

PROPUESTA TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE LA MINA HUANUNI MEDIANTE DRENES ANÓXICOS CALIZOS Y PRECIPITACIÓN CON CAL EN INTERIOR MINA

Dr. Ing. Gerardo Zamora Echenique¹

Ing. Melissa Mamani Alvarez²

Ing. Elvis Trujillo Lunario³

¹ Universidad Técnica de Oruro, Carrera de Ingeniería de Minas, Petróleos y Geotecnia

e-mail: gerardozamoraechenique@yahoo.es

² Consultor ambiental. e-mail: meli-11-10@gmail.com

³ Universidad Técnica de Oruro, Carrera de Ingeniería de Minas, Petróleos y Geotecnia

e-mail: elvustrujillo@yahoo.es

RESUMEN

La Empresa Minera Huanuni se encuentra en la provincia Pantaleón Dalence del Departamento de Oruro - Bolivia, perteneciente al municipio de Huanuni y situado a 42 Km de la ciudad de Oruro, aproximadamente entre las coordenadas 66° 45' de Longitud Este y 18° 15' de Latitud Sud.

La escasez de agua es severa en la Empresa Minera Huanuni, y se ha generado una gran preocupación para abastecer la nueva planta Lucianita, que operará con una capacidad de 3000 T/día; por tanto, será necesario tratar las aguas ácidas de mina a objeto de que el total del caudal de 60 L/seg pueda ser utilizado en la dicha planta de beneficio de mineral.

El objeto del presente trabajo de investigación, se circunscribe en realizar una propuesta técnica, económica y ambiental para el tratamiento de las aguas ácidas de la Empresa Minera Huanuni mediante el paso de las mismas por drenes anóxicos calizos instalados en interior mina, como una alternativa a la propuesta de la empresa "Asociación Accidental A.A MINAS" de tratamiento convencional con cal; en especial, porque si bien dicha propuesta cumple con la descarga del efluente de pH 6 a 8 apta para el uso industrial, los lodos generados en el proceso no tienen sitio definido de almacenamiento y su transporte a un 20% de sólidos al dique nuevo de colas sería demasiado oneroso por el elevado consumo de energía que representaría; y además, en contacto con las colas sulfurosas, generaría la formación de CaSO₄ que dificultaría su recirculación.

Desde el punto de vista técnico, para la implementación de la propuesta, se calculó que para tratar 60 litros por segundo de aguas ácidas mediante Drenes Anóxicos Calizos en interior mina, considerando además un tiempo de residencia de 15 horas y 20 años de operación de los drenes, se requieren 17,077.29 toneladas de caliza. Los Drenes Anóxicos Calizos serán ubicados en interior mina, en la rampa de ingreso a los niveles inferiores, requiriendo una ampliación de las cámaras 4 y 5 ya existentes hasta alcanzar las dimensiones de 3.5 m de alto, 20 m de ancho y 100 m de largo; y de 3.5 m de alto; 17 m de ancho y 88 m de largo, respectivamente. El efluente de descarga de los Drenes Anóxicos Calizos será sometido a un proceso de precipitación de cal también en interior mina; para ello, se requerirá un reactor de preparación de lechada de cal de 2.5 m de alto y un diámetro de 1.0 m. La lechada de cal será enviada por bombeo a un sedimentador del tipo lamelas, implementado también en el interior de la mina y de dimensiones de 3.5 m de alto, 8 m de ancho y 7 m de largo, situado en una galería muerta ya existente que permitirá la separación del rebalse o agua clara ya tratada que será bombeada por el sistema actual de bombeo hacia la superficie; y por otra, se bombearán los lodos del proceso hacia los tajos libres para su almacenamiento sin problemas ambientales.

Desde el punto de vista económico, la implementación de la propuesta de tratamiento de las aguas ácidas de la mina Huanuni por Drenes Anóxicos Calizos y Precipitación con Cal, requiere de una inversión de 2.31 millones de dólares americanos.

Comparativamente, con el proceso convencional de neutralización – precipitación con cal, el tratamiento de 60 litros por segundo de las aguas ácidas de la Empresa Minera Huanuni requiere de 30.69 toneladas de cal/día; y se formarían 311.66 toneladas de lodos/día; además, los lodos formados por este proceso, "no son estables químicamente" y su manejo provocará la "redisolución de metales pesados". Además, este método de tratamiento implica un costo por el uso de cal de 6.2 millones de \$us/año. Es decir que, para 20 años de operación, se gastarán cerca de 124.44 millones de dólares. Mientras que, con el proceso de Drenes Anóxicos y Precipitación con cal en interior mina propuesto, se generarían solo 132.87 toneladas de lodos/día; los que

además son “estables químicamente”; puesto que, y no son hidróxidos, sino complejos hidroxilados, y serán dispuestos sin riesgos ambientales en 11 rajas vacíos por año en interior mina. Por tanto, el tratamiento de las aguas acidas de la empresa minera Huanuni mediante Drenes Anóxicos y Precipitación con cal en interior mina, es una alternativa técnicamente viable, económicamente más barata (permitiendo un ahorro de 121,91 millones de dólares en 20 años de operación) y ambientalmente más favorable y sin riesgo ambiental con respecto al tratamiento convencional por neutralización – precipitación con cal.

PALABRAS CLAVE

Drenes anóxicos calizos, aguas ácidas de mina, tratamiento

ABSTRACT

The Huanuni Mining Company is located in the Pantaleón Dalence, province of the Department of Oruro - Bolivia, belonging to the municipality of Huanuni and located 42 km from the city of Oruro, approximately between the coordinates 66 ° 45' of Longitude East and 18 ° 15 'of Latitude South.

The lack of water is severe in the Huanuni Mining Company, and great concern has been generated to supply the new Lucianita plant, which will operate with a capacity of 3000 T / day; therefore, it will be necessary to treat acid mine waters in order that the total flow of 60 L / sec can be used in said ore beneficiation plant.

The object of the present research work is limited to making a technical, economic and environmental proposal for the treatment of the water resources of the Huanuni Mining Company by passing them through anoxic calcareous drains installed in the interior of the mine, as an alternative to the proposal of the company "Accidental Association AA MINAS" of conventional treatment with lime; especially, because although said proposal complies with the discharge of the effluent from pH 6 to 8 suitable for industrial use, the sludge generated in the process has no defined storage site and its transport to 20% solids to the new dam queues would be too onerous because of the high energy consumption it would represent; and in addition, in contact with the sulfuric tails, it would generate the formation of CaSO₄ that would hinder its recirculation.

From the technical point of view, for the implementation of the proposal, it was calculated that to treat 60 liters per second of acidic waters through anoxic limestone drains inside the mine, also considering a residence time of 15 hours and 20 years of operation of the drains, 17,077.29 tons of limestone are required. The Anoxic Limestone Drein (ALD) will be located in the interior of the mine, on the entrance ramp to the lower levels, requiring an extension of the existing chambers 4 and 5 to reach the dimensions of 3.5 m high, 20 m wide and 100 m long; and 3.5 m high; 17 m wide and 88 m long, respectively. The discharge effluent from the ALD will be subjected to a lime precipitation process also in the interior of the mine; for this, a lime slurry preparation reactor of 2.5 m high and a diameter of 1 m will be required. The lime slurry will be sent by pumping to a settler of the lamella type, also implemented in the interior of the mine and with dimensions of 3.5 m high, 8 m wide and 7 m long, located in a dead gallery already existing that will allow the separation of the overflow or clear water already treated that will be pumped by the current pumping system to the surface; and on the other, the sludge from the process will be pumped to the free pits for storage without environmental problems.

From the economic point of view, the implementation of the proposed treatment of the acid waters of the Huanuni mine by ALD and Precipitation with Cal requires an investment of 2.31 million US dollars.

Comparatively, with the conventional process of neutralization - precipitation with lime, the treatment of 60 liters per second of the acid waters of the Huanuni Mining Company requires 30.69 tons of lime / day; and 311.66 tons of sludge / day would be formed; In addition, the sludge formed by this process, "are not chemically stable" and its management will cause the "redissolution of heavy metals". In addition, this method of treatment implies a cost for the use of lime of 6.2 million US \$ / year. That is to say, for 20 years of operation, about 124.44 million dollars will be spent. While, with the process of Anoxic Drains and Precipitation with lime in the proposed mine interior, only 132.87 tons of sludge / day would be generated; those that are also "chemically stable"; since, and they are not hydroxides, but hydroxylated complexes, and they will be disposed without environmental risks in 11 empty rajas per year in inner mine.

Therefore, the treatment of the acid waters of the Huanuni mining company by means of Anoxic Drains and Precipitation with lime in the interior of the mine, is a technically viable alternative, economically cheaper (allowing a saving of 121.91 million dollars in 20 years of operation) and environmentally more favorable and without environmental risk with respect to conventional treatment by neutralization - precipitation with lime.

KEYWORDS

Anoxic Limestone Drein, ALD, acid mine waters, treatment, Hunanuni Mine

PROPUESTA TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE LA MINA HUANUNI MEDIANTE DRENES ANÓXICOS CALIZOS Y PRECIPITACIÓN CON CAL EN INTERIOR MINA

1. INTRODUCCIÓN

El yacimiento de Huanuni, como parte del gran macizo del Posokoni, contiguo a los yacimientos aledaños a Japo, Morococala, Santa Fe, Catavi, San José, Colquiri, y a los yacimientos de Llallagua – Siglo XX, correspondiente al grupo Estañífero de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL), está ubicado en la provincia Pantaleón Dalence del Departamento de Oruro - Bolivia, perteneciente al municipio de Huanuni y situado a 42 Km de la ciudad de Oruro.

En la Empresa Minera Huanuni están explotando estaño con métodos de explotación Shirkage (acopio) que tiene las siguientes variantes: Shirkage dejando Puentes, Shirkage con piso falso, Explotación Selectiva y producción de Guía Mina.

1.

Para iniciar la operación de la nueva planta de Lucianita, con una capacidad de tratamiento de 3000 toneladas por día, se requiere el triple de los volúmenes de agua que actualmente se requieren para operar la vetusta planta actual de 1000 toneladas por día. Debido al efecto climatológico de la ausencia de lluvia, se está observando que los caudales de agua son cada vez menores y por esta razón no permitirán abastecer el requerimiento que tiene la nueva planta de la empresa minera Huanuni. Por tanto, será necesario tratar las aguas ácidas de mina a objeto de que el total del caudal de 60 L/seg pueda ser utilizado en la nueva planta de beneficio de mineral.

2. OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo de investigación fue el de realizar un estudio técnico, económico y ambiental para el tratamiento de las aguas ácidas de la Empresa Minera Huanuni en interior mina a partir de pruebas a nivel laboratorio mediante Drenes Anóxicos Calizos y Precipitación con cal.

El objeto de investigación se circunscribe a abordar el problema principal de carencia de agua para el funcionamiento de la nueva planta de procesamiento mineral “Lucianita” a partir de la generación de una propuesta técnica, económica y ambiental de tratamiento de las aguas ácidas de la mina Huanuni mediante drenes anóxicos calizos y el tratamiento del efluente de descarga del mismo por precipitación con cal, ambas etapas en instalaciones ubicadas en el interior de la mina.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Caracterización de las aguas ácidas de la mina Milluni

Los resultados de la caracterización físico-química del Drenaje Ácido de Mina (DAM) o Aguas Ácidas de Mina proveniente del socavón Huanuni, es presentada en la TABLA 1.

TABLA 1: Resultados del análisis de parámetros físicos de la muestra de agua ácida de mina

Parámetro	Norma	Límite de Detección	DAM
Temperatura		+/- 0.1 °C	10.4
pH	ASTM D 1293	+/- 0.01	2.4
Sólidos Disueltos	ASTM D 2540 C	5 ppm	6592
Conductividad	ASTM D 1125	5 µS/cm	3128

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 de la muestra de agua ácida de mina

Elemento	Norma	Límite de Detección (ppm)	DAM (ppm)
Arsénico As	ASTM D 2972	0.002	3.1
Cadmio Cd	ASTM D 3557 A	0,01	0.60
Cobre Cu	ASTM D 1688 A	0,02	15.0
HierroTot. Fe	ASTM D 1068 A	0,03	840
Plomo Pb	ASTM D 3559 A	0,1	0.01
Zinc Zn	ASTM D 1691	0,005	255

Finalmente, el análisis por Aniones de la muestra es resumida en la Tabla 3.

TABLA 3. Resultados del análisis de anión principal del agua ácida de mina

<i>Elemento</i>	Norma	Límite de Detección(ppm)	DAM (ppm)
Sulfato	ASTM D 516	1	3520

El caudal promedio medido fue de 60 litros por segundo y un valor promedio de pH de 2.4

3.2 Resultados y Discusión de las Pruebas de Laboratorio

Pruebas de precipitación con cal en vasos de precipitación de 1 L con agitación mecánica fueron corridas a objeto de determinar los

consumos de cal en la neutralización - precipitación directa de las aguas ácidas de la muestra de la mina Huanuni. La figura 1 muestra los resultados obtenidos.

FIGURA 1: Curva de neutralización-precipitación (consumo de cal vs pH) de las aguas ácidas de mina



De la gráfica anterior se deduce que para alcanzar el pH de 8.5 se requiere cerca de 5.92 gr. de cal por litro de agua ácida de mina. Asimismo, se producen 60.12 g/L de lodos húmedos (10.14 g/L lodo seco).

Los resultados del análisis físico-químico de la muestra de la solución filtrada de dicho proceso de neutralización-precipitación fueron objeto de análisis físico-químico en el Laboratorio acreditado de SPECTROLAB.

Los resultados reportados se presentan en la Tabla 4. Es decir que, considerando los datos de dicha tabla, la concentración de metales pesados disueltos se encuentra por debajo de los límites máximos permisibles de descarga establecidos en la Normativa Ambiental Boliviana.

TABLA 4: Resultados del análisis físico-químico de la solución Filtrada en mg/l

Parámetro	Norma	Límite de Detección	Solución filtrada	Límite Permissible Descarga*
Sólidos Disueltos	ASTM D 2540 C	5 ppm	1707	
Conductividad	ASTM D 1125	5 μ S/cm	2560	
Arsénico As	ASTM D 2972	0.002	<0.002	1.0
Cadmio Cd	ASTM D 3557 A	0.05	<0.05	0.3
Cobre Cu	ASTM D 1688 A	0.05	<0.05	1.0
Hierro Tot. Fe	ASTM D 1068 A	0.02	0.04	1.0
Plomo Pb	ASTM D 3559 A	0.03	<0.03	0.6
Zinc Zn	ASTM D 1691	0.05	0.09	3.0

*Anexo 2: Reglamento en materia de contaminación hídrica – Ley 1333

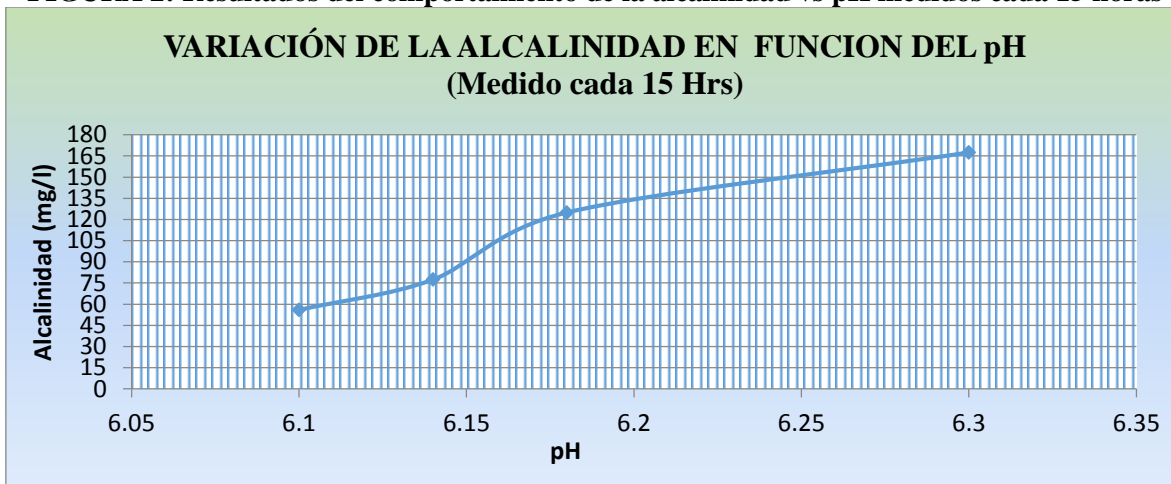
3.3 Pruebas en Drenos Calizos Anóxicos

En un reactor de 30 litros de capacidad se colocó la muestra de agua ácida que fue alimentado a otro reactor también de 30 litros, lleno de piedra caliza con diámetros de - 2” a +1” bajo condiciones anóxicas a objeto de

estudiar el comportamiento de las aguas ácidas en dren calizo anóxico.

Se tomaron muestras cada 15 horas a objeto de determinar el valor de la alcalinidad por titulación. La gráfica siguiente muestra los resultados obtenidos:

FIGURA 2: Resultados del comportamiento de la alcalinidad vs pH medidos cada 15 horas



Al finalizar la prueba, una muestra del efluente de descarga del dren calizo anóxico fue tomada y se envió al laboratorio de SPECTROLAB. Los resultados del análisis

físico-químico en mg/l de dicho efluente se muestran en la siguiente tabla:

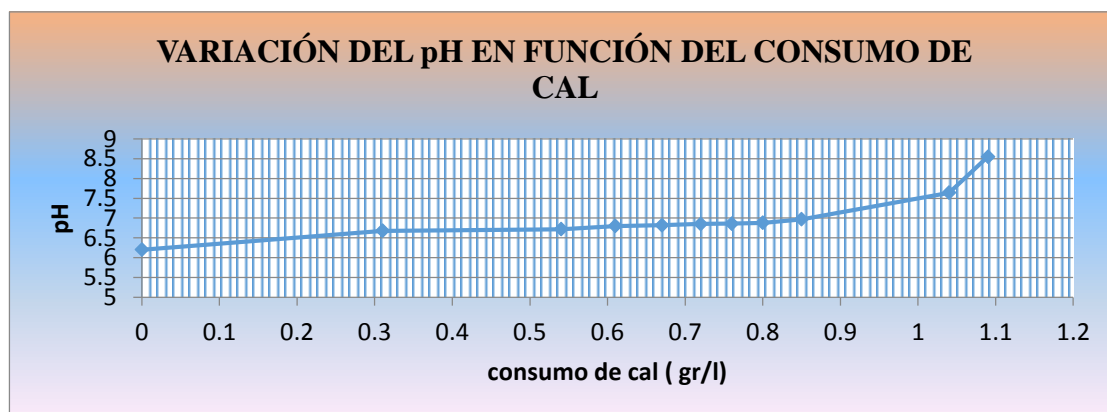
TABLA 5: Resultados del análisis de parámetros físico-químicos de la solución Filtrada en mg/l del efluente de descarga del dren anóxico (SPECTROLAB)

Parámetro	Norma	Límite de Detección	Solución filtrada
pH	ASTM D 1293	+/- 0.01	6.4
Sólidos Disueltos	ASTM D 2540 C	5 ppm	6156
Sulfato SO ₄ ⁼	ASTM D 516	1	3104.36
Arsénico As	ASTM D 2972	0.002	1.2
Cadmio Cd	ASTM D 3557 A	0.05	0.3
Cobre Cu	ASTM D 1688 A	0.05	0.6
ierroTot. Fe	ASTM D 1068 A	0.02	300
Plomo Pb	ASTM D 3559 A	0.03	0.01
Zinc Zn	ASTM D 1691	0.05	175.0

Posteriormente, se realizó una prueba de precipitación de metales con cal de una muestra de un litro del efluente de descarga del tratamiento en dren calizo anóxico. Los

resultados de dicha prueba son presentados en la FIGURA 3.

FIGURA 3. Curva de neutralización-precipitación (consumo de cal vs pH) del efluente de descarga del dren calizo anóxico



De la gráfica anterior se deduce que para alcanzar el pH cercano a 8.5, se requiere de 1,09 gr. de cal por litro de efluente de descarga del dren anóxico calizo. Además, se forman 25.63 gr. de lodo por litro (3.43 gr. Lodo

seco). Los resultados del análisis físico-químico del tratamiento con cal del efluente del dren calizo anóxico se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 6: Resultados del análisis de parámetros físico-químicos de la solución Filtrada en mg/l del efluente de descarga del dren anóxico tratado con cal

Parámetro	Norma	Límite de Detección	Solución
pH	ASTM D 1293	+/- 0.01	8.5
Sólidos Disueltos	ASTM D 2540 C	5 ppm	4764
Sulfato SO ₄ ⁻	ASTM D 516	1	2775.15
Arsénico As	ASTM D 2972	0.002	0.9
Cadmio Cd	ASTM D 3557 A	0.05	0.2
Cobre Cu	ASTM D 1688 A	0.05	0.01
Hierro Tot. Fe	ASTM D 1068 A	0.02	0.01
Plomo Pb	ASTM D 3559 A	0.03	0.01
Zinc Zn	ASTM D 1691	0.05	0.4

4. Propuesta técnica, económica y ambiental para el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Huanuni por Drenes Anóxicos Calizos y Precipitación con Cal en Interior Mina

4.1. Propuesta técnica de implementación en interior mina

a) Diseño y dimensionamiento de los Drenes Anóxicos Calizos

A partir de los resultados de la alcalinidad determinada en las pruebas del dren calizo anóxico, se procedió a diseñar y dimensionar el mismo. La cantidad de caliza necesaria para el tratamiento para un tiempo de residencia de 15 h se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$M = \frac{Q \cdot \rho \cdot t_R}{V_p}$$

Dónde:

Q es el caudal del efluente a tratar = 60 l/seg (216000 l/h).

D es la densidad de la caliza suelta (1,4 Kg/l)

tR es el tiempo de residencia, que debe ser igual a 15 h para lograr el nivel máximo de generación de alcalinidad.

Vp es el volumen de poros expresado en forma decimal (0,5).

Por tanto M es igual a **9072** toneladas de caliza.

Por otra parte, para compensar las pérdidas por disolución durante un periodo de tiempo determinado, la cantidad de caliza requerida se calculó a partir de:

$$M = \frac{Q \cdot C \cdot T}{X}$$

Dónde:

Q es el caudal del efluente a tratar = 60 l/seg (216000 l/h).

C es la concentración esperada de alcalinidad en el efluente tras el tratamiento = 165 mg/l

T es el periodo de tratamiento que se pretende = 20 años (175200 h)

X es el contenido en carbonato cálcico de la caliza expresado en forma decimal (0,78)

Por tanto, el cálculo es de **8005.29** toneladas de caliza.

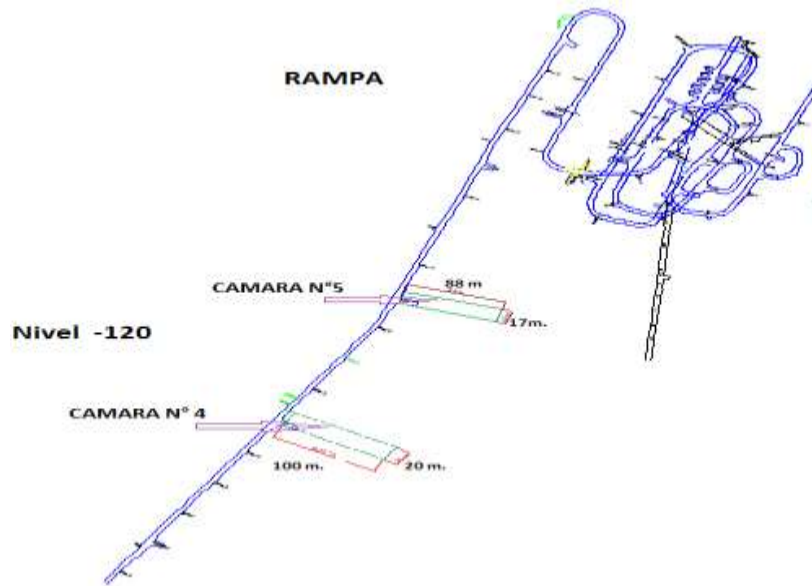
Finalmente, la suma de estas dos ecuaciones representa la cantidad total de caliza, será de **17077.29** toneladas de caliza. Por tanto, las dimensiones del lecho para el Dren Calizo Anóxico calculado y que permitirá tratar 60 l/seg de agua ácida de mina, será de:

Dimensiones	Cámara 4	Cámara 5
m3	6912.24	5285.83
Profundidad (m)	3,5	3.5
Ancho (m)	20	17
Largo (m)	100	88
Rel largo/ancho	5,00	5,17

b) Ubicación de los Drenes Anóxicos Calizos en Interior Mina Como los drenes serán ubicados en el interior de la mina, y en base a galerías de fácil acceso existentes (Cámaras 4 y 5 en la

rampa de acceso al nivel -120 m), se consideró dividir el caudal en dos. Para el cálculo se mantuvo la relación recomendada en la literatura del largo a ancho de 5 a 1.

Figura 4. Ubicación de los Drenes Anóxicos Calizos en interior mina



Se tomaron muestras del macizo roco de las cámaras 4 y 5 a objeto de establecer la calidad de las mismas. Los resultados demuestran que la zona presenta un valor de RMR de 61, considerándose como buena. Para este puntaje

de RMR, se debe además considerar la estabilidad del macizo para la ampliación de dichas galerías en base a la colocación de pernos de anclaje.

c) **Dimensionamiento de muro de contención para las cámara 4 y 5**

Los Drenes Anóxicos Calizos a ser implementados en las cámaras 4 y 5 debidamente ampliadas, requerirán de un

muro de contención a objeto de que tanto la caliza como el agua de tratamiento estén confinadas y en condiciones anaeróbicas. La tabla siguiente, presenta las dimensiones de los mismos:

TABLA 7. Dimensiones del muro de contención de los DAC en las cámaras 4 y 5

ESPECIFICACIONES	UNIDADES	MURO DE CONTENCIÓN CÁMARA 4	MURO DE CONTENCIÓN CÁMARA 5
Altura del muro de contención	m	3.5	3.5
Base zapata	m	2.1	2.1
Dimensión de la columna	m	0.7	0.7
Fuerza de empuje	kg	9800	9800
Base de la punta	m	0.4	0.4
Altura del talón	m	0.7	0.7

d) **Disponibilidad de reservas de la piedra caliza**

El yacimiento de piedra caliza que será utilizado en los Drenes se encuentra en

Culluri, Departamento de Oruro, Provincia Saucarí, Municipio de Toledo, georeferenciado a Latitud: 18.25 y una Longitud: 67.55. Este yacimiento se encuentra

situado a 74.6 Km de la ciudad de Oruro. Se calculó que son necesarios 12807,96 m³ de piedra caliza, que será extraída del yacimiento citado y se transportará en volquetas de 12 cubos, con rumbo a las cámaras 4 y 5 ampliadas.

f) Tratamiento del efluente de Dren Anóxico Calizo con cal en interior mina

El reactor de preparación de lechada de cal, se ubicará también en el interior de la mina, en una cámara ya existente y que se apropia a las dimensiones del reactor (3 m de alto y 3.52 m de diámetro) y a una distancia de aproximadamente 100 m y en el mismo nivel de los Drenes Anóxicos Calizos (nivel -120 m). La lechada será bombeada al fondo de la galería cerrada de mezcla y sedimentación del tipo lamelas, donde se mezclará con el efluente procedente de los dos Drenes Anóxicos Calizos, y permitirá la separación del agua clara (rebose) y los lodos formados. Las dimensiones de dicha galería ya existente y con un muro de contención a ser construido, son de 8 m de ancho, 7 m de longitud y 3 m de altura. Se requerirá un área de sedimentación de 24 m².

g) Sistema de bombeo

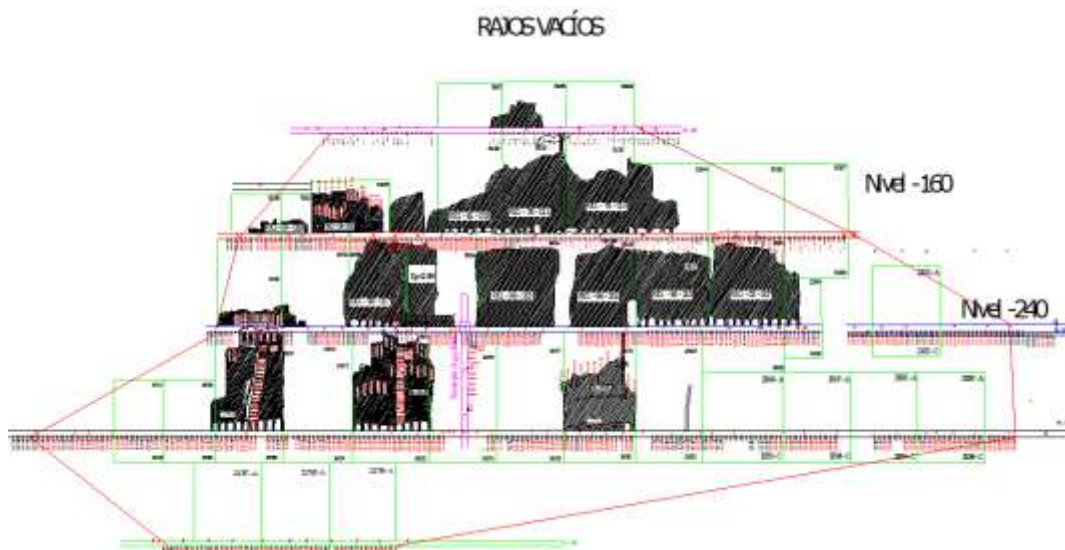
El efluente de descarga del tratamiento en los Drenes Anóxicos Calizos, requiere de una

bomba de 150 Hp para enviar el efluente de descarga hasta el punto más profundo de la galería cerrada de sedimentación por lamelas (distancia de 620 m y altura de carga de 80 m). Así mismo, se requiere de una bomba de 10 Hp para enviar la pulpa de la lechada de cal del reactor de mezcla hasta el extremo más profundo de dicho sedimentador de lamelas (distancia 7 m y altura de carga de 19 m). Por otra parte, se necesita de una bomba para enviar el efluente de descarga o rebalse del sedimentador de lamelas hasta el punto de bombeo que se tiene; para luego, con el sistema ya existente, enviar el efluente tratado hasta la superficie para su uso posterior en la planta de beneficio mineral “Lucianita”. Finalmente se requiere de una bomba lamerá de 30 Hp para transportar los lodos del sedimentador tipo lamelas hasta los rajos o sitios de disposición final de lodos (distancia de 700 m y altura de carga de 32 m).

f) Disposición de los lodos

Los lodos del proceso de tratamiento del efluente del Dren Anóxico Calizo con cal se almacenarán en los rajos vacíos que se encuentran en los niveles -160 y -240 m. Cada rajo permite almacenar un volumen de 1920 m³ (1.2 m x 40 m x 40 m). Es decir, como se producirán 132.87 toneladas de lodos por /día, se llenarán 11 rajos vacíos al año. La figura 33 muestra la ubicación de los rajos vacíos

FIGURA 5. Ubicación de rajos vacíos en el interior de la mina Huanuni



4.2. Aspectos económicos de la implementación de la propuesta de tratamiento de dren anoxico calizo

4.2.1 Costos de inversión y de Implementación de la Propuesta

La tabla siguiente, resume los costos de inversión y de implementación de la propuesta, considerando los ítems siguientes: Ampliación de las cámaras 4 y 5, además de sostenimiento de roca para la implementación de los Drenes Anóxicos Calizos; construcción de los muros de contención tanto de los Drenes como de la galería de

sedimentación; preparación de la galería de sedimentación e implementación de planos inclinados de sedimentación; excavación, trituración y transporte de la piedra caliza del yacimiento Culluri hasta los Drenes Anóxicos Calizos; requerimiento de bombas e instalación del sistema de bombeo; equipamiento e instalación del reactor de preparación de la lechada de cal; además de costos de operación, como materiales e insumos; mano de obra, incluidos beneficios sociales; consumos de energía; y finalmente otros.

TABLA 8. Resumen de Costos para la implementación de la propuesta

Descripción	precio unitario	unidades	requerido	total costo (\$us)
Ampliación de las cámaras	13.36	\$us/m3	6924.4	92480.17
Sostenimiento	10.699014	\$us /m2	3428	36676.22
Compra de la piedra caliza	21.55	\$us / Ton	17931.16	386416.43
Trasporte de la piedra caliza	258.62	\$us /vol	1068	276206.90
Excavación	10	\$us/m ³	12807.97	128079.69
trituración	25	\$us / t	17077.29	426932.31
Muro Contención	2133.83	\$us	3	143243.42
bomba	79443.89	\$us	1	238331.69
Reactor de Mezcla + Agitador	148722.70	\$us	1	148722.70
Cal requerido	0.19	\$us	1866240.0	345755.82
Lameras	2634.60	GLb	1	2634.60
Energía	0.34	\$us /KW	796.73	17333.34
Implementación	263.20	GLb	2	526.40
Personal requerido	1109.29	GLb	21	23295.03
Gastos Administrativos	40575.03	GLb	1	40575.03
total de costo				2307209.75

Es decir, la inversión requerida para la implementación de la propuesta asciende a 2.31 millones de dólares.

4.3 Comparación técnica, económica y ambiental del tratamiento de las aguas acidas de la empresa minera Huanuni con Dren Anóxico Calizo con el tratamiento por lodos de alta densidad (cal)

4.3.1 Comparación técnica

Desde el punto de vista técnico, el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Huanuni por el

proceso convencional con cal, presenta los siguientes datos técnicos:

a. Cantidad de cal requerida para la Precipitación

Para el tratamiento del agua acida de mina, de acuerdo a la figura del pH vs la cantidad de cal a añadir, se demostró que son requeridos 5.92 g de cal/litro de agua ácida de mina; por lo que, para tratar 60 l/seg se requiere: 30.69 toneladas de cal/día.

b. El volumen de lodos a obtener

De acuerdo a los resultados obtenidos, generan 60.12 gramos de lodo/litro de agua ácida de mina; por lo que, para tratar 60 l/seg, se formarán: 311.66 toneladas de lodos/día; además, considerando que dichos lodos presentan una densidad de 2.27 kg/l, ocuparán un volumen de 137.30 m³/día.

Por otra parte, el tratamiento de las aguas ácidas de la empresa minera Huanuni mediante Drenes Calizos Anóxicos presenta los siguientes datos técnicos:

a. El volumen de caliza requerido para tratar 60 l/seg de agua ácida de mina; con un requerimiento total de caliza de **17,077.29** toneladas para una vida útil del dren de 20 años.

b. El efluente de descarga de dicho dren calizo anóxico debe ser tratado mediante precipitación con cal a objeto de precipitar los metales pesados presentes.

c. Cantidad de cal requerida para la precipitación del efluente de descarga del dren calizo

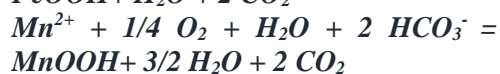
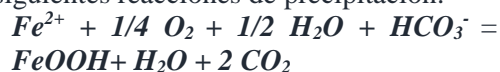
Para el tratamiento del efluente del dren calizo anóxico, de acuerdo a la figura del pH vs la cantidad de cal a añadir, se demostró que son requeridos 1.09 gr. de cal/litro de agua tratada; por lo que, para tratar 60 l/seg se requiere: 5.65 toneladas de cal/día; es decir, se requeriría 25.04 toneladas/día menos que las que se usan para el tratamiento directo de las aguas ácidas por precipitación – neutralización.

d. Volumen de lodos a obtener

De acuerdo a los resultados obtenidos, se generan 25.63 gramos de lodo/litro de agua tratada; por lo que, para tratar 60 l/seg se formarán: 132.87 toneladas de lodos/día; es decir, 178.79 toneladas de lodos/día menos que en el tratamiento directo con cal de las aguas ácidas por precipitación – neutralización.

e. Estabilidad de lodos

La adición de cal a la solución de descarga del dren calizo anóxico generan las siguientes reacciones de precipitación:



Por lo que los productos precipitados ya no son “hidróxidos”; sino compuestos monohidratados. Se conoce que el FeOOH o Goetita “es más estable químicamente” que los hidróxidos de Fe. Además, se ha visto en el desarrollo de las pruebas de que el producto de precipitación es de más fácil filtración.

4.3.2 Comparación económica

Desde el punto de vista económico, el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Huanuni por neutralización-precipitación con cal, presenta los siguientes datos:

Requerimiento de cal: 30.69 toneladas/día; a un costo de aprox. 0.17 \$us/kg; por tanto, el costo de la Cal asciende a 5,216.30 \$/día. Es decir, considerando el costo por la cal y la mano de obra, el costo de tratamiento por neutralización – precipitación con cal asciende a **6, 2 millones de dólares por año**. Finalmente, si consideramos para un tiempo de 20 años, el costo de tratamiento por neutralización – precipitación con cal asciende a cerca de **124.4 millones de dólares**.

Por otra parte, desde el punto de vista económico, el tratamiento de las aguas ácidas de la empresa minera Huanuni por Drenes Anóxicos Calizos y Precipitación con Cal del efluente de descarga, todo en interior mina, presenta un costo total de implementación de **2.6 millones de dólares**.

Es decir que la relación de ahorro por la implementación del tratamiento de las aguas mediante Dren Anóxico calizo representa un equivalente de cerca de **121.8 millones de dólares** en 20 años de operación. ión propia.

4.3.3 Evaluación de impacto ambiental

Desde el punto de vista ambiental, el tratamiento de las aguas ácidas de la empresa minera Huanuni por neutralización - precipitación con cal generará lodos que no son estables químicamente. Se ha señalado que se obtendrán lodos con 20% de sólidos después de la etapa de sedimentación. Se ha determinado que se generarán 47831 toneladas por año. No se tiene en dicho proyecto datos sobre el manejo de los mismos. Sin embargo, se requerirá de un dique para su disposición o en su caso, bombear los mismos 17 km para su descarga en el dique nuevo que se está culminando de construir.

Por otra parte, desde el punto de vista ambiental, los lodos generados por el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Huanuni mediante Drenes Anóxicos Calizos y precipitación del efluente con cal, todo en interior mina, Milluni por Dren Calizo Anóxico, que equivale a 15768 toneladas al año, serán depositados en 11 rajos vacíos abandonados, sin causar ningún riesgo ambiental, ya que son además “estables químicamente”.

5. Conclusiones

Las siguientes conclusiones han sido arribadas del presente trabajo de investigación.

- Las aguas ácidas de la Empresa Minera Huanuni son un proceso natural de oxidación en interior mina de minerales sulfurados en presencia de agua, oxígeno y catalizado por microorganismo del genero thiobacillus Ferrooxidans, en la mina Huanuni reporta un caudal promedio de 60 lt./seg,
- La caracterización físico-química de las aguas ácidas de la mina Huanuni presentan un valor promedio de pH de 2.4, y una fuerte carga de metales pesados que provocarían

problemas técnicos y de corrosión, si se usaran directamente en el nuevo ingenio de procesamiento mineral de Sn “Lucianita”.

a) Estudio del comportamiento de las aguas ácidas de la mina Huanuni con cal y en Drenes Anóxicos Calizos

- Para alcanzar un pH de 8,5 mediante el proceso de neutralización- precipitación convencional con cal del DAM, se requiere cerca de 5,92 gr de cal/ l de agua ácida de mina tratada.
- En las pruebas en el Dren Anóxico Calizo se determinó que para un tiempo de residencia de 15 horas, la alcalinidad alcanzada fue de 165 mg/l. posteriormente, al tratar el efluente de descarga del Dren Anóxico Calizo, y precipitar los metales pesados con la adición de cal, hasta alcanzar el pH cercano a 8.5 se requirió 1.09 gr de cal por litro de agua tratada.

b) Propuesta de una alternativa técnica posible, económicamente viable y ambientalmente amigable para el tratamiento de las aguas ácidas de mina por Drenes Anóxicos Calizos en interior mina para su uso industrial

- La cantidad total de caliza que se calculó para tratar 60 litros por segundo de agua ácida de la mina Huanuni en dos drenes anóxicos calizos a ser implementados en el interior de la mina, y considerando un tiempo de residencia de 15 horas y para 20 años de operación de los drenes, es de 17,077.29 toneladas.
- Las dimensiones de los dos Drenes Anóxicos Calizos para 20 años de operación y con muros de contención son: Dren 1.- 3.5 m de alto, 20 m de ancho y 100 m de profundidad; Dren 2.- 3.5 m de alto, 17 m de ancho y 88 m de profundidad. Estos estarán situados en las actuales cámara 4 y 5, nivel -120 m, que requerirán se ampliadas y requerirán de un adecuado sostenimiento de roca con calidad RSM de buena.
- Se requiere de un reactor de mezcla para la preparación de lechada de cal de 3 m de alto y 3.52 m de diámetro nivel -120 m. La lechada será bombeada al fondo de la galería cerrada de mezcla y sedimentación del tipo lamelas, donde se mezclará con el efluente

procedente de los dos Drenes Anóxicos Calizos, y permitirá la separación del agua clara (rebose) y los lodos formados. Las dimensiones de dicha galería ya existente y con un muro de contención a ser construido, son de 8 m de ancho, 7 m de longitud y 3 m de altura. Se requerirá un área de sedimentación de 24 m².

- La implementación de la propuesta de tratamiento de las aguas ácidas de la mina Huanuni por dos Drenes Anóxicos Calizos y el tratamiento del efluente de descarga de los mismos por Precipitación con Lechada de Cal y Separación en de Sólidos en galería con implementación de lamelas tiene un costo total aprox. de 2.63 millones de dólares.
- Se consideraron las comparaciones técnicas, económicas y ambientales de las alternativa actual de tratamiento a ser implementada mediante neutralización y precipitación convencional con cal con la implementación de la propuesta de los Drenes Anóxicos Calizos y posterior Precipitación con Cal, teniendo un ahorro de aprox. 121.8 millones de dólares, y considerando 20 años de operación.
- La problemática de generación de lodos por el tratamiento convencional de las aguas ácidas de mina con cal (311.66 toneladas/día), que representará un problema ambiental tanto en la disponibilidad de un área para su disposición final o el de su bombeo hasta el dique de colas nuevo ubicado a 17 km de distancia, será eliminado por la propuesta del tratamiento en interior mina por Drenes Anóxicos Calizos y posterior tratamiento del efluente por precipitación con cal; puesto que, los lodos formados que están en forma de complejos hidroxilados son más estables químicamente y serán confinados en los rajos vacíos abandonados.
- Se ha demostrado que el tratamiento de las aguas ácidas de la empresa minera Huanuni mediante Drenes Anóxicos y Precipitación con cal en interior mina, es una alternativa técnicamente viable, económicamente más barata (permitiendo un ahorro de 121,91 millones de dólares en 20 años de operación) y ambientalmente más favorable y sin riesgo ambiental con respecto al tratamiento

convencional por neutralización – precipitación con cal.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. BRODIE, G.A., BRITT, C.R., TOMASZEWSKI, T.M. AND H.N. TAYLOR. 1991. Use of passive anoxic limestone drains to enhance performance of acid drainage treatment wetlands. Proceedings of the 1991 National Meeting of the American Society of Surface Mining and Reclamation, Durango Co. pp. 211-228.
2. BRODIE G.A., BRITT C.R., TOMASZEWSKI T.M. AND H.N. TAYLOR. 1992. Anoxic limestone drains to enhance performance of aerobic acid drainage treatment wetlands - The Tennessee Valley Authority, West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium.
3. BRODIE, G.A. 1993. Staged, aerobic constructed wetlands to treat acid drainage - Case history of Fabius Impoundment 1 and overview of the Tennessee Valley Authority's Program. Wetland Design for Mining Operations. pp. 1-14.
4. CAMBRIDGE, M. 1995. Use of Passive Systems for the Treatment and Remediation of Mine Outflows and Seepages. Minerals Industry International, pp. 35-42.
5. FAULKNER, B.B. AND J.G. SKOUSEN. 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.
6. Fry, I.V., and R.J. MEHLHORN. 1994. Polyurethane and alginate-immobilized algal biomass for the removal of aqueous toxic metals. Emerging Technology for Bioremediation of Metals. J.L. Means and R.E. Hinchey (eds). pp. 130-134.

7. GUSEK, J. 1995. Passive-treatment of acid rock drainage: What is the potential bottom line? *Mining Engineering*, March 1995, pp. 250-253.
8. HEDIN, R.S., Nairn, R.W. and R.L.P. KLEINMANN. 1994. Passive treatment of coal mine drainage. U.S. Bureau of Mines Information Circular 9389.
9. HEDIN, R.S. and G.R. WATZLAF. 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.
10. LAPAKKO, K.A. 1990. Treatment of Waste Rock Drainage with Limestone Beds. *Acid Mine Drainage*
11. NAIRN, R.W., HEDIN, R.S. and G.R. WATZLAF. 1992. Generation of Alkalinity in an Anoxic Limestone Drain. Achieving Land Use Potential through Reclamation, Annual Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation, Duluth Minnesota. pp. 206-219.
12. NAKAMURA, K. 1988. Biological metal removal from mine drainage. U.S. Bureau of Mines Information Circular 9183, pp. 274-278.
13. WILDEMAN, T., SPOTTS, E., SCHAEFER, B. And J. GUSEK. 1994. Characterization, management and treatment of water for metal-mining operations. Short course notes: International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and the Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Pittsburgh, PA.
14. Manifiesto Ambiental, Compañía Minera del Sur (COMSUR), Consultora MINCO, La Paz, 1999.
15. Auditoría Ambiental de Línea Base, Compañía Minera del Sur (COMSUR), Consultora AGRA Herat & Environmental, La Paz, 1998.