .	1
Estufa secadora . . . . .	1
Mortero de porcelana . . . . .	1
Cribas Tyler (malla 100, 200, 325) . . . . .	1 c/u

Reactivos Empleados:

Acetona

Acido Clorhídrico

Agua destilada

Hidróxido de sodio

Solución Buffer (ph 1, 7, 7, 12).

Dicromato de potasio

Acido sulfúrico

Cloruro de potasio

Mercurio

Cloruro mercurioso

Agar

Xantato isopropílico de sodio

Xantato amónico de potasio

Ditiofosfato etílico

Sal amoniacal de ácido ditiofosfórico. (y derivados)

Solución crómica

Preparación y uso de reactivos:

Acido clorhídrico. Se emplea únicamente para modificar el ph de la solución.

Hodróxido de sodio. Se usa para modificar el ph de la solución.

Acetona. Se emplea para lavar el mineral.

Solución Buffer. Se emplea para calibrar el potenciómetro, ya que es de gran importancia tener un ph lo mas exacto.

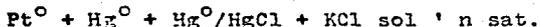
Solución crómica. Esta solución se emplea para lavar el material de vidrio, la razón de su uso es que es bastante efectiva para eliminar los residuos de reactivo que quedan adheridos a las paredes de los recipientes de cristal.

La forma de preparación es, disolver dicromato de potasio en 0.5 litro de agua, hasta conseguir la saturación, procurando una agitación constante. Una vez logrado esto, - agregar 0.5 litros de ácido sulfúrico concentrado, se debe tener un enfriamiento constante, ya que hay una reacción fuertemente exotérmica.

Al emplear la solución crómica se debe usar guantes de hule y bata por su carácter altamente tóxico.

Fabricación de electrodos:

Los electrodos se construyen de Calomel y tienen la siguiente composición:



Se mezcla perfectamente el mercurio con el cloruro mercurioso en un mortero de porcelana.

La solución de cloruro de potasio se prepara de la siguiente manera:

Se disuelve aproximadamente 10gr. de cloruro de potasio en 100cc. de agua destilada a 70°C posteriormente se le añaden 2 gr. de Agar y se mezcla perfectamente hasta disolver ésta.

Posteriormente se vierte en el electrodo el mercurio metálico seguida de la mezcla de  $\text{Hg}^{\circ} / \text{HgCl}$  y al final se agrega la mezcla de agar con cloruro de potasio. Se deja en-

friar, ésto se hace con la finalidad de evitar que la solu  
ción de prueba se mezcle con la solución del electrodo.

## CAPITULO IV

### EXPERIMENTACION

#### 4.1. DESCRIPCION DE PRUEBA.

4.1.1. Para comprender el método de trabajo se ejemplificará con una prueba de microflotación de galena, con las siguientes condiciones:

Conc. del reactivo XINa =  $2 \times 10^{-5}M$

Tiempo de acondicionamiento 15 min.

Cantidad de muestra 1 gr. (Galena).

Tiempo de flotación 1 min.

Flujo de aire de 100 - 150 cc.

A continuación se enumeran los pasos para mayor comprensión:

a). La primera etapa de la prueba, consiste en preparar el mineral, se parte de una muestra lo mas puro posible, en caso de que no se tuviese, se procede de la siguiente manera, se rompe y se selecciona a mano pasando los pedazos de mineral seleccionado a un mortero de porcelana en donde se

muelen, posteriormente se pasan a las cribas para separar la muestra de - 100 a + 200 mallas, el material obtenido es guardado en un frasco con tapón esmerilado.

b). El material es lavado con acetona durante 10 min., se decanta la solución y se vuelve a lavar con acetona durante 5 min., después se lava unas 5 veces con agua destilada. Toda la operación se debe efectuar con mucho cuidado.

c). Se pesa un gramo de mineral en la balanza analítica y se pasa la muestra a un vaso de precipitado de 250cc. y se añade la solución.

d) Se coloca el vaso sobre la parrilla y se introduce la pastilla magnética con los electrodos del potenciómetro, este último deberá estar perfectamente calibrado con la solución Buffer en el rango de ph deseado.

e). Se enciende el potenciómetro y se inicia la agitación regulando el ph con solución de ácido clorhídrico o hidróxido de sodio según sea el caso.

f). Se da un tiempo de 15 minutos a partir del inicio de la agitación. Hay que hacer resaltar el hecho de que durante el acondicionamiento, el pH puede estar variado, por

lo que hay que estarlo ajustando.

g) Una vez transcurrido el tiempo de acondicionamiento, se deja reposar la solución para que los sólidos se asienten, se toma el valor del pH y se apaga el potenciómetro, por último se retiran los electrodos.

h) Se decanta la solución en una piceta, con el líquido de ésta se enjuagan los electrodos del potenciómetro, se extrae la pastilla magnética y se enjuaga con la solución.

i) Si la solución empleada es mucha, se vuelven a dejar -- asentar los sólidos y nuevamente se decanta la solución en la piceta. Mientras se realizan estas operaciones o después de ellas se debe ajustar el nivel del líquido en la - columna.

j) El siguiente paso es depositar los sólidos en la parte inferior de la celda ayudándose con el líquido de la piceta, procurando de que no haya derramamiento.

Se ajusta la parte superior de la celda y se inclina ligeramente para vaciar el resto de la solución e introducir - la pastilla magnética.

k) Se coloca debajo de la celda una parrilla con agitador magnético, se inicia la agitación, procurando que la turbulencia llegue hasta la junta, se conecta el sistema de aire.

l) Se permite que el aire fluya uniformemente durante un minuto, tratando de que el flujo sea de 100 a 150 cc.

m) Una vez que haya transcurrido un minuto de flotación, se vacía en un vaso, el contenido de la parte superior -- abriendo la pinza de la trampa, lavando perfectamente para evitar pérdidas. Se desacopla el sistema y la pulpa contenida en la parte inferior se deposita en otro vaso, de -- igual manera se lava perfectamente ya que parte de la pulpa puede quedar retenida en el tapón poroso. Ambas partes se lavan con agua destilada en sus respectivos vasos las celdas se desmontan y se procede a lavar con jabón y solución crómica.

n). El contenido de los vasos se deja asentar y se decanta la solución, posteriormente se lleva a una estufa a secar a 110°C durante 15 minutos.

o). El último paso es pasar los productos y obtener el porcentaje de recuperación mediante la siguiente relación:

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{\text{Peso de concentrado por } 100}{\text{Peso de concentrado} + \text{peso de colas}}$$

Como peso total de la muestra procesada, se expresa por la suma de los pesos del concentrado y las colas, ya que no necesariamente ésta debe ser de un gramo.

De igual manera se efectúan las pruebas en los rangos de pH seleccionados. Permitiendo obtener los porcentajes de recuperación en todo el rango de pH. Las variables y reactivos empleados se muestran en la Tabla I.

#### 4.1.2. MEDICION DE VELOCIDAD ELECTROFORETICA.

Para las pruebas de medición electroforética se procede de la siguiente manera. Al igual que en las pruebas de microflotación, en las pruebas de medición de velocidad electroforética se emplean muestras de minerales lo mas puro posible y un tamaño de menos 325 mallas.

a) Se pueden emplear de 0.5-1gr. de mineral, el cual es colocado en un vaso de precipitados de 250cc.

b) Se agrega la solución con reactivo al vaso y se introdu

TABLA 1. Reactivos y Variables empleados en las pruebas de Microflotación para Galena y Pirita.

R	C	TA	TF	PM
XINa	$2 \times 10^{-5}$	15	1	1
XAP	$1 \times 10^{-5}$	..	..	..
B 104	$2 \times 10^{-5}$	..	..	..
B201	$2 \times 10^{-5}$	..	..	..
XCA76	$2 \times 10^{-5}$	..	..	..
XCA77	$2 \times 10^{-4}$	..	..	..

Donde;

R: Reactivo

C: Concentración Molar

TA: Tiempo de acondicionamiento en min.

TF: Tiempo de flotación en min.

PM: Peso de la muestra en gramos.

ce una pastilla magnética.

c) El vaso se coloca sobre una parrilla con agitador magnético y se introducen los electrodos del potenciómetro, el cual deberá estar calibrado.

d) Se enciende el potenciómetro iniciando la agitación y regulando el pH con ácido clorhídrico o hidróxido de sodio según sea el caso.

e) Al iniciarse la agitación, el tiempo de acondicionamiento es de 7 min.

f) Una vez transcurrido el tiempo de acondicionamiento se coloca parte de la pulpa en la celda y se procede a medir la velocidad electroforética.

g) Las mediciones se efectúan a un pH determinado, con los datos obtenidos de velocidad y potencial aplicado se procede a hacer los cálculos pertinentes, para conocer el potencial Zeta ( $\zeta$ ) de un mineral a un determinado pH.

En la Tabla II se muestra los reactivos y variables empleados.

TABLA II. Variables y Reactivos empleados en las mediciones de Velocidad Electroforética para Galena y Piritita.

R	C	TA	E	Co
XINa	$2 \times 10^{-5}$	7	NaCl	C. 1
XAP	$1 \times 10^{-5}$	„	„	„
B104	$2 \times 10^{-5}$	„	„	„
B201	$2 \times 10^{-5}$	„	„	„
XGA76	$2 \times 10^{-5}$	„	„	„
XGA77	$2 \times 10^{-4}$	„	„	„

Donde:

R: Reactivo.

C: Concentracion molar del reactivo.

TA: Tiempo de acondicionamiento.

E: Electrolito.

Co: Concentracion molar del electrolito.

#### 4.2. CALCULOS

Como se mencionó anteriormente, para poder conocer el porcentaje de recuperación de un mineral se emplea la siguiente relación.:

$$\% \text{ RECUPERACION} = \frac{\text{Peso de Concentrado por } 100}{\text{Peso de Concentrado} + \text{Peso colas}}$$

Esta relación nos permite calcular el porcentaje de recuperación de un mineral.

Se grafica pH contra por ciento de recuperación obteniendo se la curva de recuperación, en la cual se puede apreciar la efectividad de un colector ya que muestra puntos óptimos de recuperación.

Para efectuar los cálculos de Potencial Zeta ( $\zeta$ ) primeramente se obtienen las velocidades observadas a diferentes profundidades de la celda, variando el pH en la solución para cada especie mineral. Con los datos obtenidos de velocidad y en base a la ecuación: (13).

$$Z = K_2 Y^2 + K_1 Y + K_0$$

Donde: Z: Representa la velocidad calculada ( $\mu_m/\text{seg}$ ).

Y: Representa los valores de profundidad de la celda en ( $\mu_m$ )

Para conocer las constante  $K_2$ ,  $K_1$   $K_0$  se efectúa el cálculo por medio de un sistema de matrices, en el cual se incluye las velocidades observadas y las profundidades de la celda. Una vez conocidas las constantes se puede conocer la velocidad electroforética con la ecuación (14).

$$V_p = K_0 + [ ( ( 1/3 = 0.04201660 ) / \beta ) ] K_2$$

El potencial Zeta ( $\zeta$ ) se calcula con la ecuación (12).

$$\zeta = 14.2 V_p/E = \text{mv.}$$

$$E = E/D \text{ volts /cm.}$$

Donde: E: Potencial aplicado entre electrodos.

D: Distancia entre electrodos - 38 cm.

**CAPITULO V**

**DESCRIPCION DE GRAFICAS Y DISCUSION DE**

**RESULTADOS.**

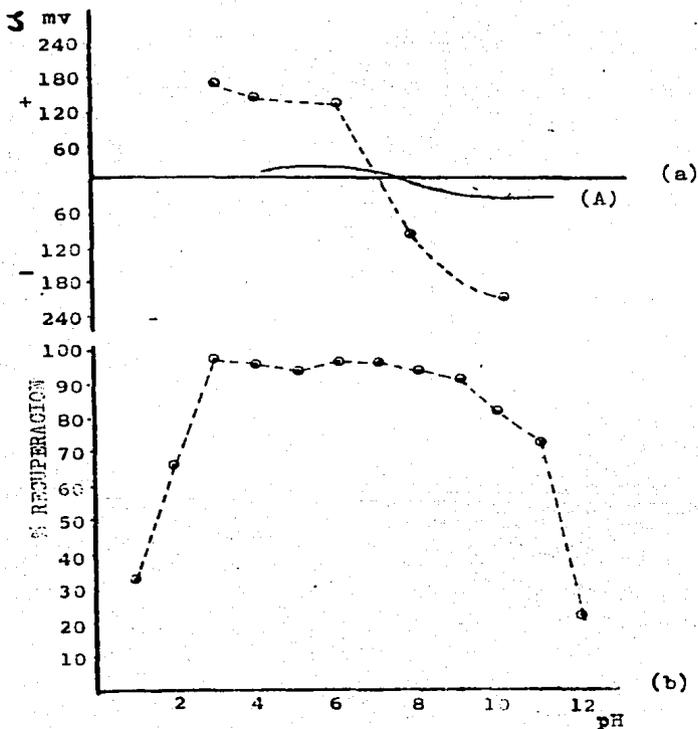


FIG. 10 POTENCIAL (Z) a) Y Recuperación de Galena en función del pH b) En presencia de Xantato Iso-propílico de sodio  $2 \times 10^{-5}$  Molar (A = Potencial (Z) Original (3).

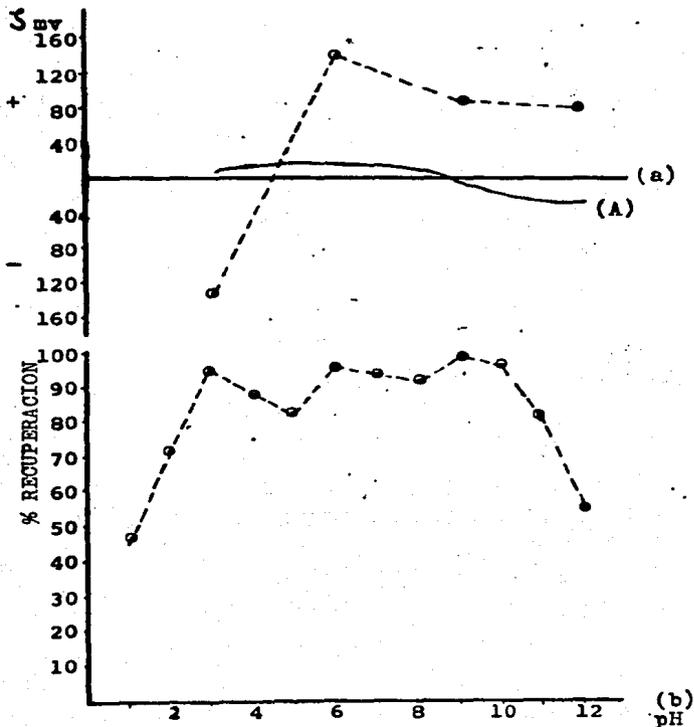


Fig. 11 CURVA DE POTENCIAL (Z) a) Y Recuperación de Galena en función del pH b) Y en presencia de Xantato Amilico Potasio  $1 \times 10^{-5}$  Molar (A= Potencial (Z) Original (3) ).

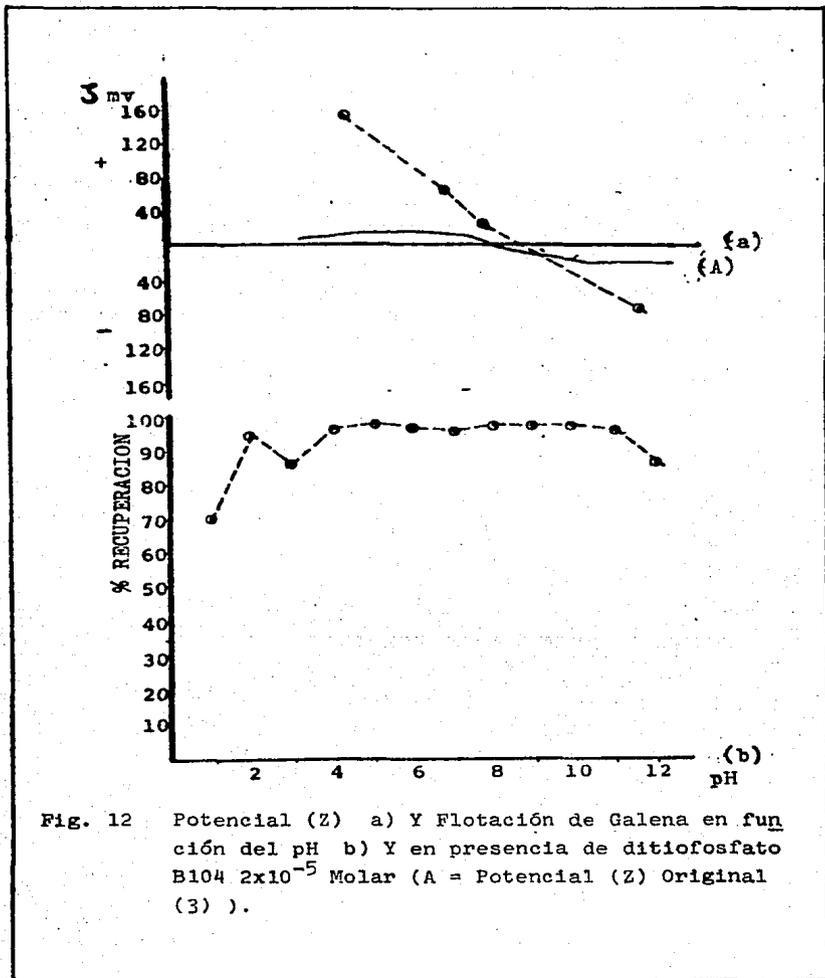


Fig. 12 Potencial (Z) a) Y Flotación de Galena en función del pH b) Y en presencia de ditiofosfato B104  $2 \times 10^{-5}$  Molar (A = Potencial (Z) Original (3) ).

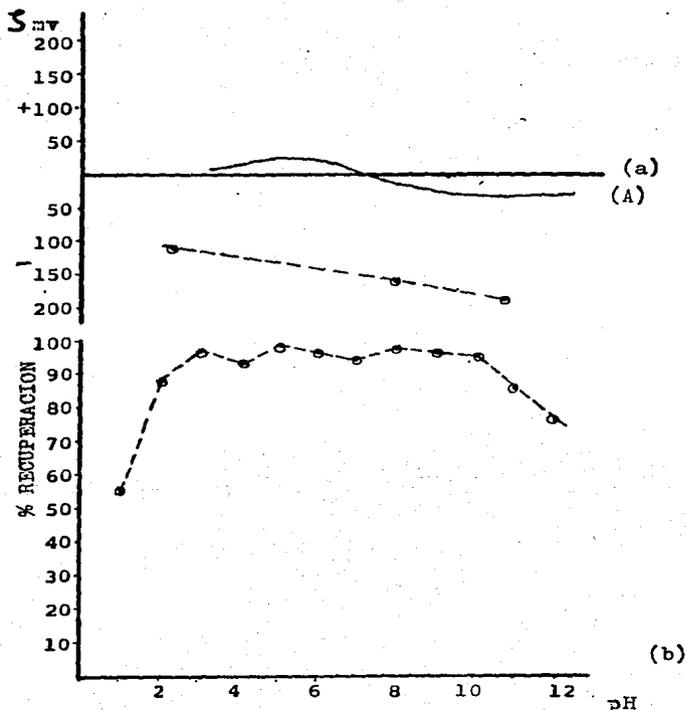


Fig. 13 Curva de Potencial (Z) a) Y Curva de Flotación b) En presencia de ditiofosfato B201  $2 \times 10^{-5}$  Molar (A = Potencial (Z) Original (3)).

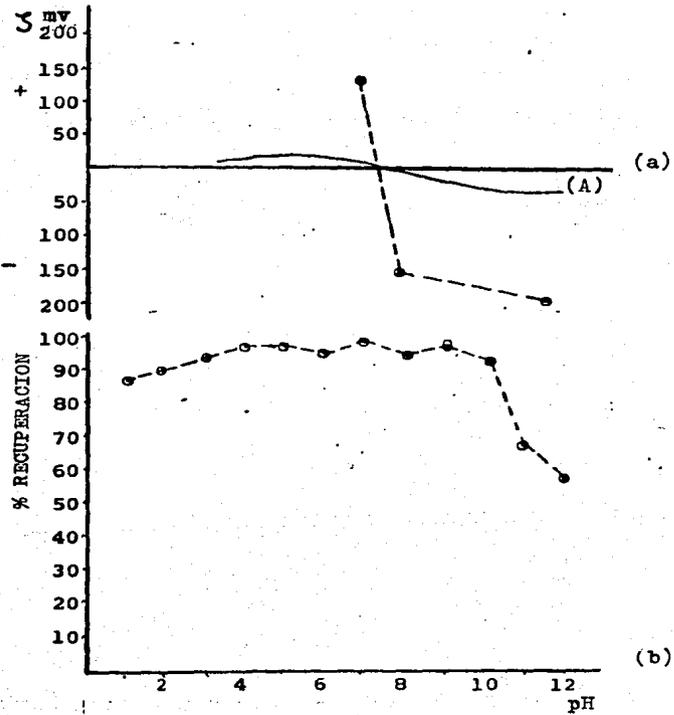


Fig. 14 Potencial (Z) a) Y Recuperación de Galena en función del pH b) Y en presencia de ditiofosfato XCA76  $2 \times 10^{-5}$  Molar (A Potencial (Z) Original (3) ).

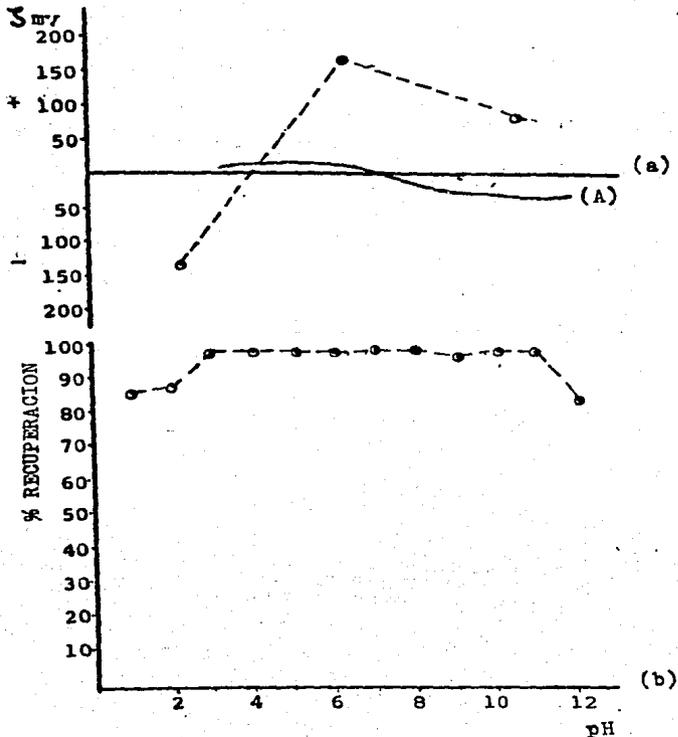


Fig. 15 Potencial (Z) a) y Flotación de Galena b) En función del pH y en presencia de ditiofosfato XCA77  $2 \times 10^{-4}$  Molar (A= Potencial (Z) Original (3) ).

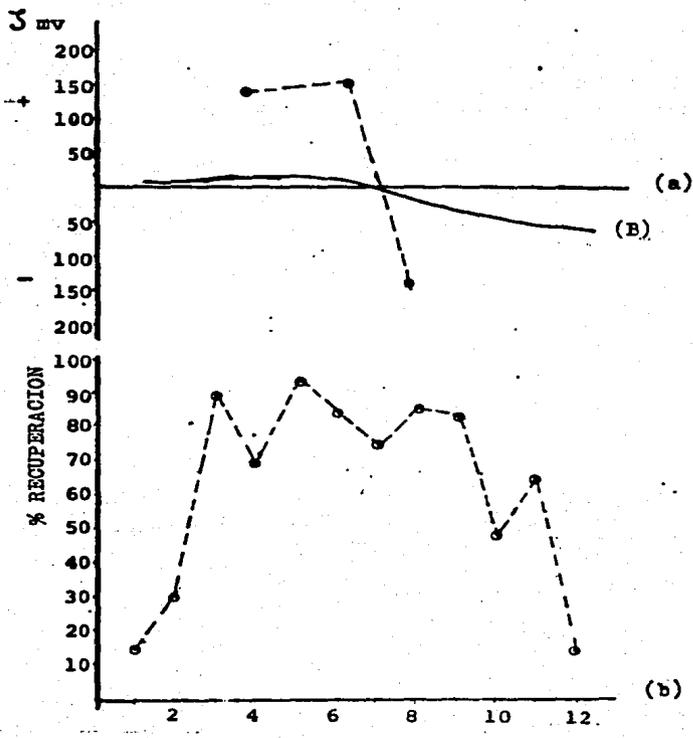


Fig. 16 Curva de Potencial ( $Z$ ) a) Y Recuperación de Pirita b) En función del pH, y en presencia de Xantato Isopropílico de Sodio  $1 \times 10^{-5}$  Molar (B= Potencial ( $Z$ ) Original (3) ).

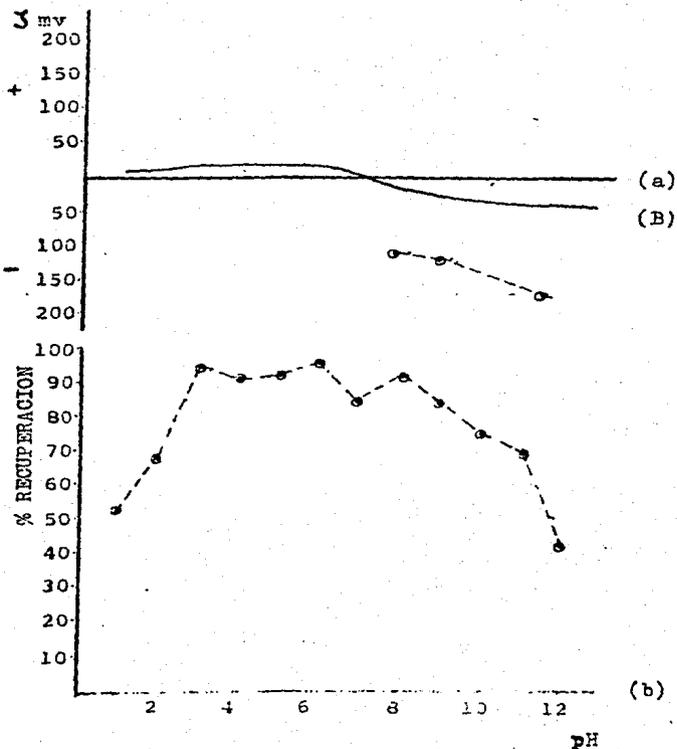


Fig. 17 Potencial ( $\zeta$ ) a) Y curva de recuperación b) En función del pH y en presencia de Xantato - Amflico de Potasio  $2 \times 10^{-4}$  (B= Potencial ( $\zeta$ ) Original (3) ).

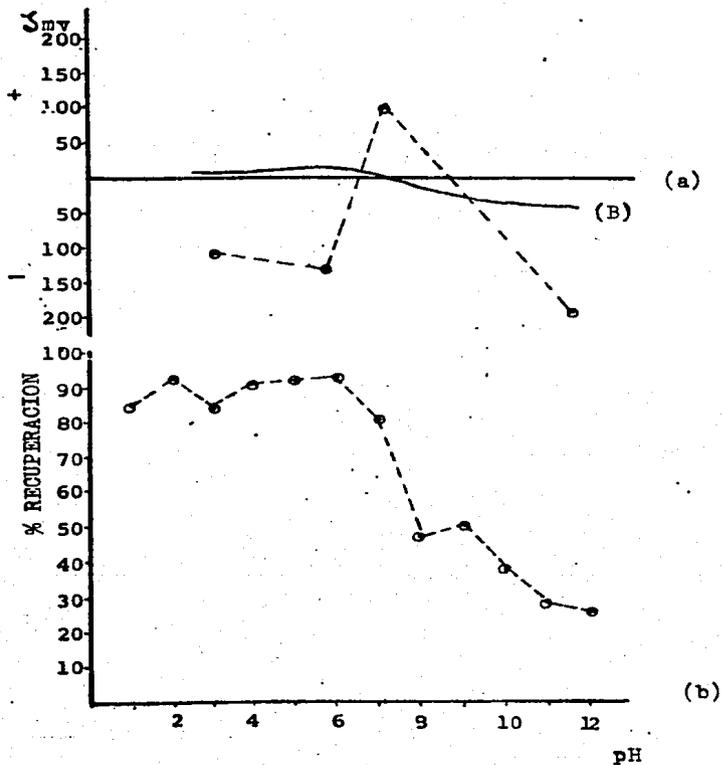


Fig. 18 Curva de Potencial (Z) a) Y Recuperación de Pirita b) En función del pH y en presencia de Ditiósfato B201  $2 \times 10^{-5}$  Molar (B= Potencial (Z) Original (3) ).

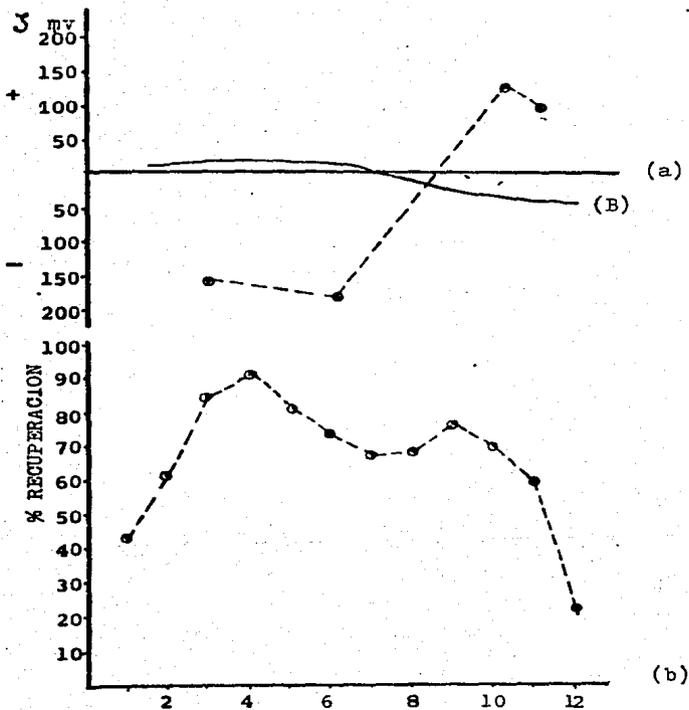


Fig. 19 Potencial (Z) a) Y flotación de pirita b) En función del pH y en presencia de ditio--fosfato  $B104 \ 2 \times 10^{-4}$  Molar (B= Potencial - (Z) Original (3) ).

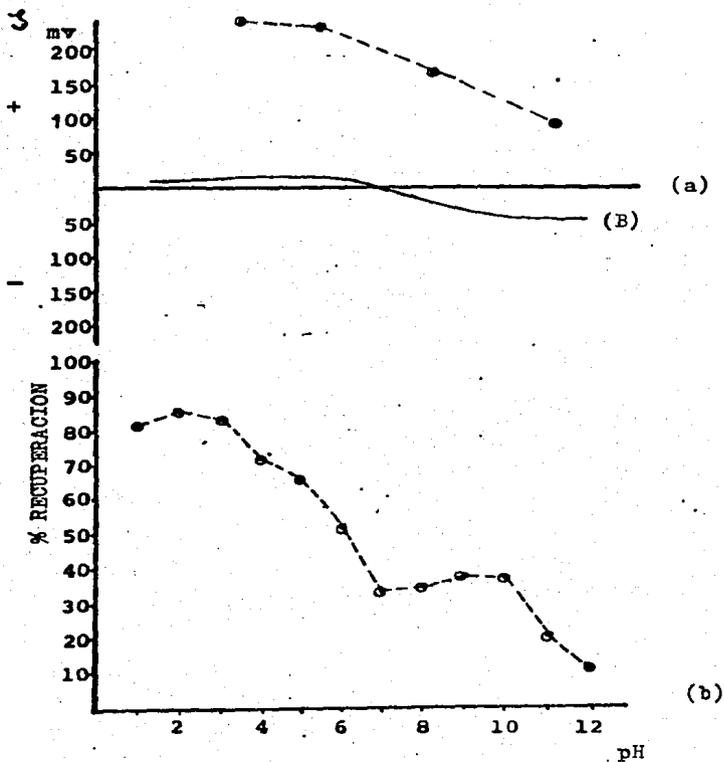


Fig. 20 Potencial (Z) Y Recuperación de Pirita b) En función del pH y en presencia de ditiofosfato XCA76  $2 \times 10^{-4}$  Molar (B= Potencial (Z) Original (3) ).

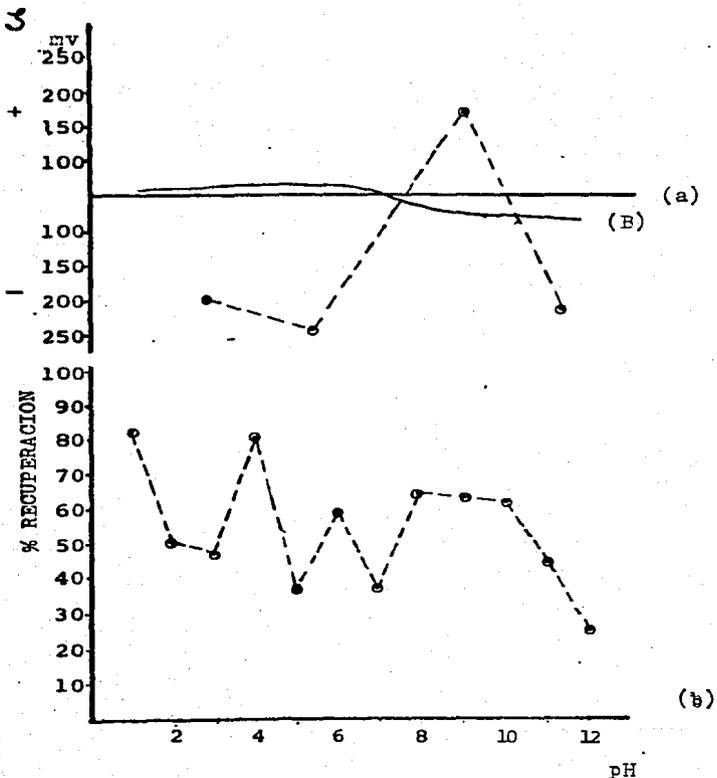


Fig. 21 Potencial (Z) a) Y Recuperación de Pirita b) En función del pH y en presencia de ditiofosfato XCA77  $2 \times 10^{-5}$  Molar. (B= Potencial (Z) Original (3) ).

#### DISCUSION DE RESULTADOS.

La concentración de iones determinantes de potencial ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}^+$ ) favorecen el signo del potencial (Z) ya que éste varía de acuerdo a la carga de iones, es decir, para ambos - minerales, el Potencial (Z) es directamente proporcional - al pH.

Analizando las gráficas se observa una forma específica de adsorción del reactivo sobre el mineral, ya que en todos - los casos el perfil original de potencial (Z) contra pH es el mismo.

En las gráficas se observan dos comportamientos particula-- res las figuras 10, 12, 13, 14, 16, 17 y 20 muestran que a medida que la concentración de cargas negativas aumentan en la solución, disminuye el signo de la potencia (Z) en - este intervalo de pH es (-) es decir, conforme a la concen-- tración de cargas negativas se incrementa el potencial (Z) disminuye.

Por otro lado, las figuras 11, 15 y 19 muestran que al au-- mentar la concentración de cargas negativas en la solución la carga superficial del mineral aumenta, es decir, se -- vuelve positiva y estará en función de dicha concentración

de cargas negativas, en otras palabras podemos decir que a medida que se incrementan las cargas negativas, el potencial (Z) aumenta.

De las figuras 18 y 21 se puede decir que presentan los dos comportamientos mencionados anteriormente ya que bajo los mismos intervalos del pH estudiados, el signo del potencial (Z) presenta drásticos cambios.

Analizando los reactivos empleados en el estudio para galeña, se observa lo siguiente: a medida que la concentración de  $\text{OH}^-$  aumenta, el valor de potencial (Z) se vuelve negativo y la recuperación disminuye, a pH ácidos se observa un comportamiento similar, sin embargo en el rango de pH de 3-9 aproximadamente se obtienen recuperaciones mas altas, especialmente cuando se manifiesta una disminución en el potencial (Z) partiendo de valores positivos.

Por ejemplo, la fig. 10 en un rango de pH de 1-3 donde el potencial (Z) tiene un valor muy positivo con respecto al potencial (Z) original, se aprecian valores bajos de recuperación, conforme el pH se incrementa el potencial (Z) inicia una disminución reflejándose en un aumento en la recuperación hasta aproximadamente un pH de 9, a disminuciones excesivas de potencial (Z) provocadas por altos valo--

res de pH generan una disminución en la recuperación del mineral. El Xantato de cadena corta (XINA) y los ditiofosfatos, muestran también este efecto.

En la figura 15, se aprecia lo siguiente: bajo valores de recuperación en un intervalo de pH de 1-3, presentando un potencial (Z) positivo el cual se ve contrarrestado por la concentración de cargas negativas hasta un pH de 6, a partir del cual se incrementan las cargas negativas, favorece el signo del potencial y a partir del cual se repiten las condiciones anteriores.

Para el sistema pirita se observa en todas las gráficas - que a pH ácidos, las recuperaciones de pirita son altas a medida que se incrementa la concentración de iones  $\text{OH}^-$  la recuperación se ve desfavorecida.

Siendo la pirita un sulfuro aunque estrictamente hablando no es igual que la galena, su comportamiento electrocinético es parecido, considerando que a pH alcalino el potencial (Z) se vuelve mas negativo.

Las variaciones con respecto al potencial (Z) original son mas marcadas, para este sistema, reflejándose en las variaciones recuperación para cada uno de los reactivos.

La figura 19 muestra que a pH ácido, el potencial (Z) es negativo conforme aumenta la concentración de  $\text{OH}^-$  la carga de potencial (Z) se va contrarrestando hasta un pH de 10, donde el efecto se ve favorecido, a partir del cual inicia la disminución de potencial, donde se aprecia una disminución mas marcada en la recuperación.

La figura 18 y 21 presentan cambios drásticos al mismo tiempo, en los mismos intervalos estudiados, el signo del potencial (Z), se modifica dos veces de negativo a positivo y nuevamente a negativo, es muy probable que para este sistema la baja recuperación se deba a la destrucción del agente colector o a la formación de un agente hidrofílico, para ambos casos.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

Todo lo descrito anteriormente guarda una relación especial para las condiciones óptimas para recuperación de estos minerales por lo que el estudio de potencial (Z) se ve reflejado directamente sobre valores de recuperación para las mismas condiciones de operación.

Los resultados muestran que la recuperación de galena a pH muestran que la recuperación de galena a pH muy alcalino es bajo, es muy probable que bajo estas condiciones de pH exista la formación de algún agente hidrofílico que favorece la depresión de la galena.

La naturaleza de estos cambios puede ser atribuido a la formación de algún agente hidrofílico ajenos al sistema que puede favorecer o desfavorecer las recuperaciones como efecto metalúrgico neto.

La formación de estos agentes puede ser una teoría, la cual puede ser objeto de futuros estudios, ya que en el presente trabajo no se planteó como objetivo.

Los ditiofosfatos son colectores menos fuertes que los xantatos, pero mas selectivos. ayudando grandemente a la recuperación de valcres, es decir, con los ditiofosfatos se obtienen bajas recuperaciones pero mas limpias, mientras que los xantatos se obtienen altas recuperaciones pero mas sucias.

En el sistema pirita los xantatos presentan un poder colector mas fuerte que los ditiofosfatos, lo cual se ve reflejado en las gráficas, es decir, presentan mayores recuperaciones que éstos últimos.

Como se sabe generalmente la pirita se encuentra impurosa en los sulfuros minerales en este caso particular, la galena, por lo que podemos suponer que al efectuar la flotación de galena con Xantatos, se espera que esté acompañado de grandes cantidades de pirita como impureza.

Por lo tanto, podemos esperar que con los ditiofosfatos se obtengan concentrados mas limpios.

## CAPITULO VII

### RECOMENDACIONES

A pesar de que se obtuvo un buen funcionamiento con aire - es mas recomendable el uso de gas nitrógeno.

El empleo de uno o dos reactivos es el adecuado ya que esto permitiría variar mas las concentraciones y los tiempos de acondicionamiento, lo cual serviría en un momento dado para conocer mas sobre el comportamiento de los reactivos y así poderlos aplicar a nivel industrial.

La obtención de mas puntos de potencial Z en todo el rango de pH, sería lo adecuado ya que se tendría una mayor información sobre el comportamiento de la carga superficial.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) Kruyt M.P. ed Collid Science Vol. I  
Irreversible Systems New York El Sevier (1952) p. 198
- 2) Gaudin A.M. 1976 Flotation A.M. Gaudin  
Memorial Volume Vol. I American Institute  
of Mining Metallurgical and Petroleum  
Engineers, Inc. New York.
- 3) Moris, Okamoto, H. Hara T y ASO K  
An Improved Method of Determining the Zeta  
Potencial of Mineral Particles by Microelectrophoresis.  
Fine Particles Processing. P. Sumasunderan pp. 632 USA  
(1980).
- 4) Glembotzkii, V.A. Klanssen, V.I. and Paskin, I.N. 1972  
Flotation, Primary Sources, New York Pag. 96 - 98.
- 5) J.M.W. Mackenzie, M.E. (otago) Ph D (NSW).  
University of New South Wales, Australia  
Zeta-Potencial Studies in Mineral Processing  
Measurement, Techniques, and Applications.  
Vol. 3 July (1970) pag. 25 - 26.

- 6) Bruyn P.L. y Agar G.E. "Surface Chemistry of Flotation"  
Frothflotation 50 Aniversary, D.W. Fuerstenau, pp. 91  
USA 1926
- 7) Yañez Albarrán Artemio, Medición de potencial Zeta en -  
Minerales (1984).  
Tesis Profesional I.P.N. México.
- 8) Shaw DJ Introducción a la Química de superficies y co-  
loides,  
E.D. Alhambra España 1974.
- 9) Spiegel M.D. Teoría y problemas de probabilidad y esta-  
dística ED MC, Graw - Hill México 1977.

APENDICE # 1

En seguida se describen los cuadros de Resultados de Potencial (Z).

DESCRIPCION DE TABLAS

$V_o$  = Velocidad observada en  $\mu\text{m}/\text{seg}$ .

E = Potencial aplicado entre electrodos en Volts.

$V_p$  = Velocidad electroforética en  $\mu\text{m}/\text{seg}$ .

$\zeta$  = Potencial (ZETA) en milivolts (mv)

Profundidad de la celda en micras ( $\mu\text{m}$ )

El origen de las coordenadas están localizadas en el centro de la celda, por lo que hacia arriba del centro se tendrá valor positivo de la distancia de la celda y viceversa.

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E	$V_p$	$\zeta$	pH
						Volts	$\mu\text{m}/\text{seg}$	mv	
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
Vo.	46.51	63.41	93.22	64.51	33.43	250	92.27	177.57	3
$\frac{\mu\text{m}}{\text{seg.}}$	33.42	37.67	83.87	61.22	43.32	250	68.15	147.09	4.03
	54.79	62.50	67.69	44.28	24.23	250	62.26	134.38	6.2
	40.81	64.51	66.66	61.79	51.28	300	67.69	-128.72	7.8

Fig. 22 Tabla de resultados para Galena en presencia de XINa

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E Volts	$V_p$ $\mu\text{m}/\text{seg}$	S mv	pH
	317	159	0	-157	-315				
	44.24	55.55	64.51	46.05	17.66	250	60.83	-131.29	3.28
Vo.	28.16	60.60	65.57	50.35	27.70	250	65.09	140.49	6
$\frac{\mu\text{m}}{\text{seg.}}$	21.73	31.05	46.51	39.06	16.47	250	43.35	93.56	9
	17.39	26.31	46.51	35.46	18.34	250	40.68	87.80	11.8

Fig. 23. Tabla de resultados para Galena en presencia de XAP.

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E	Vp	S	pH
						Volts	$\mu\text{m}/\text{seg}$	mv	
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
Vo. $\frac{\mu\text{m}}{\text{seg}}$	28.57	40.36	103.89	37.34	32.26	250	71.88	155.15	4.39
	20.40	21.44	50.28	26.21	16.13	300	35.32	63.53	6.85
	30.65	43.72	69.23	47.39	29.03	350	25.79	39.76	7.77
	16.16	24.22	31.12	24.56	17.58	200	28.95	-78.10	11.68

Fig. 24. Tabla de resultados de Galena en presencia de Ditiófosfato B 104.

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E	Vp	S	pH
						Volts	Am/seg.	uv	
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
	35.78	46.51	71.43	38.70	26.31	300	58.75	-105.67	2.1
Vo.	40.49	52.29	103.89	78.65	53.69	300	87.26	-156.85	8.0
$\frac{\mu\text{m}}{\text{seg.}}$	21.74	68.38	117.65	84.90	67.67	300	102.06	-183.57	10.7

Fig. 25. Tabla de resultados de Galena en presencia de Ditiofosfato B 201.

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E	Vp	$\xi$	pH
						Volts	$\mu\text{m}/\text{seg}$	mv	
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
Vo. $\frac{\mu\text{m.}}{\text{seg}}$	32.61	41.66	79.55	47.49	37.43	250	63.20	136.41	6.8
	51.61	67.23	99.00	72.92	54.05	300	87.08	-156.62	7.8
	45.45	53.33	75.75	66.66	37.80	200	70.79	-190.99	11.42

Fig. 26. Tabla de resultados de Galena en presencia de Ditiofosfato XCA 76

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E	Vp	S	pH
						Volts	$\mu\text{m}/\text{seg}$	mv	
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
Vo. $\frac{\mu\text{m}}{\text{seg.}}$	14.29	23.25	54.40	50.60	35.84	200	47.45	-128.02	2.24
	40.40	50.63	58.82	47.06	39.60	290	60.30	162.68	6.20
	34.48	41.17	55.55	44.19	40.54	200	49.82	134.42	8.00
	35.29	40.00	50.00	25.00	20.83	250	41.74	90.02	10.55

Fig. 27. Tabla de resultados de Galena en presencia de Ditiófosfato XCA 77

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E	$V_p$	$\xi$	pH
						Volts	$\mu\text{m}/\text{seg}$	mv	
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
Vo. $\frac{\mu\text{m}}{\text{seg}}$	30.30	35.03	60.60	51.81	27.77	200	54.24	146.33	3.76
	34.48	44.44	62.89	50.00	30.43	200	57.36	154.75	6.10
	29.41	33.25	53.06	48.61	35.21	200	48.31	130.34	7.87

Fig. 28 Tabla de resultados de Pirita en presencia de XINA.

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E	$V_p$	$\delta$	pH
						Volts	$\mu\text{m}/\text{seg}$	mv	
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
$V_o.$	24.56	29.76	49.08	42.16	28.07	200	43.99	-118.69	3.13
$\frac{\mu\text{m}}{\text{seg}}$	31.49	36.81	55.17	48.61	35.53	200	50.35	-135.84	5.87
	25.28	27.68	45.66	37.82	30.72	200	39.84	107.48	7.13
	42.55	53.19	84.21	65.04	56.60	200	72.95	-196.82	11.54

Fig. 30. Tabla de resultados de Pirita en presencia de Ditiófosfato B 201.

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E	$V_p$	$\xi$	pH
						Volts	$\mu\text{m}/\text{seg}$	mv.	
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
Vo. $\mu\text{m}$ seg	27.77	32.25	47.12	37.24	30.30	200	41.73	-112.58	7.85
	34.48	40.40	50.50	33.61	32.25	200	44.18	-119.19	8.80
	31.13	36.30	57.47	41.86	34.18	200	64.23	-173.29	11.37

Fig. 29. Tabla de resultados de Pirita en presencia de XAP.

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E Volts	Vp $\mu\text{m}/\text{seg}$	S mv	pH
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
Vo.	40.23	43.00	65.79	51.47	34.18	200	57.96	-156.38	3.05
$\frac{\mu\text{m}}{\text{seg}}$	31.25	35.97	80.80	52.63	39.73	200	63.55	-171.45	6.17
	39.32	47.10	53.92	39.21	31.25	200	49.73	134.17	10.32
	20.83	22.22	41.66	38.88	25.38	200	37.20	100.36	11.15

Fig. 31. Tabla de resultados de Pirita en presencia de Ditiófosfato B 104

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{g}$ )					E	$V_p$	$\delta$	pH
						Volts	$\mu\text{m}/\text{seg}$	mV	
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
$V_o.$ $\frac{\mu\text{m}}{\text{seg}}$	45.45	71.42	105.26	60.60	27.13	200	90.15	243.22	3.65
	63.16	76.92	98.77	66.66	39.04	200	88.40	238.50	5.56
	51.28	55.94	66.66	48.95	39.30	200	60.56	163.22	8.35
	23.81	26.32	30.30	22.22	19.26	150	27.66	99.50	11.22

Fig. 32. Tabla de resultados de Pirita en presencia de Ditiofosfato XCA 76.

	PROFUNDIDAD ( $\mu\text{m}$ )					E	$V_p$	$\Sigma$	pH
						Volts.	$\mu\text{m}/\text{seg}$	mv	
	317	159	0	-157	-315	-	-	-	-
$\frac{V_o.}{\mu\text{m}/\text{seg.}}$	40.00	60.86	76.92	66.66	50.42	200	73.34	-197.87	2.80
	45.45	70.17	97.74	70.79	32.87	200	89.09	-240.36	5.40
	43.48	57.47	70.76	48.91	38.88	200	63.77	172.05	9.00
	62.50	78.74	111.1	85.71	64.10	250	99.49	-214.74	11.30

Fig. 33. Tabla de resultados de Pirita en presencia de Ditiófosfato XCA 77.