



Research, Society and Development
ISSN: 2525-3409
ISSN: 2525-3409
rsd.articles@gmail.com
Universidade Federal de Itajubá
Brasil

Viabilidad del tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José - Oruro – Bolivia

Zamora Echenique, Gerardo; Trujillo Lunario, Elvys

Viabilidad del tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José - Oruro – Bolivia

Research, Society and Development, vol. 3, núm. 2, 2016

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=560658995004>

DOI: <https://doi.org/10.17648/rsd-v3i2.48>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

Viabilidad del tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José - Oruro – Bolivia

Viability of the treatment of acidic waters of the San Jose mine
- Oruro – Bolivia

Gerardo Zamora Echenique
gerardozamoraechenique@yahoo.es
Universidad Técnica de Oruro, Bolivia
Elvys Trujillo Lunario jelvyst20@gmail.com
Universidad Técnica de Oruro, Bolivia

Research, Society and Development, vol.
3, núm. 2, 2016

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

Recepción: 17 Octubre 2016
Aprobación: 26 Octubre 2016

DOI: <https://doi.org/10.17648/rsd-v3i2.48>

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=560658995004>

Resumen: La mina San José está ubicada en la ciudad de Oruro - Bolivia. El drenaje ácido generado en el interior de la mina, con valores de pH fuertemente ácidos de 1.2 a 2.5, es bombeada a 8 litros por segundo; y sin ningún tratamiento, es vertida al medio ambiente. Dichas aguas ácidas, desembocan finalmente en el lago Urú-Urú. La carga de metales disueltos anual en toneladas es de: 1 de Cd; 11 de Cu; 761 de Fe; 14 de Pb; 13 de As; 0,3 de Sb y 22 de Zn. El objetivo del trabajo de investigación se circunscribió a estudiar técnica, económica, ambiental y socialmente, las alternativas de tratamiento de las aguas ácidas de la Mina San José a partir de pruebas a escala de laboratorio y planta piloto. Las alternativas de tratamiento estudiadas fueron: Evaporación – Cristalización; Neutralización – Precipitación con cal en superficie; Drenes de Caliza Anoxicos; y finalmente, Neutralización – Precipitación con cal en interior mina. De los resultados de la valoración técnica, económica, ambiental y social, se concluyó que la última alternativa es la más adecuada. El reactor de separación sólido/líquido en el interior mina, consiste en una galería abandonada de 104 m de largo, 2 m de ancho y una altura de 1.8 m. Ésta permite el tratamiento de 691.2 m³/día de agua ácida. El consumo de cal cen forma de lechada requerido es de 6.9 toneladas por día. Las aguas tratadas presentan un pH de 6.7 y cumplen los límites permisibles de descarga. Finalmente, los lodos generados son dispuestos en los rajos abandonados que se encuentran a 150 m del punto de descarga de estanque de tratamiento. El costo de inversión del proyecto es 282.686,01 \$us y los costos de operación ascenderan a 383.918,32 \$us por año. La planta de tratamiento fue inaugurada el 30 de junio del 2016.

Abstract: The San José mine is located in the city of Oruro - Bolivia. Acid drainage generated inside the mine, with strongly acidic pH values of 1.2 to 2.5, is pumped to 8 liters per second; without any treatment, it is poured into the environment. Such acidic waters eventually flow into Lake Uru-Uru. The load of dissolved metals in annual tons is: 1 Cd; 11 Cu; Fe 761; 14 Pb; 13 As; 0.3 Sb and Zn 22. The goal of the research was limited to study technical, economic, environmental and socially, alternative treatment of acidic waters of the Mina San Jose from laboratory scale tests and pilot plant. Treatment options studied were: Evaporation - Crystallization; Neutralization - precipitation with lime on the surface; Anoxic limestone drains; and finally, Neutralization - precipitation with lime inside the mine. From the results of the technical, economic, environmental and social assessment it concluded that the last option is the most appropriate. The reactor solid / liquid separation inside mine, an abandoned gallery is 104 m long, 2 m wide and a height of 1.8 m. This allows treatment of 691.2 m³ / day acidic water. Lime consumption as required grout is 6.9 tons per day. The treated water has a pH of 6.7 and meet allowable discharge limits. Finally, the sludge generated are arranged in the abandoned pits that are located 150 m from the discharge point pond therapy. Improper investment cost of the project is US \$ 282,686.01 and operational costs amount to US \$ 383,918.32 by year. The treatment plant was inaugurated on June 30, 2016.

Keywords: Treatment , Acidic waters, Mine.

Palavras chave: Tratamiento, Aguas ácidas, Mina

1. Introducción

Las aguas ácidas de mina, denominadas en Bolivia como “aguas de copagira” y formadas como un proceso natural de oxidación de minerales sulfurados en presencia de agua y oxígeno, y catalizado por microorganismos del género *Thiobacillus Ferrooxidans*, se constituyen hoy en día en una de las principales fuentes de contaminación al medio ambiente en varias regiones mineras por la carga en metales pesados disueltos y la fuerte acidez que presentan (Ahmed, et al, 2000; Faulkner y Skousen, 1994; Zamora y Quezada, 2003).

Es el caso de la mina San José, ubicada en la ciudad de Oruro, en la provincia Cercado del Departamento del mismo nombre. La mina se encuentra cercana a la población urbana de la ciudad de Oruro a una elevación de 4.032 msnm. En sus extensas galerías y socavones, existen cuerpos de mineralización sulfurosos que se oxidan por la acción de las aguas subterráneas y de la lluvia que ingresa y el oxígeno del aire, generando así el Drenaje Ácido de Mina.

El drenaje ácido generado en el interior de la mina, presenta valores de pH fuertemente ácidos que oscilan entre 1.2 a 2.5. Con el fin de mantener accesibles los niveles más profundos para la explotación por parte de más de 1000 trabajadores corporativizados, dicho drenaje es bombeada a 8 l/s; y sin ningún tratamiento, es vertido al medio ambiente; en principio, atravesando parte de la ciudad de Oruro, y finalmente desembocando gradualmente en el lago Uru-Uru; generando así, un fuerte impacto ambiental por la elevada carga de metales pesados tóxicos disueltos y su elevada acidez.

La descarga de las aguas ácidas de la mina San José, sin ningún tratamiento, genera una carga de metales disueltos anual en toneladas de: 11595 de sólidos disueltos; 1 de Cd; 11 de Cu; 761 de Fe; 14 de Pb; 13 de As; 0,3 de Sb y 22 de Zn; calculados a partir de concentraciones y caudales promedio de 8 l/s; los que finalmente, alteran la calidad de las aguas superficiales y subterráneas; contaminan los suelos y alteran los frágiles ecosistemas acuáticos de sus cuerpos receptores; en especial del lago Uru Uru.

El lago Uru Uru está enclavado en el Altiplano Andino en una zona donde la salinidad del suelo y la aridez del clima determinan las formas de vida de la región. La calidad hidroquímica de sus aguas muestran incrementos del valor del pH durante la temporada de lluvias hasta un valor de 10.02 que está por encima de los límites permisibles para los diferentes usos, bajando en la temporada de estiaje hasta un valor de 8.08.

Sin embargo, los valores de la conductividad eléctrica son altos, con valores fluctúan entre 4.66 a 57 mS/cm, superando ampliamente los límites permisibles; ocurriendo lo mismo con los sólidos totales disueltos, con valores fluctuantes entre 2.34 a 28.60 g/L. Es un agua dura, con una concentración de cloruros alta que también sobrepasa los límites

establecidos para los diferentes usos, con valores entre 1245.9 a 16910.6 mg/L, que se incrementa en la temporada de estiaje. Igualmente ocurre con las concentraciones de sulfatos, con valores que fluctúan entre 500 a 4000 mg/L.

La presencia de sulfato y metales pesados tóxicos disueltos es un indicio directo de la repercusión de las aguas ácidas de la mina San José.

Por ejemplo, se observó un incremento de arsénico durante la temporada de estiaje hasta 0.09 mg/L, que se encuentra por encima del límite permisible para consumo humano. Los valores de estaño se encuentran entre 0.2 a 0.6 mg/L y los de plomo entre 0.08 a 0.1 mg/L, por encima de los límites permisibles para consumo humano (0.02 mg/L de Sn y 0.05 mg/L de Pb). El cadmio se encuentra entre 0.02 a 0.05 mg/L y el cobalto que fluctúa entre 0.08 a 0.15 mg/L, por encima de los límites permisibles para consumo humano, riego y consumo animal. Existe un incremento de la concentración de níquel durante la temporada de estiaje con valores que fluctúan entre 0.12 a 0.15 mg/L y en la época de lluvias presenta valores de 0.10 mg/L, que sobrepasan el límite establecido para consumo humano.

Mediante estudios ecotoxicológicos se ha demostrado que los metales pesados disueltos provocan efectos dañinos tanto al medio ambiente como a la salud y seguridad de las personas que normalmente hacen uso de las aguas del lago para actividades productivas, piscícolas y de riego. Por tanto, el tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José es “prioritaria”.

El objetivo del presente trabajo de investigación se circunscribió al estudio técnico, económico, ambiental y social de diferentes alternativas de tratamiento de las aguas ácidas de la Mina San José a partir de pruebas a escala de laboratorio y planta piloto; para luego, presentar el estudio a diseño final de la mejor propuesta.

2. Materiales y métodos

Las alternativas de tratamiento de aguas ácidas de la mina San José estudiadas tanto a nivel laboratorio como a escala piloto fueron: Tratamiento de las aguas ácidas de mina por evaporación – cristalización; Tratamiento físico-químico activo por Neutralización – Precipitación con cal y separación sólido-líquido, en superficie; Tratamiento en sistemas reductores y productores de alcalinidad (principio de Drenes de Caliza Anoxico o ALD); y Tratamiento de las aguas ácidas activo por Neutralización – Precipitación con cal y separación sólido-líquido, en interior mina (Hedin y Watzlaf, 1994; Ignacio, 2000; Zamora, 1999).

La primera alternativa estudiada, fue la del tratamiento de las aguas ácidas de mina por evaporación - cristalización.

La aplicación técnica de ésta alternativa, se basa en las condiciones climáticas imperantes (balance entre evaporación y precipitación) en la ciudad de Oruro, que son favorables para tratar el agua ácida de la mina San José mediante evaporación - cristalización.

Se desarrollaron pruebas a nivel laboratorio y en pozas de evaporación - cristalización a nivel piloto. Se determinó que los productos de cristalización obtenidos fueron: Sulfatos de baja solubilidad: cristales aciculares de yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y precipitados pulverulentos de anglesita PbSO_4 ; precipitados ferruginosos de color ocre amarillento: costras y geles de jarosita $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, hidroniojarosita $\text{H}_2\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_7$, natrojarosita $\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, goethita FeOOH , pequeñas cantidades de $\text{Fe}(\text{OH})_{2.7}\text{Cl}_{0.3}$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$; Cristales cúbicos de cloruro de sodio NaCl .

La segunda alternativa estudiada, fue la del tratamiento físico-químico activo por Neutralización - Precipitación con cal y separación sólido-líquido, en superficie.

Para una descarga del agua ácida de mina tratada, y en aplicación a la normativa ambiental boliviana para descargas líquidas, se determinó experimentalmente que sería necesaria la adición de 8.5 a 11 gramos de cal por litro de agua ácida de la mina San José; alcanzando un pH del efluente de descarga de entre 6.0 y 9.0, respectivamente.

La concentración de metales disueltos en el efluente del tratamiento a pH de 6,7 cumple para la mayoría de los metales pesados disueltos, con los límites máximos permisibles de descarga establecidos en el anexo 2 del Reglamento en materia de Contaminación Hídrica de la Normativa Ambiental Boliviana.

El tratamiento bajo el principio de lodos de alta densidad es el más conveniente para el tratamiento de las aguas ácidas por su elevada acidez y elevada presencia de metales pesados.

La tercera alternativa estudiada, fue la del tratamiento en sistemas reductores y productores de alcalinidad (principio de Drenes de Caliza Anoxico o ALD).

Los resultados de la caracterización físico-química de las Aguas Ácidas de la Mina San José, en términos de los parámetros que podrían limitar la aplicabilidad del sistema ALD (Sulfato y pH).

Para determinar la cantidad de alcalinidad generada por las Aguas Ácidas de la Mina San José bajo condiciones de Dren Anaeróbico Calizo, se realizaron pruebas de laboratorio.

Finalmente, la última alternativa estudiada, fue la del Tratamiento de las aguas ácidas activo por Neutralización - Precipitación con cal y separación sólido-líquido, en interior mina. Dicha propuesta es de alta innovación tecnológica y única en el mundo.

Pruebas a pequeña escala y a nivel piloto, han sido desarrolladas en la Mina Santa Fe. Un estanque de 82,8 m³ construido en el interior de la mina, permitió tratar un caudal de 61,5 Litros por segundo; correspondiendo un tiempo de residencia de 23 minutos. Para asegurar una correcta homogenización de la cal añadida, preparada en forma de lechada en un reactor ubicado cercano a la galería cerrada, se realizó en el lado opuesto a la entrada de la misma, junto con las aguas ácidas que se bombean de los niveles las galerías inferiores; y a una altura aproximada de 1.6 m del otro extremo, se realizó la descarga de agua ya neutralizada para su posterior bombeo hacia la superficie. En este mismo lado; pero por

la parte inferior, se realizó la descarga de los lodos decantados de forma intermitente. Los lodos fueron luego enviados a parajes abandonados aprovechando la gravedad.

Por otra, las aguas tratadas con un pH de 6, bombeadas al exterior desde la “galería sellada”, y ser posteriormente recolectadas en un reservorio en la superficie pueden ser utilizadas para riego en las épocas de estiaje.

Para el caso de la Minas San José, se tiene planificado llevar adelante un desagüe a un ritmo de 8 lt/seg; es decir que por día se deben tratar 691.2 m³. Por tanto, para cumplir con la normativa ambiental de descarga, el effluente del tratamiento de las aguas ácidas de la bocamina San José debe presentar un pH de 6.0; por lo que, el consumo de cal mínimo debe ser de 10 gramos por litro de agua ácida tratada.

Finalmente, las aguas tratadas con un pH de 6, serán bombeadas al exterior desde la “galería sellada”, para ser posteriormente recolectadas en un reservorio en la superficie; a objeto de que las mismas, puedan ser utilizadas para uso de en el campamento para baños y duchas.

Posteriormente, se realizó un análisis y evaluación de cada alternativa desde el punto de vista **técnico** (facilidad técnica, tiempo de implementación, grado de dificultad en el mantenimiento, problemas en la operación y finalmente, posibles fallas del sistema); **económico** (costos de: inversión, operación, mantenimiento, cierre, y finalmente, costos administrativos), **ambiental** (manejo de los residuos sólidos generados, re uso del agua tratada, eficiencia de descontaminación de contaminantes tóxicos, impactos posibles al medio ambiente, y finalmente, la rehabilitación desde el punto de vista de la estabilidad física y química); y finalmente, desde el punto de vista **social** (beneficios positivos de la propuesta, riesgo a las personas, los impactos futuros a la salud, las oportunidades de futuras fuentes de empleo, y finalmente, el grado de satisfacción de la propuesta).

3. Resultados obtenidos

Mediante un balance hídrico, en el cual se consideran también la precipitación y el caudal promedio de bombeo de agua ácida, se obtiene que el área necesaria para la evaporación de los 7.97 l/s, en promedio de agua ácida, es de 44.22 Ha.

Mediante un balance hídrico, en el cual se consideran también la precipitación y el caudal promedio de bombeo de agua ácida, se obtuvo que el área necesaria para la evaporación de los 7.97 l/s, en promedio de agua ácida, es de 44 Ha.

En las zonas circundantes a la Mina San José, no existe dicha disponibilidad de área requerida; por lo que, se buscó en otras zonas que puedan apropiarse para desarrollar la evaporación-cristalización de dichas aguas ácidas. La mejor opción que se encontró, se encuentra en la zona de Itos; donde se dispone de un área disponible de superficie menor a la requerida por el diseño, que alcanza a 16.61 Ha; por lo que, tendría una capacidad para evaporar eficientemente un caudal anual de 93,286.08 m³

o 2.95 l/s. Por tanto, de aplicarse este proceso, sería necesario implementar medidas que ayuden a reducir el caudal actual al mínimo.

Desde el punto de vista económico, la propuesta requiere de un Costo de Inversión de 3.555.006,74 \$us y un Costo Variable Total Anual de 58.686,51 \$us.

El tratamiento bajo el principio de lodos de alta densidad es el más conveniente para el tratamiento de las aguas ácidas por su elevada acidez y elevada presencia de metales pesados

A partir del balance de caudales mostrado, las dimensiones de los reactores necesarios fueron los siguientes:

Reactor de Mezcla: Volumen de 4,9 m³; altura de 3 m y diámetro de 1,4 m; un reactor de cal de 18 m³; altura de 3,5 m y diámetro de 2,6; Clarificador: 13,3 m²; altura de 3 m y diámetro de 4,09 m.

Las pruebas de toxicidad y su comparación con los valores de concentración máximos permisibles establecidos en la normativa 40 CFR 261.30 (EPA 1312) de los lodos obtenidos después del tratamiento con cal, demuestran que se trata de residuos que “no son estables químicamente”; por lo que, su deposición final requerirá de medidas ambientales.

Desde el punto de vista económico, la propuesta requiere de un Costo de Inversión de 518.504,45 \$us y un Costo Variable Total Anual de 820.731,19 \$us.

Los resultados obtenidos del tratamiento en sistemas reductores y productores de alcalinidad (principio de Drenes de Caliza Anoxico o ALD), permiten afirmar que: La cantidad total de caliza, será de 2347,7 toneladas de caliza. Por tanto, las dimensiones de lecho para el Dren Calizo Anóxico serán de:

Profundidad = 2 metros; Ancho = 12 metros; Largo = 61,1 metros y Relación largo: ancho = 5,09:1

Después de las primeras 48 horas de contacto de las aguas ácidas en el dren calizo bajo condiciones anóxicas, la alcalinidad subió hasta 132 mg/lit

En los lapsos posteriores de 48 hrs, la alcalinidad comenzó a bajar notoriamente; luego a 72; 12 y 6 mg/l, a 96; 144 y 192 horas, respectivamente. Esto quiere decir que, el Dren Calizo comienza a “bloquearse” a medida que transcurre el tiempo.

Por lo expuesto, se puede concluir que la aplicación de un “Dren Calizo Anóxico” para el tratamiento industrial de las aguas ácidas de la mina San José, no es técnicamente viable.

El costo total de la propuesta sería de 324052,6 \$us. Su aplicación técnica es “limitada” para el caso de las aguas ácidas de la mina San José; por el elevado contenido de sulfato presentes en las aguas.

Para el tratamiento de las aguas ácidas activo por Neutralización – precipitación con cal y separación sólido-líquido - en interior mina, El consumo de cal mínimo debe ser de 10 gramos por litro de agua ácida tratada. Es decir que, se requerirán de por lo menos 6912 kilogramos de cal por día.

La galería elegida para el tratamiento mediante neutralización – precipitación con cal, se encuentra en el nivel -340 m y tiene

aproximadamente las siguientes dimensiones: Largo: 105 m; Ancho: 2,2 m; y finalmente, Alto: 1,8 m Implica que permitirá tener un volumen de 415,8 m³.

Las aguas ácidas que son bombeadas de los cuadros inundados de la Mina San José, serán en principio llevadas a dicha “galería sellada” y tratadas con la adición de cal la que será introducida en la zona de alimentación de la galería sellada.

Por otra parte, los lodos formados en la “galería sellada” y que han sido decantados, serán recolectados de manera intermitente y serán bombeados y dispuestos en rajos abiertos de manera secuencial. Los lodos serán tratados mediante un proceso de “solidificación por fraguado” que permitirá el sellado de los rajos en retirada. Una pequeña fracción los lodos, será enviada al sector del cuadro, a objeto de simular el método de formación de “lodos de alta densidad”.

Finalmente, las aguas tratadas con un pH de 6, serán bombeadas al exterior desde la “galería sellada”, para ser posteriormente recolectadas en un reservorio en la superficie; a objeto de que las mismas, puedan ser utilizadas para uso de en el campamento y regado de jardines en la zona.

Desde el punto de vista económico, la propuesta a diseño final, requiere de un Costo de Inversión de 282.686,01 \$us y de un Costo Variable Total Anual de 383.918,32 \$us.

3. Consideraciones finales

De los resultados de la valoración técnica, económica, ambiental y social, se concluye que “la mejor alternativa para el tratamiento de las aguas ácidas de la Mina San José es por Neutralización – Precipitación con cal y separación sólido-líquido en interior mina”. Dicha propuesta es de alta innovación tecnológica y única en el mundo. El estudio a diseño final de dicha alternativa, establece que se requiere una inversión para su implementación de 282.686,01 \$us y se requiere un costo variable total anual de 383.918,32 \$us.

El diseño conceptual del tratamiento de las Aguas Ácidas de la Mina San José por Neutralización – Precipitación con Cal en Interior Mina se basa en analizar y evaluar el sitio apropiado de tratamiento (construcción de un estanque en el interior de una galería) a partir de la caracterización geotécnica del macizo rocoso; estudiar las condiciones de reacción de la cal con el agua ácida de mina y la sedimentación de los lodos formados en el proceso de tratamiento físico-químico con cal en el estanque construido en la galería; estudiar los aspectos hidráulicos de bombeo de las aguas ácidas de mina de los niveles inferiores hacia el estanque de reacción y sedimentación; y posteriormente, a su evacuación al exterior; y finalmente, proponer la forma de recolección de los lodos, producto de la precipitación, y su bombeo y disposición en los rajos abiertos ya explotados; y que por fraguado, permitirán el sellado de los mismos; generando así, una mayor estabilidad geotécnica (Hedin, Nairn y Kleinmann, 1994; Perry, Green y Maloney, 1999; Zamora,1996).

Las obras civiles a desarrollar constan de: Construcción de dos diques de hormigón armado, cuyo objetivo es el de formar un estanque en la galería elegida para almacenar el agua ácida que ingresará ya tratada con lechada de cal y que permitirá la separación de los productos precipitados del agua clara. Sus características principales son: Forma: Trapezoidal; Dimensiones: Base de 1.4 x 0.3 metros; Altura desde la cota superior de la base: 1,9 metro; y ancho de la cresta superior del dique: 0,70 metros; Estructura: Tendrá aparte de un “alma” de hierro, el cual será sujetado a una profundidad del piso, que permite tener la seguridad requerida.

Las aguas de rebose del estanque (zona inferior derecha del dique izquierdo), serán expulsadas con una bomba de 30 HP y un caudal de salida de 25 l/s; mientras que, los precipitados obtenidos serán descargados mediante una bomba lamera de 30 HP y que tendrá caudal de salida de 10 l/s de forma discontinua. Las lamas serán bombeadas a los rajos vacíos existentes en sectores ya explotados y abandonados, los cuales se encuentran en el nivel - 340 y a unos 200 metros de distancia.

Marcos de madera serán utilizados para mejorar la estabilidad del macizo rocoso a lo largo de la galería que servirá de estanque. Para este propósito, se reforzará con marcos de madera (Callapos de 6 y 8”) en forma de arcos y se colocarán cada 5 metros.

A los 6 metros del dique de Hormigón Armado de la derecha, en el interior del estanque, perpendicular al flujo de las aguas, se construirá una compuerta de madera cuyo objetivo será el de romper el flujo turbulento de ingreso de las aguas al estanque y generar un flujo laminar para favorecer a la sedimentación de los productos precipitados. La compuerta estará construida y sujeta por dos postes de madera (Callapos de 8”) empotrados en el piso y en el techo y que estarán colocados frente a frente en ángulo recto. Estos callapos serán acanalados en su parte central y en todo el largo del callapo con una profundidad de 2” y un ancho de 2.5”, con el objetivo de introducir tablas de sujeción.

La instalación de la alcayatas de sujeción de tubería a construirse en el lateral longitudinal del estanque para alimentar las aguas al extremo opuesto del estanque.

Éstas tienen el propósito de evitar la caída de la tubería de alimentación, y la de mantener la estabilidad de la misma; éstas serán construidas de madera callapo de 3” e introducidas a la roca en la pared lateral.

En el interior del estanque, se generarán superficies de sedimentación que permitirán favorecer la sedimentación de los precipitados obtenidos del tratamiento de las aguas ácidas de mina con cal. El armado de las áreas de sedimentación laminada será con material antiácido y en contracorriente.

Las condiciones de operación en el tratamiento de las aguas ácidas por neutralización - precipitación en el interior de la mina se resumen en: Tratamiento en el interior mina de un caudal aguas ácidas de 8 lt/seg; es decir que por día, se tratarán 691.2 m³.

El consumo de cal como lechada que ingresa al estanque de tratamiento, determinado en base a pruebas experimentales, será de 10 gramos por litro de agua ácida tratada. Es decir que, se requerirán de por lo menos 6912

kilogramos de cal por día. La fuerte presión de bombeo de las aguas del nivel inferior, será suficiente para poder generar la mezcla de las aguas ácidas de mina con la lechada de cal preparada a 100 g/l.

Las aguas de rebose del estanque de tratamiento serán bombeadas al exterior a un pH de descarga de 6.7; por tanto, dichas descargas cumplirán con la acidez de descarga y en gran medida, la de los límites permisibles de descarga de metales pesados.

De acuerdo a la gráfica de sedimentación, serán necesarios 25 minutos de sedimentación. Los obstáculos introducidos en el estanque del sistema de separación en contra corriente laminada, permitirá la sedimentación de los precipitados formados.

En la zona de rebose, al extremo contrario de la alimentación en el estanque, el agua clara será bombeada para su descarga final por la bocamina.

La descarga de los lodos generados será de manera discontinua mediante una bomba lamera. Se estima que los lodos tendrán un porcentaje de sólidos en su descarga de 24.3%; sin embargo, con la recirculación de un pequeño caudal de los lodos al punto de alimentación en la galería sellada, se tendrá el efecto de la formación de "lodos de alta densidad". Se podría esperar que el porcentaje de sólidos llegue hasta un 37%.

Los mapas actualmente disponibles del Lago Uru Uru permiten determinar inmensas llanuras de inundación; la cobertura vegetal es muy escasa y la evaporación intensa que vuelve a los suelos poco fértiles. Además, se percibe que el lecho del Desaguadero no es muy estable; es decir, en la estación de lluvias, los desbordes inundan inmensas llanuras, la evaporación deja los suelos salados y grandes espejos de agua se pierden debido a este fenómeno.

La contaminación ambiental resultante de las actividades mineras, industriales, transporte y otras; ubicadas en el área urbana y rural, incide de manera directa sobre la salud de la población y la pérdida de la biodiversidad circundante.

La principal fuente de contaminación por metales pesados tóxicos (Cd, As, Sb, Pb, Ni, Co, Cu, Fe y Zn) y acidez, se constituye la descarga de las aguas ácidas de la mina San José.

Por tanto, la aplicación del tratamiento de aguas ácidas de mina mediante el proceso de neutralización – precipitación con cal y en interior mina, tendrá un impacto altamente positivo desde el punto de vista ambiental; puesto que, permitirá la mejora de la biodiversidad acuática y terrestre del Lago Uru Uru y la calidad de vida de sus habitantes a partir de una intervención sostenida de éste valioso recurso natural; es decir, mejor uso del agua para alimentar sistemas de riego, para mantener un nivel ecológico suficiente, para el desarrollo de los peces y para el desarrollo ecoturístico centrado sobre la biodiversidad lacustre.

Desde el punto de vista socio-económico, se subraya la importancia del recurso agua para el desarrollo sostenible de una región deprimida que basa su economía en los recursos naturales del Lago.

Finalmente, la aplicación del tratamiento de aguas ácidas de mina mediante el proceso de neutralización – precipitación con cal y en interior mina, se constituye en una innovación tecnológica interesante y única en el mundo, concebida y desarrollada por expertos bolivianos, que puede ser replicada en otras minas del país; permitiendo así, disminuir el enorme efecto de impacto ambiental que actualmente ocasionan dichas drenajes ácidos tanto a aguas superficiales como a aguas subterráneas.

Referencias

- Ahmed, M., et al (2000), Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants, *Desalination*, 130 (2).
- Faulkner, B. B. y Skousen, J. G. (1994). Treatment of acid mine drainage by passive treatment systems. International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and the Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Pittsburgh, PA. pp. 250-256.
- Hedin, R. S. y Watzlaf. G. R. (1994). The Effects of Anoxic Limestone Drains on Mine Water Chemistry. *International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and the Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, Pittsburgh, PA. pp. 185-194.
- Hedin, R.S., Nairn, R.W. y Kleinmann, R. L. P. (1994). Passive treatment of coal mine drainage. U.S. *Bureau of Mines Information Circular* 9389.
- Ignacio, G. (2000). Tratamiento de Aguas Ácidas de Mina. Proyecto de Grado. UTO-FNI, Oruro.
- Perry, R. H., Green, D. W. y Maloney, J. O. (1999). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill. USA.
- Zamora, G. (1999). Aplicación de Aguas Ácidas de Mina en Procesos de Lixiviación. *Revista Metalúrgica*, 19.
- Zamora, G. (1996). Posibilidades Fisico-Químicas para la Eliminación de Elementos Tóxicos de Efluentes. *II Congreso Nacional de Metalurgia y Ciencia de Materiales*.
- Zamora, G. y Quezada, R., (2003). Aplicación de la evaporación - cristalización como alternativa de tratamiento de aguas ácidas de mina, UTO.