

# EXPERIENCIAS A NIVEL LABORATORIO Y PILOTO SOBRE FLOTACIÓN DE SULFUROS CON AGUA DE MAR EN EL PERÚ

Categoría Investigación y Tecnología Minera.

Ing. María Luisa Pecho Ancasi, gerente general [info@laboratoriometalurgico.com](mailto:info@laboratoriometalurgico.com) celular: 975443283; Ing. Héctor Bueno Bullón, gerente metalúrgico [hb@laboratoriometalurgico.com](mailto:hb@laboratoriometalurgico.com) celular: 986703880 ; Ing. Jaime Gómez Moreno, jefe de laboratorio metalúrgico [jgomez@laboratoriometalurgico.com](mailto:jgomez@laboratoriometalurgico.com) celular: 975443273 , en Laboratorio Metalúrgico Chapi.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación aplicada tiene como fin dar a conocer los hallazgos experimentales obtenidos, a niveles de laboratorio y de Planta Piloto, sobre el comportamiento de los sulfuros comunes en la flotación con agua de mar

En el caso 1, se estudió el mineral polimetálico de Cerro Lindo ubicado en Chavín – Ica. El análisis mineralógico identificó principalmente pirita, blenda, calcopirita y galena. Los análisis químicos reportaron leyes de 0.55 %Cu, 0.62 %Pb, 5.54 %Zn y 19.8 %Fe. Las pruebas de flotación rougher a K80 200 µm, se realizaron en una máquina de flotación Denver D-12 para evaluar los fenómenos de activación y/o depresión de los sulfuros comunes. Los resultados indican que la flotación diferencial con agua dulce y agua desalinizada es satisfactoria, mientras que con agua de mar la calcopirita flota ligeramente mejor que con agua dulce, la galena se deprime, mientras que, la blenda y la pirita se activan en el

circuito de flotación de plomo deteriorando drásticamente la ley y la recuperación.

En el caso 2, del mineral monometálico de cobre, procedente de Mina Justa ubicada en Marcona - Ica. El análisis mineralógico indicó que los principales constituyentes son silicatos, magnetita, pirita, calcopirita, bornita, covelina y calcosina.

El análisis químico reportó 1.0 %Cu, complementado mediante análisis secuencial de cobre. Las pruebas de flotación se realizaron K80 175 µm, utilizando agua dulce y agua de mar. Se utilizó una máquina de flotación Denver D-12, realizando pruebas de flotación batch y cíclicas para la evaluación del efecto de la carga circulante, y de pilotaje, permitiendo predecir el comportamiento del mineral en una planta industrial procesado con agua de mar. Los resultados obtenidos indican que, a nivel Laboratorio y Piloto es posible obtener concentrados de ley comercial de 30 a 40 %Cu, y recuperaciones alrededor de 75% a 90

## I. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de agua ha llevado a las empresas a buscar suministros alternativos y no tradicionales, y a ser más eficientes en su uso. La desalinización de agua de mar, el uso de agua de mar no tratada y la reutilización de aguas residuales industriales, son algunas de las soluciones adoptadas por los diferentes proyectos mineros para ser utilizadas en la etapa de concentración de minerales por flotación [1].

Este trabajo tiene por objetivo principal exponer los hallazgos técnicos determinados a escala de laboratorio y planta piloto como interacciones del agua de mar sobre la flotabilidad de los sulfuros comunes galena, blenda, calcopirita y pirita manifestando activación y desplazamiento, como deficiencias de flotabilidad, determinantes sobre la ley y recuperación en los concentrados respectivos.

En los yacimientos cercanos a la costa se puede emplear como solución el uso de agua de mar, tal como lo aplican en la empresa minera Cerro Lindo, Shouxín y Marcobre. En cuanto a los problemas de funcionamiento y corrosión de equipos, se adhieren problemas metalúrgicos; dentro de los cuales afecta de forma especial el proceso de Flotación. La literatura al respecto es muy escasa, pero eficiente, obteniendo como resultado el trabajo de investigadores de la Universidad de Concepción de Chile, descrito

por Castro y Álvarez (2017) [2] definen que la flotación de Calcocita y Calcopirita en Agua de Mar, merece destacarse.

Por otra parte, las publicaciones de Castro y Laskowsky (2013) [3], Parraguez y Bernal [4] y Gaete (2014) [5] aportan antecedentes valiosos sobre la factibilidad de llevar a cabo la flotación con agua de mar.

En el proceso de flotación, la calidad del agua en que se dispersan y transportan las partículas minerales juega un papel determinante en el acondicionamiento e Hidrofobización selectiva de las especies mineralógicas de interés. El agua de mar contiene altas concentraciones de iones inorgánicos tales como los aniones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), bromuro ( $\text{Br}^-$ ), borato ( $\text{BO}_3^{3-}$ ), fluoruro ( $\text{F}^-$ ) y los cationes de metales alcalinos y alcalinotérreos como sodio ( $\text{Na}^+$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), estroncio ( $\text{Sr}^{2+}$ ). Estas especies, de calcio y magnesio, al precipitar con la cal adicionada para regular el pH, pueden actuar como depresores de minerales específicos, como es el caso del sulfato y el calcio, que precipitan en forma de yeso disminuyendo la flotabilidad de la galena y de la esfalerita, en ausencia de iones cobre  $\text{Cu}^{++}$  [6]. La presencia de iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) se debe al proceso de oxidación natural del azufre, contenido en los sulfuros, por acción del oxígeno del aire contacto con la pulpa a lo largo de las etapas de molienda,

acondicionamiento y flotación. Bajo condiciones alcalinas, el sulfuro de los minerales ( $S^{2-}$ ) se oxida a sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), la especie estable más oxidada, pasando por poli sulfuro ( $S_n^{2-}$ ), tiosulfato ( $S_2O_3^{2-}$ ) y sulfito ( $SO_3^{2-}$ ) [6]. El agua de mar también mantiene estas características, aunque en concentraciones muy bajas, de materia orgánica (aceites y grasas, detergentes, hidrocarburos, etc.) muchas de ellas con características tenso activas, las cuales, debido al fenómeno fisicoquímico de adsorción, se concentran principalmente en la interfaz líquido-gas que al combinarse con aire forma burbujas estables, fenómeno que intervendría en la generación de espuma natural al realizar la flotación de sólidos en agua de mar. Así mismo, investigaciones recientes concluyen que el agua de mar tiene influencia sobre la reducción del tamaño de burbuja [3].

Pruebas Cíclicas. - Se desarrollan con información de las pruebas Batch con el propósito de evaluación, entre otros, el efecto de las cargas circulantes sobre la ley y recuperación en el concentrado final. El peso de muestra por prueba es aproximadamente de 6 kg. La información colectada define los criterios de diseño.

Con el objeto de aproximarse a una simulación o reproducción de resultados metalúrgicos de un circuito industrial de

## II. CONCEPTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. Niveles Experimentales de Flotación

Pruebas Batch. - Son pruebas experimentales abiertas, cuyo objetivo es determinar las variables del proceso, concluyendo con pruebas Rougher- cleaner. El peso de muestra por prueba es generalmente de 1000 gramos.

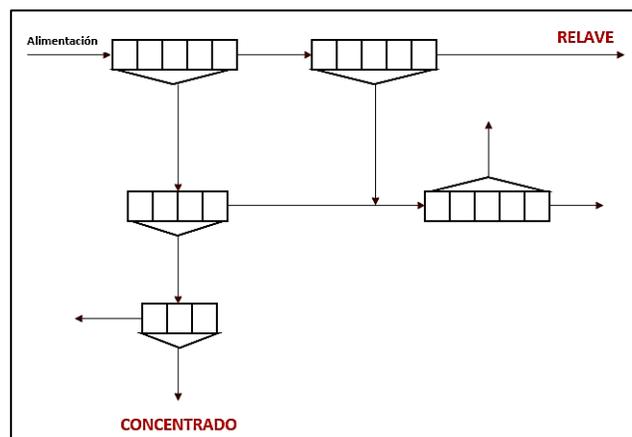


Figura 1.- Esquema de prueba de flotación Batch

flotación, normalmente se realizan una serie de pruebas de flotación a pequeña escala.

Estas pruebas son comúnmente conocidas como pruebas de ciclo. Estas incluyen una etapa Rougher, con o sin Scavenger, y dos o tres etapas cleaner, con o sin remolienda del concentrado Rougher y recirculación de las colas de limpieza a las etapas precedentes respectivamente.

Esta tediosa operación, es de utilidad solamente si se logra una condición de

régimen estable, en términos de masa y ley de concentrado final, tras repetir el ciclo numerosas veces, generalmente después de cinco o seis ciclos. Una vez terminado esto, deben hacerse los cálculos correspondientes considerando una serie de masas y leyes intermedias, existiendo varios métodos de cálculo, los que incluyen la posibilidad de simplificar la prueba con el método de los Split Factors.

Si se considera que, entre prueba y prueba, se debe asegurar la homogeneidad de la pulpa del mineral; existen diferencias inevitables en la “mano” del operador al remover la espuma, y a veces en el cambio del operador. Se concluye que una prueba de flotación en un arreglo continuo trae consigo excelentes ventajas en reproducibilidad, tiempo y economía.

Actualmente, se dispone de la tecnología para operar en forma continua y estable, las Celdas de Flotación de Laboratorio organizadas en circuitos flexibles, pudiendo armar diferentes diagramas de flujo. Este equipamiento, permite evaluar el proceso en continuo a escala de laboratorio, con una

cantidad de muestra similar a la empleada en las pruebas de ciclo, pero permitiendo obtener resultados más rápidos y metalúrgicamente más confiables. Además, es posible observar otras características del proceso antes de realizar una prueba piloto, como la estabilidad de la espuma a régimen, el efecto de la calidad del agua de proceso, etc. Por lo tanto, se conjuga una mayor confiabilidad técnica, economía de tiempo, y facilidad para evaluar diferentes diagramas de flujo en caso de nuevos proyectos.

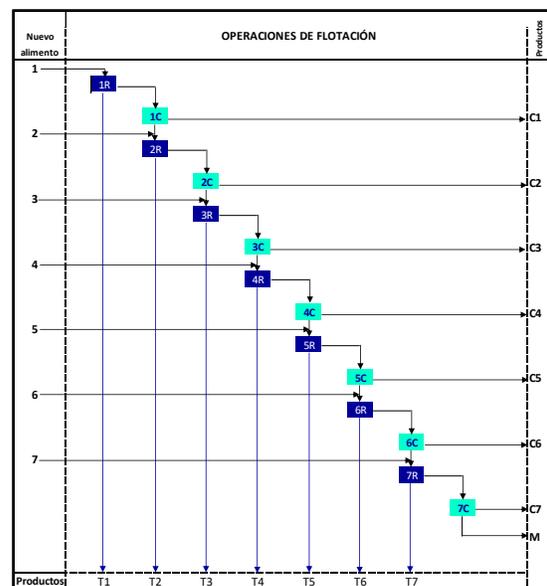


Figura 3.- Esquema representativo del alimento y productos de flotación cíclica.

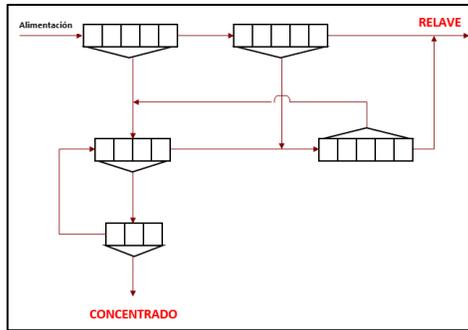
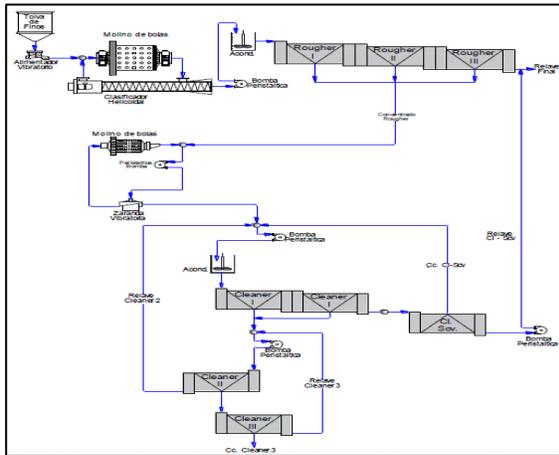


Figura 2.- Esquema de prueba de flotación cíclica

**Pruebas Piloto.** – Luego de obtener resultados favorables de las pruebas de flotación Batch y cíclica se realiza el estudio del comportamiento y simulación de una planta piloto de flotación utilizando mineral representativo del yacimiento. El objetivo del estudio es predecir el comportamiento del mineral en una planta de tamaño industrial. La cantidad de mineral necesario para el pilotaje varía de 0.5 a 50 toneladas.



esta problemática que presenta el agua de mar para su aplicación en la Industria Minera [8].

- Baja calidad metalúrgica.
- Alta corrosión en equipos.

Figura 4.- Esquema de la Planta Piloto, capacidad tratamiento 4.8 TMD-

## 2.2. Características del Agua Dulce y de Mar

**Agua dulce.** - Es la que dentro de su composición tiene el mínimo de sales minerales disueltas, especialmente de cloruro de sodio.

El agua dulce proviene de fuentes como ríos, lagos, cascadas, manantiales y lagunas; así como en su forma sólida en casquetes polares, glaciares y masas de hielo.

Por el otro lado, el **Agua salada** es una solución basada en una composición de altas cantidades de sales minerales (35%), los cuales aportan su sabor característico (salado). Estos minerales refieren principalmente al cloruro de sodio.

Tabla 1.- Abundancia relativa de los iones comunes por tipo de agua [7].

Elemento	Unidades	Agua dulce	Agua de mar desalinizada	Agua de mar
Ca <sup>+2</sup>	mg/l	15	6	410
Mg <sup>+2</sup>	mg/l	4	37	1300
Na <sup>+</sup>	mg/l	6	455	10810
K <sup>+</sup>	mg/l	2	11	390
Cl <sup>-</sup>	mg/l	8	300	19440
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg/l	122	41	2710

- Alto poder incrustante en cañerías.

## 2.4. Avances logrados sobre flotación de minerales en Agua de Mar [8].

- Los minerales de Cu calcopiríticos presentan buena recuperación

Rougher en Agua de Mar en un amplio rango de pH 8-11.

- Los minerales Calcocíticos presentan una satisfactoria recuperación de Cu Rougher alrededor de pH 9.5-10,
- Las pulpas preparadas con Agua de Mar consumen grandes cantidades de cal para llegar a los pH's de la tecnología convencional en Agua Dulce (entre 5 y 10 veces dependiendo del pH), lo cual se explica por efecto Buffer del Agua de Mar y a las reacciones de precipitación de hidróxidos que consumen iones OH<sup>-</sup>.
- Bajo condiciones de alto consumo de cal en Agua de Mar se deprimen fuertemente el Mo y el Au.
- La espumación en Agua de Mar y su dependencia del pH es muy diferente a lo que ocurre con agua dulce.
- Los Espumantes poliglicólicos (D-250 o D-1012) no son tan buenos espumantes en Agua de Mar como en Agua Dulce.
- El Aceite de Pino resulta un buen espumante para Agua de Mar, y se puede combinar bien con MIBC.
- Se demostró que la salinidad (concentración de NaCl) no constituye un problema para la

flotación y por lo tanto la desalación por Osmosis Inversa es una exageración desde el punto de vista exclusivo de la flotación.

- Tomando en consideración el consumo de Cal y la recuperación de Sub-productos Mo y Au se recomienda flotar el circuito Rougher entre pH 8 y 9.5.
- Se dilucidó el efecto depresor del Agua de Mar sobre la recuperación de Mo lo cual se atribuye a la adsorción de la especie Hidroxilada Mg(OH)<sup>+</sup> y la Subsecuente precipitación de Hidróxido de Mg Mg(OH)<sub>2</sub> que ocurren entre pH 9-10.

## **2.5. Depresión de la Pirita en la tecnología de flotación con Agua de Mar**

Respecto a los problemas que aún requieren mayor investigación se destaca la necesidad de desarrollar una nueva tecnología capaz de depresar pirita a pH <9.0 es decir, evitando la formación en el seno del Agua de Mar de Mg(OH)<sup>+</sup> y Mg(OH)<sub>2</sub>(s) y sobre la superficie de Molibdenita, ambos fenómenos inducidos por la adición de Cal. Esto es especialmente válido para minerales de Cobre altos en pirita (3-6%). En primer lugar, se propone investigar los mecanismos de acción del depresante de pirita conocido como Metabisulfito de Sodio (MBS) (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) el cual actúa mejor en Agua de Mar que en

Agua Dulce. En Agua Dulce se aplica en minerales polimetálicos, como reactivos que evitan la activación de pirita (esfalerita y pirrotita) con iones Cúpricos, pero no como depresante para pirita No-activada.

El reemplazo parcial de Cal produciría un ahorro directo considerable. De la misma forma la mejor depresión de pirita produciría una menor dilución del concentrado final (mejor ley de Cu) generando ahorros considerables por transporte, y posterior Fusión de concentrados. Otros beneficios directos son la mejor recuperación de Molibdenita al flotar a pH más bajos y potenciales mejoras en las recuperaciones de Oro; ambos Sub-productos normalmente afectados por la Cal y que mejoran su recuperación mientras más bajo sea el pH [8].

### III. APLICACIÓN TÉCNICA EXPERIMENTAL EXPERIENCIAS A NIVEL LABORATORIO Y PILOTO SOBRE FLOTACIÓN DE SULFUROS CON AGUA DE MAR EN EL PERÚ

#### 3.1. Objetivo

Este trabajo tiene por objetivo principal exponer los hallazgos técnicos determinados a escala de laboratorio y planta piloto como interacciones del agua de mar sobre la flotabilidad de los sulfuros comunes galena, blenda, calcopirita y pirita manifestando

activación y desplazamiento, como deficiencias de flotabilidad, determinantes sobre la ley y recuperación en los concentrados respectivos.

#### 3.2. Antecedentes y Justificación

##### 3.2.1 Flotación de Calcopirita, Molibdenita y Pirita

Los resultados de pruebas de flotación comparativas realizadas en agua dulce y en agua de mar para una misma muestra de mineral y en condiciones similares de flotación, se muestran en las Figuras siguientes, las cuales indican que la recuperación de molibdenita es sensible al pH. Una fuerte depresión de molibdenita sucede a un pH superior a pH 9,5 y se demostró que es ocasionada por la precipitación de hidróxido de magnesio coloidal (Castro et al., 2012c) [9].

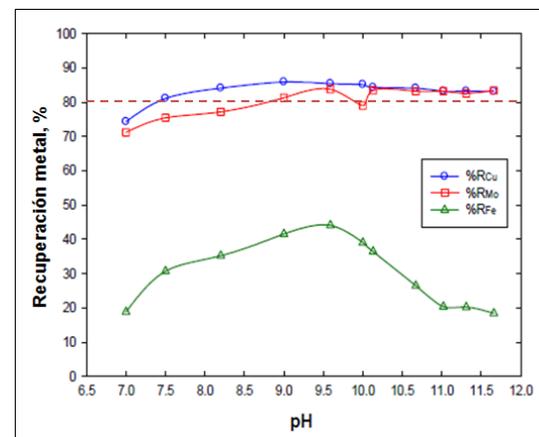


Figura 5.- Recuperación flotación Rougher en Agua Dulce

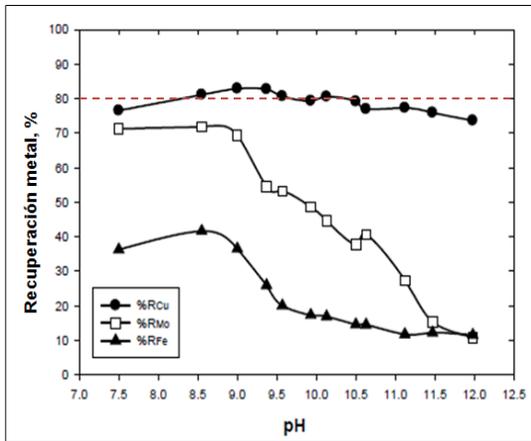


Figura 6.- Recuperación flotación Rougher en Agua de Mar.

### 3.2.2. Flotación de Sulfuros de cobre a nivel de planta

En 1930, en Chile pequeñas plantas como Tocopilla, flotaron mineral de calcopirita en agua de mar.

En 1975, se informó de las pruebas de Planta piloto para la flotación de un mineral de sulfuro de cobre, de la mina Andacollo, en agua de mar. Se encontró que, debido a las propiedades de formación de espuma en el agua de mar a pH 9,5, el circuito Rougher funciona bien incluso sin espumante [3].

En Perú, en el año 2007 se dio inicio a las operaciones de la planta concentradora de la

Unidad Minera Cerro Lindo, tratando 5000 TMPD de mineral polimetálico de cobre, plomo y zinc; utilizando Agua de Mar Desalinizada.

A su vez, a fines del año 2017 se inició operaciones en la Planta concentradora de relaves Shouxin, con capacidad de tratamiento de 20000 TMPD obteniendo concentrados de cobre, zinc y de hierro

Finalmente, en el año 2021 la planta concentradora de operaciones de la empresa minera Marcobre, ubicado en la ciudad de Ica, inició sus operaciones utilizando agua de mar, procesando actualmente 20000 toneladas de mineral de cobre por día.

Tabla 2.- Operaciones mineras con uso de agua de mar [10].

Proyecto	Compañía	País	Recurso de agua
Batu Hijau	Newmont	Indonesia	Agua de mar y agua dulce
Las Luces	Mínera Las Cenizas	Chile	Agua de mar
Michilla	Antofagasta	Chile	Agua de mar
KCGM	Barrick/Newmont	Australia	Agua hipersalina
Mt Keith	BHP Billiton	Australia	Agua hipersalina
Raglan	Xstrata	Canada	Agua salina
Texada	closed	Canada	Agua de mar
Tocopilla	closed	Chile	Agua de mar
Esperanza	Antofagasta	Chile	Agua de mar

### 3.2.3. Justificación

La flotación de minerales sulfurados en agua de mar es un proceso relativamente nuevo, especialmente en el caso de aplicación para la flotación de galena y blenda. El incremento de la escasez de agua dulce en la zona litoral de nuestro país, ha llevado a evaluar otras formas de suministro de agua a

las operaciones mineras. En la actualidad una alternativa con proyección es el uso de agua de mar (salada y desalinizada) para el tratamiento de minerales de cobre y también polimetálicos de cobre, plomo y zinc.

**Tabla 4.- Abundancia mineralógica**

Especie mineralógica	Gravedad específica	Peso %
Calcopirita	4.2	1.6
Blenda	4	8.2
Galena	7.5	0.8
Pirita	5	42.6
Baritina	4.5	26.3
Gangas	2.7	20.5

#### 4.1.1.4 Análisis Textural y Grado de Liberación

**Tabla 5.- Grado de Liberación a molienda 45% malla -200**

malla	% peso	cp	ef	gn	py	GGs
+m50	0.00	0	0	0	0	0
+m70	0.82	80.85	90.66	10.5	99.42	99.45
+m100	6.07	83.89	97.18	55.43	99.31	99.56
+m150	20.67	77.27	96.83	100	99.6	99.8
+m200	27.58	96.12	99.38	88.14	99.55	100
+m270	24.14	89.57	98.32	94.77	99.92	99.95
+m400	20.72	98.1	99.68	98.86	100	99.84
<b>Grado de Liberación:</b>	<b>90.2</b>	<b>98.5</b>	<b>91.8</b>	<b>99.7</b>	<b>99.9</b>	

## IV. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 4.1. FLOTACIÓN NIVEL LABORATORIO CON AGUA DE MAR

#### 4.1.1 Metodología

##### 4.1.1.1 Muestra

La muestra mineral polimetálico corresponde a la Mina Cerro Lindo cuya caracterización es la siguiente:

##### 4.1.1.2 Análisis Químico

**Tabla 3.- Resultados de análisis químico.**

Elementos químicos	Zn %	Cu %	Pb %	Fe %
Muestra Zona 1	5.54	0.55	0.62	19.8
Muestra Zona 2	3.3	0.33	0.4	19.5

##### 4.1.1.3 Análisis Mineralógico

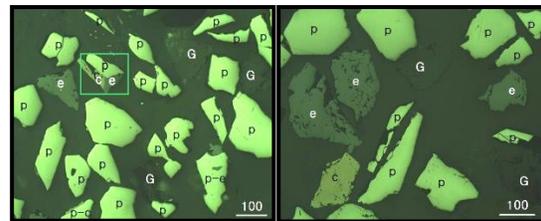


Figura 7.- Microfotografía de la fracción mayor a 212 y a 150 micrones. Se observa Calcopirita (c), esfalerita (e), pirita (p) y gangas (G) como partículas libres, indicador de buena liberación aún en fracciones gruesas.

##### 4.1.1.5 Pruebas de flotación

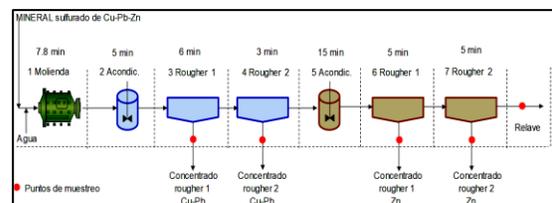


Figura 8.- Esquema para pruebas de flotación a k80 200 micrones.

**Tabla 6.- Tipos de agua utilizados para flotación del mineral polimetálico.**

CONCENTRACIÓN DE IONES POR TIPO DE AGUA, mg/l			
ELEMENTO	Agua de mar	Agua desalinizada	Agua dulce
Ca <sup>++</sup>	379	15	17
Mg <sup>++</sup>	1251	24	1
Cl <sup>-</sup>	20450	405	33
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	2844	121	24
pH	7.8	7.6	8.2
Salinidad ppm	38000	728	< 500

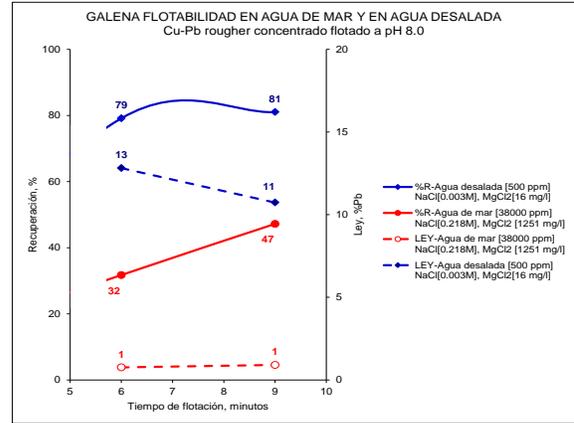


Figura 10.- Flotabilidad de la Galena en agua de mar y en agua desalada.

#### 4.1.2.5 Flotabilidad de la Blenda

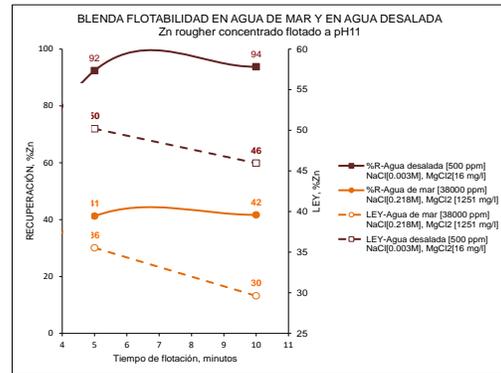


Figura 11.- Flotabilidad de la Blenda en agua de mar y en agua desalada.

### 4.1.2 Resultados

#### 4.1.2.3 Flotabilidad de la Calcopirita

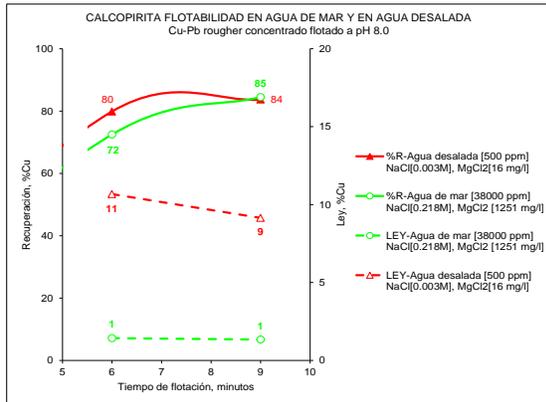


Figura 9.- Flotabilidad de la Calcopirita en agua de mar y en agua desalada.

#### 4.1.2.4 Flotabilidad de la Galena

#### 4.1.2.6 Flotabilidad de la Pirita

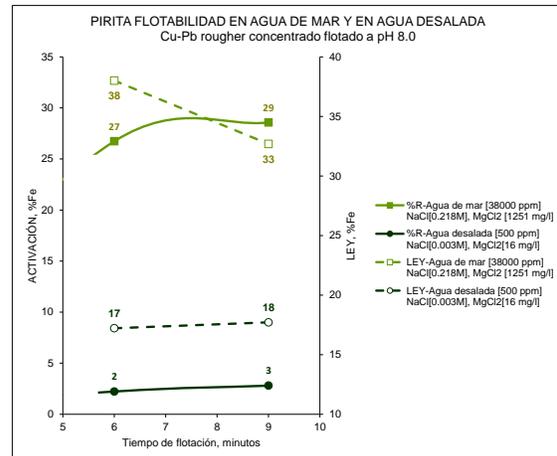


Figura 12.- Flotabilidad de la Pirita en agua de mar y en agua desalada

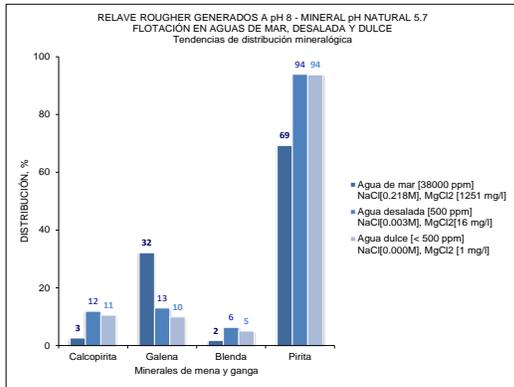


Figura 13.- Efecto del tipo de agua en el desplazamiento de especies mineralógicas al relave de flotación primaria. Condiciones de flotación en agua dulce.

## 4.2 FLOTACIÓN NIVEL PILOTO CON AGUA DE MAR

### 4.2.1 Metodología

#### 4.2.1.3 Muestra

La muestra mineral corresponde al mineral monometálico de Mina Justa cuya caracterización es la siguiente.

#### 4.2.1.4 Análisis químico

Tabla 7.- Resultados de Análisis Químico de la Muestra

Elemento	Unidad	Valor	Distribución, %
<b>Análisis Clásico</b>			
Cu	%	1	
Fe	%	24	
<b>Análisis de Cobre Secuencial</b>			
CuSS	%	0.4	37
CuCN	%	0.5	51
CuR	%	0.1	12

#### 4.2.1.5 Análisis Mineralógico

Tabla 8.- Distribución mineralógica mineral cabeza.

Mineral	(%)
Chalcopirrite	0.52
Bornite	0.49
Chalcocite	1.32
Pyrite	0.21
Rutile	0.04
Mag/Hem	32.94
Titanite	1.7
Quartz	2.79
Amphibole	7.82
Plagioclase	14.27
K-Feldspar	16.09
Biotite	2.67
Muscovite	0.09
Pyroxene	3.44
Chlorite	5.87
Garnet	0.04
Tourmaline	1.21
SiAl Clays	4.06
Zircon	0
Calcite	2.97
Dolomite	0.06
Apatite	0.79
Mixes/Unclassifiable	0.61
<b>Total</b>	<b>100</b>
<b>Ley Calculada, % Cu</b>	<b>1.04</b>

#### 4.2.1.6 Análisis Textural y Grado de Liberación

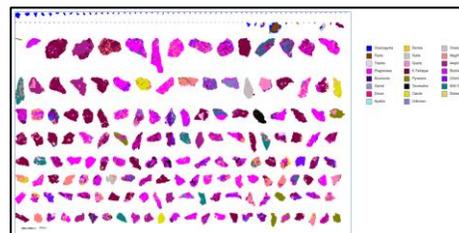


Figura 14.- Mapa de intercrecimientos mineralógicos a K80 175 micrones.

**Tabla 9.- Grado de Liberación mineralógica del cobre, K80 175 micrones.**

Mineral sulfurado	Abundancia %	Para Flotación Selectiva	
		% Liberado	% No Liberado
Capcopirita	36	73	27
Bornita	16	76	24
Calcosina	48	98	2
G.L. Total		85	

**4.2.2 Resultados**

**4.2.2.1. Arreglo de la Planta Piloto**

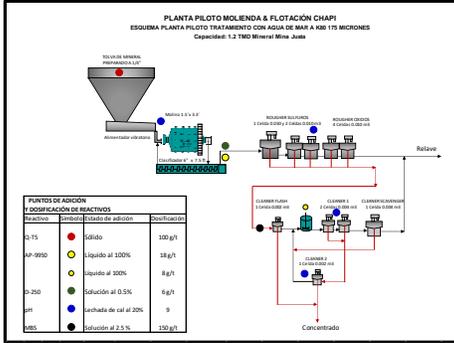


Figura 15.- Esquema de tratamiento, condiciones y dosificación de reactivos.

**4.2.2.3 Resultados comparativos**

**Laboratorio Vs Piloto**

**Tabla 10.- Balance metalúrgico Prueba Cíclica.**

PRODUCTOS CICLO CERRADO	PESO		LEYES: %			DISTRIBUCIÓN %			RADIO CONCENT
	TMD	%	Cu	Fe	Ins	Cu	Fe	Ins	
Cabeza	1.200	100	1.04	23.76	49.71	100	100	100	
Cu Concentrado	0.031	2.58	34.62	20.92	12.11	85.9	2.3	0.6	38.7
Relave	1.169	97.42	0.15	23.84	50.71	14.1	97.7	99.4	

**Tabla 11.- Balance metalúrgico Prueba Piloto.**

PRODUCTOS PILOTAJE	PESO		LEYES: %			DISTRIBUCIÓN %			RADIO CONCENT
	TMD	%	Cu	Fe	Ins	Cu	Fe	Ins	
Cabeza	1.200	100	1.04	24.57	48.01	100	100	100	
Cu Concentrado	0.028	2.31	39.62	21.93	8.47	87.9	2.1	0.4	43.3
Relave	1.172	97.69	0.128	24.64	48.94	12.1	97.9	99.6	

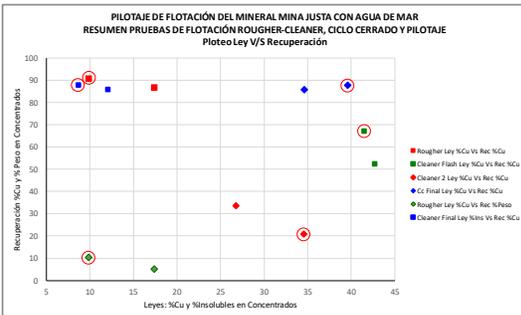


Figura 17.- Gráfico comparativo resultados Laboratorio V/S Pilotp.

**4.2.2.2. Balance metalúrgico de proceso**

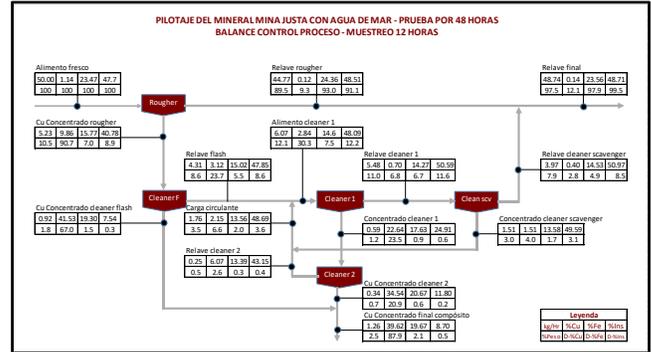


Figura 16.- Esquema balanceado de proceso.

**V. CONCLUSIONES**

De los resultados de flotación con Agua de Mar, a nivel Laboratorio y Piloto, obtenidos con las muestras de mineral de la Unidad Minera Cerro Lindo y Mina Justa se puede concluir lo siguiente:

- La muestra de mineral polimetálico estudiada se caracterizó por ensayar leyes importantes tales como 5.54 %Zn, 0.62 %Pb, 0.55 %Cu y 19.8 %Fe, contenidos en sulfuros comunes distribuidos principalmente en 8.2% de blenda, 0.8% de galena, 1.6% de calcopirita y 42.6% de pirita. El resto de la composición del mineral estuvo constituida por baritina 26.3% y otras gangas 20.5%. El estudio de microscopía mostró tratarse de un mineral con presencia de asociaciones mineralógicas simples que manifestaron grado de liberación óptimo a 200 micrones.
- La muestra de mineral mono metálico estudiada se caracterizó por ensayar una ley interesante de cobre, 1.0% y fierro 24.0%. El estudio de análisis mineralógico detectó la distribución mineralógica de 2.1% de sulfuros de cobre, 3.5% de pirita y la diferencia composicional distribuida en silicatos 78% y óxidos 16%. Del análisis secuencial de cobre se determinó que, el 12% corresponde a sulfuro primario, el 51% a sulfuro secundario, y la diferencia corresponde a cobre soluble. El grado de molienda para la flotación primaria se determinó en 175 micrones.
- No fue posible replicar leyes y recuperaciones metálicas aceptables en los concentrados Rougher, aplicando flotación diferencial en Agua de Mar, del mineral polimetálico portador de calcopirita, galena, blenda y pirita logradas en condiciones de flotación con Agua Dulce y Agua de Mar Desalinizada, pH 8.
- La fuerte depresión de la galena se atribuye a la adsorción sobre su superficie de hidróxido de magnesio y/o sulfato de calcio que se habrían generado al reaccionar los iones OH<sup>-</sup> y Ca<sup>2+</sup> adicionados, para regular el pH, con los iones Mg<sup>2+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> presentes en el agua de mar.
- La flotación diferencial del mineral polimetálico evaluado fue posible, sin deterioro de leyes ni recuperaciones que comprometan su eficiencia técnica ni económica, en aguas de proceso cuya salinidad no supere la concentración de 500 ppm (Agua Dulce y Agua de Mar Desalinizada). A partir de dicho límite de salinidad la flotabilidad de la galena se deteriora

significativamente, cada vez más en proporción al nivel de salinidad en el agua, a niveles prohibitivos. La concentración de salinidad obtenida es relativa porque dado que el indicador real en este caso—es la concentración de magnesio en el agua de proceso.

- La flotación del mineral monometálico de cobre, conteniendo tipos de cobre primario y secundario, responde bien a la flotación en Agua de Mar a pH igual o menor a 9 cuando la abundancia de pirita en el mineral es menor a 3%, condición en la cual el metabisulfito, adicionado en la etapa de limpieza, actúa como depresor adecuado de la pirita.
- Las empresas mineras cupríferas, ubicadas cerca de la zona costera peruana, deben incluir en los modelos geo metalúrgicos recuperación de cobre mediante flotación en Agua de Mar.

## **VI. AGRADECIMIENTO**

Se expresa un especial agradecimiento a la gerencia de Laboratorio Metalúrgico Chapi S.A.C. por autorizar la elaboración y publicación del presente documento en un reconocido evento técnico organizado por el Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.

**VII. REFERENCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS**

- [1]. Costabal, F. El desafío del agua en la minería. (Diapositiva). Santiago. Minería & Recursos Hídricos. 2008. 12 Diapositivas.
- [2]. Castro y Álvarez. Flotación de Calcocita y Calcopirita en Agua de Mar. Universidad de Concepción. 2017.
- [3]. Castro y Laskowski. Froth Flotation in Saline Water. Hosakawa Powder Technology Foundation KONA. 2011.
- [4]. Parraguéz y Bernal. Estudio químico para selectividad y recuperación por flotación de sulfuros utilizando agua de mar. VI Seminario Internacional de Procesamiento de Minerales. Santiago, Chile. 2009.
- [5]. Gaete, S. Uso de agua de mar en concentradora. Seminario Uso de Agua de Mar en Minería. Santiago, Chile. 2014.
- [6]. Dávila PA, Uribe SF, Nava AF, et al. Depresión de la esfalerita causada por altas concentraciones de sulfato de calcio en las aguas de flotación. 2012. (Acceso mayo 15 2014 en [www.izt.uam.mx/cime21/trabajos/PM-1.pdf](http://www.izt.uam.mx/cime21/trabajos/PM-1.pdf))
- [7]. Veki L. The use of seawater as process water in concentration plant and the effects on the flotation performance of Cu-Mo ore. [Master's thesis]. Oulussa. University of Oulu. 2013.
- [8]. AMIRA International Latin América Limitada, Chile. 2014
- [9]. Laskowski JS, Castro S, Ramos O. Effect of sea wáter main components on frothability in the flotation of Cu-Mo sulfide ore. 2013. [fecha de acceso abril 17 2014] disponible en: [yadda.icm.edu.pl/.../bwmeta1.element.baztech-4555...](http://yadda.icm.edu.pl/.../bwmeta1.element.baztech-4555...) - Traducir esta página)
- [10]. Philippe R, Dixon R, Dal Pozzo S. Seawater supply options for the mining industry. GECAMIN. [en línea]. 2005. [fecha de acceso setiembre 10 de 2014]; 8. Disponible en: [www.clean-mining.com/.../docs/11clm\\_sample.doc](http://www.clean-mining.com/.../docs/11clm_sample.doc)