

**TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA:  
MANEJO AMBIENTAL DE LODOS DE ALTA DENSIDAD –  
ESTABILIDAD – DEPOSICIÓN FINAL O APLICACIONES**

*Gerardo Zamora E. (\*)*  
Profesor de Postgrado –  
Universidad Técnica de Oruro  
Bolivia

---

**RESUMEN**

Las aguas ácidas de muchas minas, formadas en su interior como un proceso natural de oxidación de minerales sulfurados y catalizados por el género de bacterias *Thiobacillus Ferrooxidans*, que actualmente son evacuadas al medio ambiente sin un tratamiento previo, aportan fuertes cargas de metales pesados y ambientes ácidos a las cuencas superficiales y del Lago Poopó, como principal cuerpo receptor acuoso del altiplano boliviano.

Asimismo, las actividades mineras desarrolladas en épocas anteriores y que han dado lugar al abandono de residuos sólidos mineros como son las colas y los desmontes; mismos que, son considerados actualmente como "pasivos ambientales" y "potenciales generadores de drenajes ácidos" acrecentan el impacto ambiental a los ecosistemas de la región altiplánica.

Esto hace pensar que desde el punto de vista técnico y económico sea necesario "tratar las aguas ácidas de mina" mediante un proceso sencillo, rápido y que permita el tratamiento de grandes volúmenes de agua.

En el presente estudio se presenta, como alternativa el tratamiento de las aguas ácidas de mina, el proceso físico-químico de la neutralización-precipitación continua, introduciendo el principio de la formación de lodos de alta densidad. Se estudia la estabilidad de los lodos obtenidos y se vierten conceptos para su uso o alternativas de deposición.

Los resultados del trabajo de investigación desarrollado muestran que, es posible desde el punto de vista ambiental, tener efluentes cuyas descargas cumplen con los límites permisibles de descarga establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la normativa boliviana; además que, los lodos obtenidos son fáciles de separar y desde el punto de vista de la química son relativamente estables para su deposición final. Su aplicación en la construcción puede ser interesante para generar ingreso y pagar costos de tratamiento.

## 1. ANTECEDENTES

Las aguas ácidas generadas en el interior de las minas abandonadas y/o en operación; además de los pasivos ambientales, provocan hoy en día en una de las principales fuentes de contaminación al medio ambiente en varias regiones mineras del altiplano boliviano, debido a la presencia de una serie de metales pesados disueltos y a su carácter fuertemente ácido.

La restauración de los sitios mineros abandonados y el tratamiento de las aguas ácidas de mina, son las "prioridades ambientales nacionales" que permitirán disminuir y/o eliminar la elevada contaminación por cargas de metales pesados tóxicos de los cuerpos receptores acuáticos del altiplano boliviano.

El objeto de estudio del presente trabajo técnico es el Tratamiento Físico-Químico, mediante Neutralización-Precipitación con Cal, mediante un sistema continuo de formación de lodos de alta densidad (HDS) y la Estabilidad Química de los lodos obtenidos para fines posteriores de deposición y/o aplicación en la industria de la construcción.

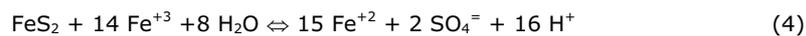
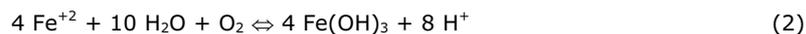
## 2. OBJETIVO

El objetivo del desarrollo de las pruebas a nivel laboratorio de Tratamiento Físico-Químico por Neutralización – Precipitación de las Aguas Ácidas, es en primer lugar, determinar el grado de eliminación de metales pesados tóxicos y las condiciones de operación adecuadas en el proceso a objeto de alcanzar niveles de descarga de contaminantes que se enmarquen a la normativa ambiental boliviana; y en segundo lugar, determinar la estabilidad química de los lodos obtenidos y establecer alternativas de deposición y/o aplicación en el área de la construcción.

## 3. IMPACTO AMBIENTAL POR DRENAJES ÁCIDOS

Producto de la explotación minera en el altiplano boliviano se han generado grandes volúmenes de "pasivos ambientales", que hoy en día se constituyen en fuentes principales de contaminación ambiental.

La formación de Drenaje Ácido de Roca (DAR), a partir de los pasivos ambientales, se debe a la reacción de oxidación de los sulfuros presentes, especialmente pirita, con agua y oxígeno, que de acuerdo a las siguientes reacciones, generan iones H<sup>+</sup>:



La reacción 3, es catalizada por microorganismos del género *Thiobacillus Ferrooxidans* a valores de pH ácidos, generando iones  $Fe^{+3}$ , con un fuerte potencial de oxidación que dan lugar a la disolución de la pirita mediante la reacción 4 y de otros sulfuros presentes, generando altas concentraciones de iones  $H^+$  que modifican el valor del pH e incrementando la concentración de metales pesados de los acuíferos a los cuales fluyen.

Por otra parte, las aguas ácidas de mina, generadas en el interior de una mina por un proceso de oxidación de minerales sulfurados en presencia de oxígeno y agua y catalizadas por el genero de bacterias *Thiobacillus Ferrooxidans*, se constituyen también en una fuente potencial de contaminación ambiental en muchas regiones del altiplano boliviano con historia minera.

El efecto de ambos casos, puede demostrarse en el monitoreo realizado por el Proyecto Piloto Oruro (PPO), quienes reportan valores de pH bastante ácidos en los acuíferos superficiales de zonas en las que se tiene o se ha dado lugar a una fuerte actividad minera, como se muestra en la Figura 1.

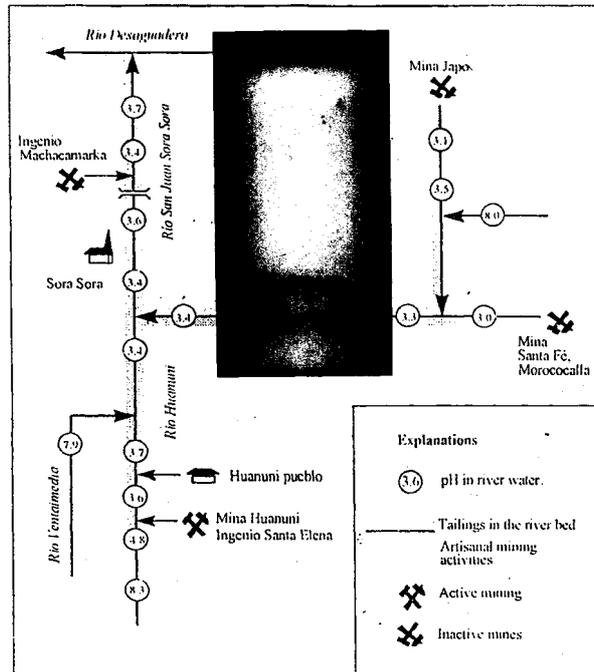


Figura 1 - Monitoreo del pH de ríos que contribuyen al Lago Uru Uru

Asimismo, a partir de la determinación de la concentración de metales pesados en los ríos de la cuenca endorreica cerrada que tributan sus aguas a los Lagos Uru Uru y Poopó y la medición de caudales de los mismos, se han reportado "resultados alarmantes de la carga por metales pesados" que tienen como destino final tienen el Lago Poopó y que se presentan en la Figura 2.

De acuerdo a datos del proyecto PPO, representados en la Figura 2, el Lago Poopó recibe un **aporte anual en toneladas de metales pesados de: 63.8 de As – 29.2 de Cd – 61.6 de Cu – 8.2 de Pb – 8 de Sb y 3417 de Zn**; teniendo como fuentes a acuíferos superficiales que son contaminados por las **escorrentías de pasivos ambientales y aguas ácidas de mina**. La enorme contaminación a la que se encuentra sometida este cuerpo acuoso receptor, exige de medidas inmediatas de mitigación.

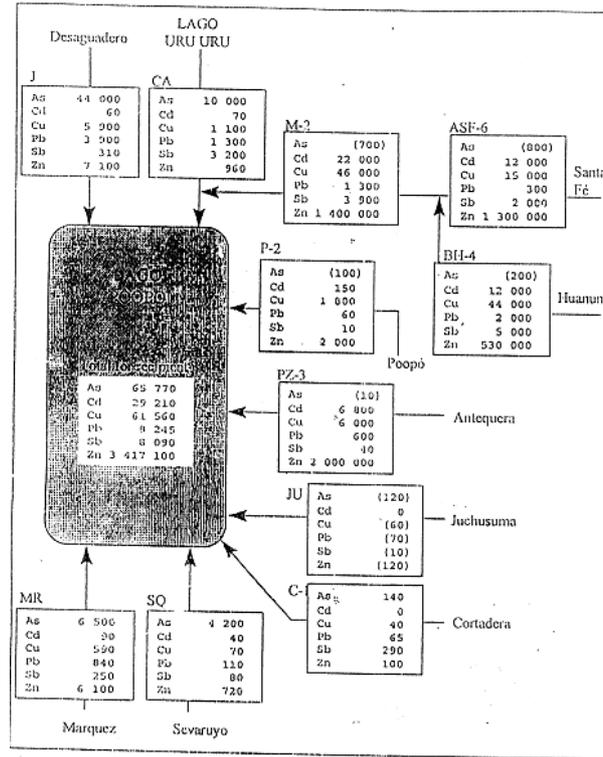


Figura 2 - Balance de Carga de Metales Pesados de Ríos Tributarios al Lago Uru Uru y Poopó (Unidades expresadas en kilogramos).

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Caracterización Físico - Química de las Aguas Ácidas de Mina Estudiadas

Los resultados de la caracterización físico-química de las Aguas Ácidas de Mina estudiada son presentados en la Tabla 1.

**Tabla 1 - Resultados del Análisis físico químico del Agua Acida de Mina Estudiada**

Parámetro	Norma	Límite de Detección	Agua Acida de Mina Japo
Temperatura		+/- 0.1 °C	13.5 °C
PH	ASTM D 1293	+/- 0.01	2.5
Sólidos Disueltos	ASTM D 2540 C	5 ppm	<5
Conductividad	ASTM D 1125	5 µS/cm	2950

Los resultados del análisis químico por metales pesados de la muestra de las Aguas Ácidas de Mina estudiada, se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2 - Resultados del Análisis Químico por Metales Pesados del Agua Acida de Mina Estudiada**

Elemento	Norma	Límite de Detección (ppm)	Agua Acida de Mina Japo (ppm)
Arsénico As	ASTM D 2972	0.002	0.079
Cadmio Cd	ASTM D 3557 A	0,01	12.41
Cobre Cu	ASTM D 1688 A	0,02	14.53
Hierro Fe	ASTM D 1068 A	0,03	299.46
Plomo Pb	ASTM D 3559 A	0,1	0.2
Zinc Zn	ASTM D 1691	0,005	217.405

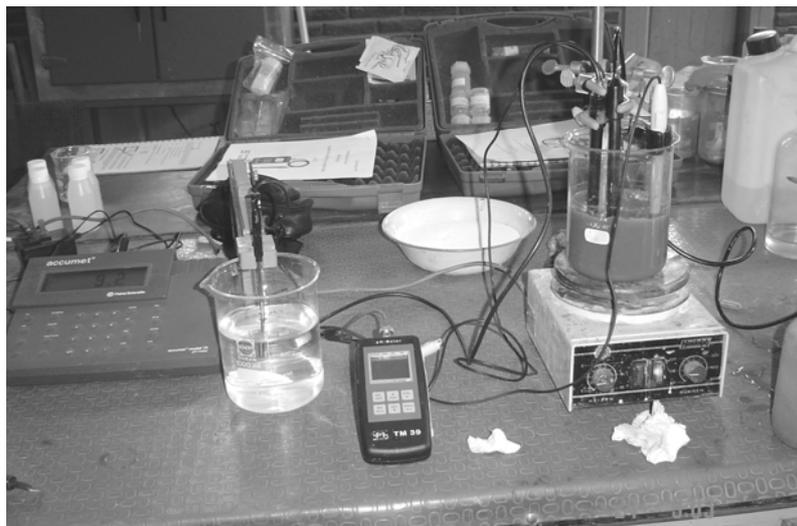
Las altas concentraciones en los metales pesados analizados y la elevada acidez en el agua de mina permiten demostrar que es necesario aplicar un tratamiento previo a su evacuación al medio ambiente a objeto de no impactar en la calidad de los acuíferos receptores.

#### 3.2. Pruebas Discontinuas Exploratorias

Las pruebas de Neutralización - Precipitación fueron realizadas en un reactor de lixiviación con agitación mecánica con volúmenes de 500 ml. de agua ácida de mina.

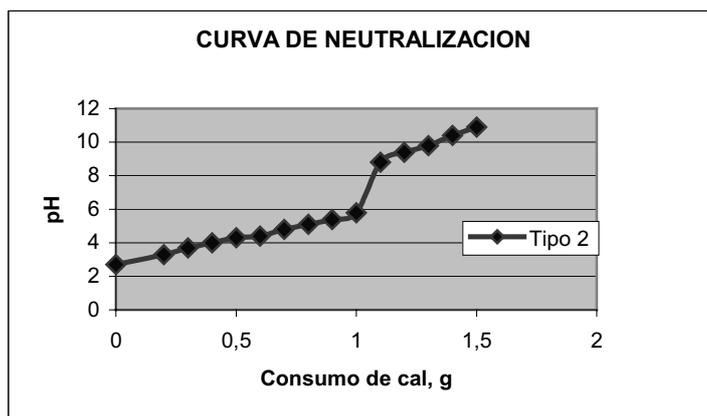
La Fotografía 1, muestra la disposición del equipo en el que se

realizaron las pruebas de neutralización precipitación.



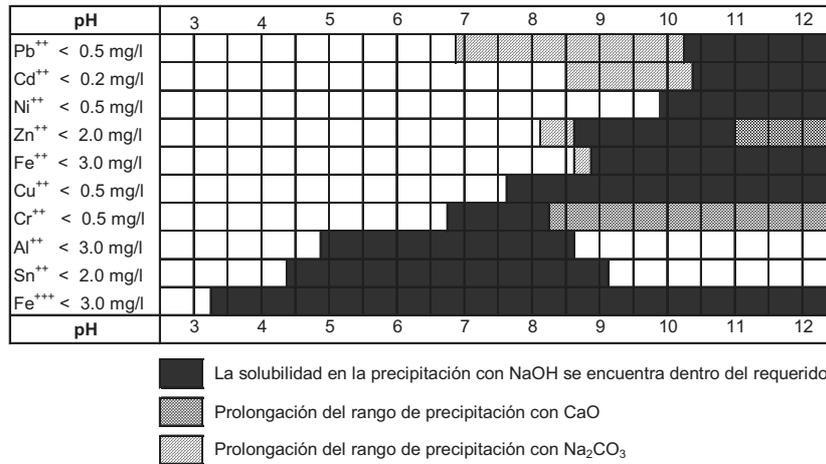
**Fotografía 1 - Disposición del Equipo utilizado para las pruebas de Neutralización - Precipitación**

Los consumos del agente de neutralización-precipitación (Cal de 62.35 % de pureza) son graficados en la Figura 3.



**Figura 3 - Curva de Neutralización usando la Cal**

El pH final elegido se fundamenta en la gráfica siguiente, obtenida de manera experimental en otros estudios:



**Figura 4- pH de Precipitación de Metales Pesados**

Como se observa, la precipitación especialmente de Cd<sup>++</sup> y de Zn<sup>++</sup> y Fe<sup>++</sup> se lleva a cabo por encima de valores de pH de 8.5

Los resultados del análisis químico de la solución filtrada y su comparación con los límites permisibles establecidos en el Anexo 2 del Reglamento en materia de Contaminación Hídrica de la Normativa Ambiental Boliviana, es presentada en la Tabla 3.

**Tabla 3 - Resultados de Análisis Químico de la Prueba Final Discontinua de la Neutralización – Precipitación de las Aguas Ácidas de Mina Estudiada**

		Código Cliente	LCM-03/06	Límite
		Cód. Laboratorio	1954	descarga
Parámetros	Método	LD/ppm		
pH	ASTM D 1293		8.8	6 - 9
Arsénico (mg/l)	ASTM D 2972	0.002	0.005	1.0
Cadmio (mg/l)	ASTM D 3557 A	0,01	0.03	0.3
Cobre (mg/l)	ASTM D 1688 A	0,02	0.03	1.0
Hierro (mg/l)	ASTM D 1068 A	0,03	< 0,03	1.0
Plomo (mg/l)	ASTM D 3559 A	0,1	<0,1	0.6
Zinc (mg/l)	ASTM D 1691	0,005	0.057	3.0

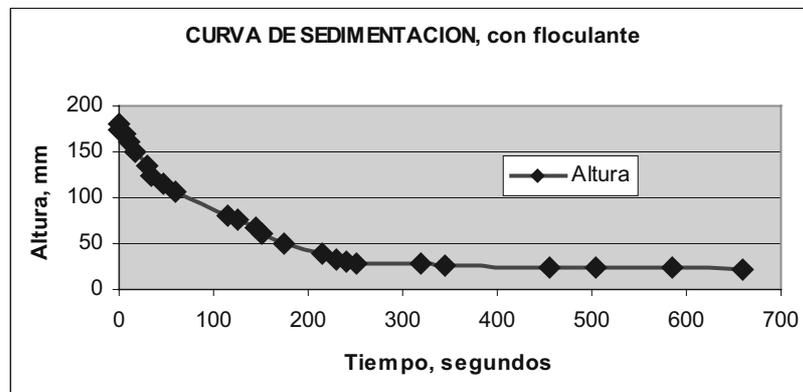
Como se evidencia en los datos presentados en la Tabla 3, "las concentraciones de metales pesados en el efluente de descarga del proceso de Neutralización – Precipitación están por debajo de los límites permisibles de descarga establecidos en la normativa ambiental boliviana".

Los resultados de la caracterización físico-química del producto de precipitación son presentados en la Tabla 4.

**Tabla 4 - Resultado de la caracterización de los productos de precipitación**

Datos Técnicos	
Volumen de filtrado (ml)	485
Peso Húmedo del Queque (gr)	14
Peso Seco del Queque (gr)	4.35
Humedad del Queque (%)	68.93
Peso Específico del Queque Seco (gr/cm <sup>3</sup> )	2.746

A objeto de determinar los datos técnicos referidos a la decantabilidad del producto precipitado, que serán necesarios para el diseño y dimensionamiento de los sedimentadores; es necesario, obtener datos de sedimentación con probeta inclinada. Los resultados obtenidos en dicha prueba son presentados en las figuras 5.



**Figura 5 - Curva de Sedimentación del Producto de la Neutralización-Precipitación de la Prueba Discontinua Final usando la cal Tipo 2 (con el uso de floculante)**

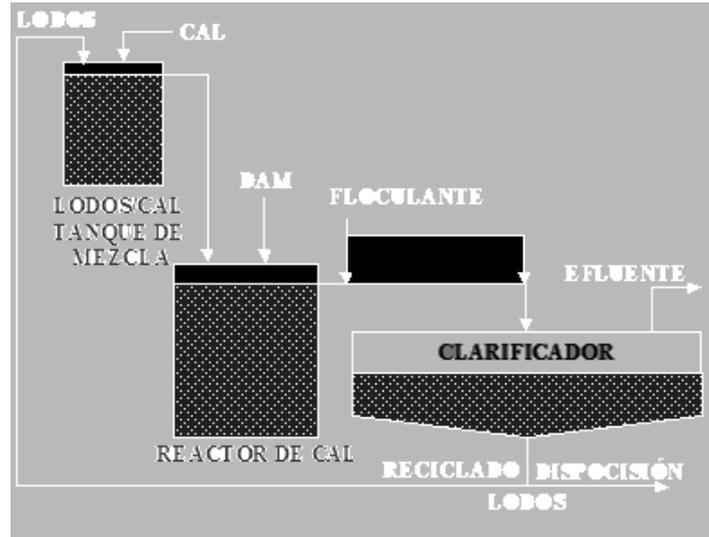
La predicción de los productos de precipitación mediante el software "Visual Minteq" son presentados en la Tabla 5. A partir de dicha predicción se podrán buscar alternativas para su posterior uso.

**Tabla 5- Índices de Saturación de las Especies Sólidas (pH = 8.8)**

Fase Sólida	Mineral	log IAP	Índice de Saturación S.I.	Stoichiometry and mineral components
CaSO <sub>4</sub>	Anhidrita	-3.736	0.580	Ca <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = CaSO <sub>4</sub>
Cd <sub>4</sub> (OH) <sub>6</sub> SO <sub>4</sub>		30.634	2.234	4Cd <sup>2+</sup> + 6H <sub>2</sub> O + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = Cd <sub>4</sub> (OH) <sub>6</sub> SO <sub>4</sub> + 6H <sup>+</sup>
CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Ferrita cúprica	10.722	3.456	Cu <sup>2+</sup> + 2Fe <sup>3+</sup> + 4H <sub>2</sub> O = CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> + 8H <sup>+</sup>
CuFeO <sub>2</sub>	Ferrita cuprosa	4.928	13.749	Cu <sup>+</sup> + Fe <sup>3+</sup> + 2H <sub>2</sub> O = CuFeO <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup>
Fe <sub>3</sub> (OH) <sub>8</sub>		21.746	1.524	Fe <sup>2+</sup> + 2Fe <sup>3+</sup> + 8H <sub>2</sub> O = Fe <sub>3</sub> (OH) <sub>8</sub> + 8H <sup>+</sup>
Fe(OH) <sub>3</sub>	Ferrihidrita	4.216	0.579	Fe <sup>3+</sup> + 3H <sub>2</sub> O = Fe(OH) <sub>3</sub> + 3H <sup>+</sup>
α-FeOOH	Goethita	4.232	3.373	Fe <sup>3+</sup> + 2H <sub>2</sub> O = □-FeOOH + 3H <sup>+</sup>
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Yeso	-3.769	0.847	Ca <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 2H <sub>2</sub> O = CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O
γ-FeOOH	Lepidocrocita	4.232	2.861	Fe <sup>3+</sup> + 2H <sub>2</sub> O = □-FeOOH + 3H <sup>+</sup>
Pb(OH) <sub>2</sub>		10.636	2.130	Pb <sup>2+</sup> + 2H <sub>2</sub> O = Pb(OH) <sub>2</sub> + 2H <sup>+</sup>

### 3.3. Pruebas Continuas de Neutralización – Precipitación Aplicando el Proceso HDLS

El principio de la formación de los lodos de alta densidad se basa en la recirculación de una parte del producto de precipitación y su mezclado junto con la cal en un reactor; cuya descarga, va a un segundo reactor donde el Agua Ácida de Mina es alimentada. Finalmente, se procede a la separación sólido/líquido. El flujograma 1, describe dicho proceso.



**Flujograma 1 - Tratamiento de AAM mediante el proceso de HDS**

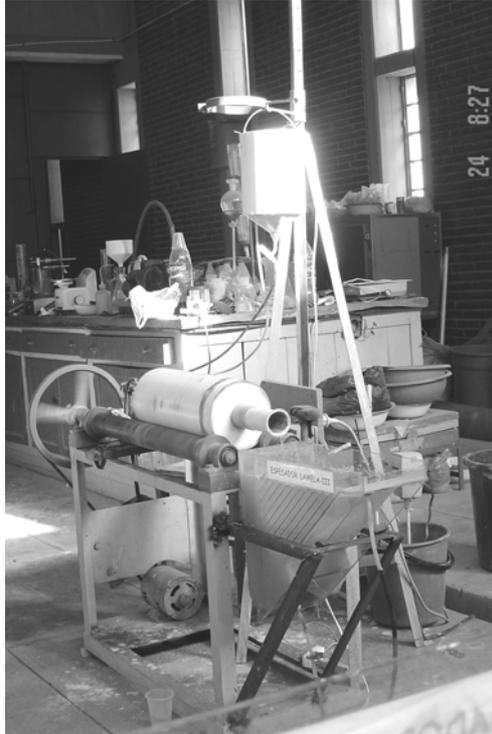
Esta forma de tratamiento permite que:

- ✓ Los lodos sean envueltos con partículas de cal en el tanque de mezcla lodos/cal
- ✓ Se fuerce a que las reacciones de precipitación ocurran en la superficie de las partículas existentes
- ✓ Se aumente el tamaño de las partículas, la tasa de sedimentación y la densificación. Los lodos de alta densidad se producen debido a:
- ✓ La disolución parcial del lodo al contacto directo con DAM
- ✓ El aumento del pH y la precipitación de los metales en el primer reactor
- ✓ La precipitación se da sobre la superficie de las partículas existentes y de esta manera las partículas aumentan de tamaño

#### La Neutralización

Precipitación bajo el principio de los Lodos de Alta Densidad se realizó en un reactor continuo que consta de: Un reactor de 4 litros de capacidad en el que se carga el agua ácida de mina; un reactor con agitación mecánica para la preparación de la lechada de cal y la recirculación de los flóculos precipitados; una bomba peristáltica que transporta la lechada de cal y flóculos al reactor horizontal de mezcla de 4

litros de capacidad; y finalmente, una lamela para la separación de los productos de precipitación y el rebose del agua clara; y posterior densificación en forma de lodos de alta densidad. La Fotografía 2, muestra la disposición de los reactores para la realización de la prueba de neutralización-precipitación continua.



**Fotografía 2 - Disposición del equipamiento utilizado para la pruebas continuas**

Las condiciones técnicas de operación de la prueba continua son detalladas a continuación:

1. Volumen inicial del agua ácida: 20 litros
2. pH inicial del agua ácida = 2.7
3. Sólidos en suspensión al inicio de la muestra: 7.82 g/lit
4. Pureza de la cal usada: 63.25%
5. Lechada de la cal preparada: 6 litros (52 gramos)

6. Volumen de agua en la Lamella, antes de la operación: 6 litros (para permitir un flujo constante)
7. Tiempo duración de la prueba continua: 2 1/2 horas
8. Flujo de salida del reactor de mezcla: 173.3 cm<sup>3</sup>/min (sin recirculación del underflow de la lamela)
9. Flujo de alimentación del agua acida: 2.5 cm<sup>3</sup>/seg
10. Flujo de alimentación de la lechada de cal: 0.65 cm<sup>3</sup>/s
11. Flujo salida del reactor al Lamella: 189 cm<sup>3</sup>/min (con recirculación del underflow de la lamela)
12. Volumen final del overflow del Lamella: 26.1 litros
13. Volumen final del underflow del Lamella: 4.85 litros
14. Densidad de pulpa del overflow: 1,004 g/l
15. Densidad de pulpa del underflow: 1,014 g/l
16. %Sólidos del overflow: 0.45%
17. %Sólidos del underflow: 25%
18. Peso húmedo del queque del underflow filtrado: 344 g
19. Peso seco del queque del underflow filtrado: 82 g

**Tabla 6 - Resultados de Análisis Químico de la Prueba Final Continua de la Neutralización – Precipitación de las Aguas Ácidas de Mina**

Parámetros	Unidades	Método	Límite Detección/ppm		Norma Boliviana
pH		ASTM D 1293	9.2		6 - 9
Conductividad	[μS/cm]	ASTM D 1125	5	2750	
Sólidos Disueltos	[mg/L]	ASTM D 2540 C	5	<5	
Sulfatos SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	[mg/L]	ASTM D 516	1	955	
Arsénico As	[mg/L]	ASTM D 2972	0.002	<0,002	1.0
Cadmio Cd	[mg/L]	ASTM D 3557 A	0,01	0.02	0.3
Cobre Cu	[mg/L]	ASTM D 1688 A	0,02	0.04	1.0
Hierro Fe	[mg/L]	ASTM D 1068 A	0,02	< 0,03	1.0
Plomo Pb	[mg/L]	ASTM D 3559 A	0,1	<0,1	0.6
Zinc Zn	[mg/L]	ASTM D 1691	0,005	<0,005	3.0

Posteriormente, se determinó la "estabilidad química" del producto de neutralización- precipitación, mediante el "test de toxicidad". La prueba de toxicidad fue llevada a cabo de acuerdo a los protocolos de la OPS; preparándose una pulpa con el producto de la neutralización-precipitación al 20% de sólidos; añadiendo ácido acético hasta alcanzar un

pH de 5.5 y solución buffer a objeto de que el pH se mantenga constante; para finalmente, mantener agitada la pulpa durante 24 horas. Los resultados de las pruebas de toxicidad y su comparación con los valores de concentración máximos permisibles establecidos en la normativa 40 CFR 261.30 (EPA 1312), son presentados en la Tabla 7.

**Tabla 7 - Resultados de Análisis Químico de la Solución Filtrada del Test de Toxicidad y su Comparación con las Concentraciones Máximas Permisibles**

Elemento	Muestra (mg/l)	Norma (mg/l)
Arsénico	0.14	5
Cadmio	14.68	1
Cobre	12.93	25
Plomo	3.3	5
Zinc	1676	250

Finalmente, se estudió la posible aplicación de los lodos obtenidos en el campo de la construcción. Se aprovecho la coloración rojiza a pardo de los lodos para formar material de "revoque" y al mismo tiempo de "pintura" de paredes. El lodo es de más fácil manipulación cuando se mezcla con estuco, favoreciéndose así a su aplicación final.

#### **4. CONCLUSIONES**

Del trabajo de investigación desarrollado, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- ✓ A partir de la elevada acidez y de la concentración de metales pesados presentes en las aguas ácidas evacuadas, se confirma que éstas requieren de un tratamiento físico-químico, antes de su evacuación al medio ambiente, a objeto de no alterar la calidad de los cuerpos receptores acuosos
- ✓ A pH de 8.8 es posible precipitar los metales pesados hasta concentraciones por debajo de las concentraciones medias máximas permisibles de descarga establecidos en el Anexo 2 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Normativa Ambiental Boliviana
- ✓ El producto de precipitación obtenido y de acuerdo a las curvas de sedimentación obtenidas, es de fácil sedimentación con el uso de floculante
- ✓ Mediante el software "Visual Minteq" es posible predecir los posibles productos de precipitación obtenidos

A partir de los siguientes datos de operación de la prueba continua:

- ✓ Densidad de pulpa del overflow: 1,004 g/l - Densidad de pulpa del underflow: 1,014 g/l - %Sólidos del overflow: 0.45% - %Sólidos del underflow, después de la densificación: 25% - Peso húmedo del queque del underflow filtrado: 344 g - Peso seco del queque del underflow filtrado: 82 g - pH del agua clara de rebose de la Lamela de 9.1 se precipitan los metales pesados hasta concentraciones por debajo de las concentraciones medias máximas permisibles de descarga establecidos en el Anexo 2 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Normativa Ambiental Boliviana
- ✓ Los lodos pueden ser usados para el "revoque" de las paredes y por su coloración, sin adición de pigmentos, se obtiene un color en las paredes de características especiales.