

CONTAMINACIÓN MINERA EN BOLIVIA: ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS

Ramiro Escalera Vásquez

Centro de Investigaciones en Procesos Industriales - CIPI

Universidad Privada Boliviana

rescalera@upb.edu

(Recibido el 20 de agosto 2007, aceptado para publicación el 28 de septiembre 2007)

RESUMEN

Se efectúa una revisión exhaustiva de la literatura sobre la contaminación minera en Bolivia y su impacto sobre la calidad de las aguas de la Cuenca del Río Pilcomayo y de la Cuenca del Río Chayanta, ambas en el Departamento de Potosí. Se establecen dos tipos de fuentes principales: (a) los pasivos mineros (desmontes y residuos de colas), principalmente de las empresas de la antigua administración de COMIBOL, que generan aguas ácidas mineras, con altas concentraciones de metales pesados y arsénico, producto de la oxidación de minerales sulfurados y (b) los residuos de colas de los ingenios ubicados en la ciudad de Potosí, con altas concentraciones de metales pesados, que fueron evacuados directamente al Río de la Ribera durante aproximadamente 20 años y que fueron almacenados en el lecho del Río Pilcomayo, incluso en lugares situados hasta 200 km de la fuente.

Las poblaciones pequeñas más afectadas por la contaminación en la cuenca del Río Pilcomayo, por la escasez de recursos hídricos alternativos al río son: Tuero Chico, Puente Mendez y Sotomayor, donde se recomiendan tratamientos de sedimentación y filtración para obtener aguas de calidad aceptable para el consumo humano. En la cuenca del Río Chayanta, la población de Quila Quila es la que tiene mayor riesgo por el alto contenido de cadmio en aguas infiltradas en el lecho del río, las cuales son consumidas en periodo seco.

Se ha realizado una revisión de los procesos tecnológicos activos y pasivos comúnmente disponibles para el tratamiento o remediación de aguas ácidas mineras, donde se comparan sus ventajas y desventajas técnicas y económicas. Dentro de los sistemas activos, la comparación favorece a la oxidación solar por su capacidad de convertir el As (III) más soluble a As (V) menos soluble. En ausencia de As, la neutralización con caliza y posterior precipitación de metales pesados es más recomendable. Ambos procesos son simples y más económicos que las otras alternativas. El tratamiento pasivo más auto sustentable es el provisto por humedales o pantanos artificiales.

Palabras Clave: Pasivos Ambientales Mineros, Agua Ácidas, Metales Pesados Contaminación, Remediación.

1. INTRODUCCIÓN

La industria minera boliviana ha seguido ciclos de producción sujetos a factores externos e internos como la caída y subida del precio de metales en mercados internacionales y la falta de tecnologías para explotación y recuperación metalúrgica, entre otros, provocando que muchas minas paralicen sus actividades, se reactiven en el tiempo o se las abandone.

El cierre de las minas e ingenios metalúrgicos de propiedad de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL) ocurrido hace 20 años ha sido especialmente importante. Este suceso ha conllevado a dos hechos fundamentales: (a) la desatención técnica y jurídica de los pasivos ambientales generados por la minería, que antes de 1986 estaba manejada por la COMIBOL y (b) la aparición de pequeñas cooperativas mineras (desde 1986) como iniciativas de subsistencia caracterizadas por manejos tecnológicos precarios e ineficientes, especialmente dedicados a la explotación y beneficio de complejos polimetálicos de cinc, plomo y plata y que descuidan el tema ambiental.

Muchos de estos sitios permanecen como focos de contaminación, provocando la disminución de la capacidad agrícola del suelo, afectando a la producción ganadera y generando problemas de salud a poblaciones de áreas directamente impactadas.

2. LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS

Según resultados de un estudio ejecutado por el Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas (SERGEOTECMIN) sobre el estado, ubicación e inventario de pasivos mineros y labores mineras abandonadas, a noviembre de 2005, en Bolivia existían 619 minas inventariadas y cerca de 150 millones de toneladas de residuos mineros, de los cuales aproximadamente el 30 % presenta una prioridad moderada o alta para su remediación, según su potencialidad de generar aguas mineras ácidas [1]. Estas minas están ubicadas (en orden de importancia) en departamentos de Potosí, Oruro, La Paz y Cochabamba.

Según el mismo estudio, la mayoría de los residuos minero-metalúrgicos identificados, corresponde a desmontes depositados, de manera generalmente desorganizada, en inmediaciones de las bocaminas. Las colas de procesos de concentración de minerales se presentan en menor cantidad; gran parte de ellas están depositadas en áreas sin tratamiento previo y son escasas las que están depositadas en diques de colas.

Los pasivos mineros más importantes en el Departamento de Potosí, por su volumen (mayor a 1 000 000 ton) y su alto potencial de contaminación se presentan en la Tabla 1 [1].

TABLA 1 - DISTRIBUCIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MAYORES A 1 000 000 TON [1]

Distrito	Mina, Ingenio	Cuenca afectada
Llallagua	Siglo XX, Catavi	Río Chayanta
Potosí-Karikari	Cerro Rico, Unificada	Río de la Ribera, Aljamayu, Tarapaya, Pilcomayo
Andacaba- Kumura		Río Caiza, Río Tumusla
Porco	Porco	Río Caiza, Río Tumusla
Pulacayo - Kosuño	Huanchaca	Río Quechisla, Río Cotagaita, Río Tumusla
Tasna	Tasna	Río Quechisla, Río Cotagaita, Río Tumusla

(*) Distritos mineros tradicionales en el departamento de Potosí.

Cuando los minerales sulfurados, piritita (FeS_2), arseno piritita ($FeAs$), calcocita (Cu_2S), galena (PbS), esfalerita (ZnS) y otros, se exponen al medio ambiente (agua, oxígeno y microorganismos), se generan lixiviados (llamados aguas mineras) similares al drenaje ácido de minas, los cuales se caracterizan por sus elevadas concentraciones de metales pesados disueltos y sulfatos. Según Sengupta [2], las fuentes de aguas mineras incluyen, entre otros, a desmontes de gangas de actividades mineras, colas de molienda, pilas de minerales residuales de operaciones de lixiviación, que corresponden precisamente a los tipos de residuos mayoritarios mencionados.

TABLA 2 - COMPOSICIÓN DE AGUAS MINERAS DE ALGUNOS DISTRITOS MINEROS DE BOLIVIA

Componente	A (1999)	B (1999)	B' (2006)	C (1999)	C' (2006)	D (1999)	E (lluvias, 1999)	F (2006)
Al, mg/l	352-503							248.5
As, mg/l	24-34		9.785		5.4145			235.2
Cd, mg/l	3.3-5.7	16.4 - 24	12.085	4.6	5.959		1.50	0.1876
Cu, mg/l	24-32	182 - 198	18.835	112	3.712	5.20-6.20	96	149.35
Fe, mg/l	817-1010		388.75		472.45			206.35
Pb, mg/l	0.03-0.05				0.00677			0.465
Mn, mg/l	16-93		52.5		242.3			8.206
Ni, mg/l	0.8-4.3		0.8685		2.603			8.652
Zn, mg/l	250-485	1050 - 1100	1034.95	710	811.7	60 - 75	529	13.575
Sulfato, mg/l	-	31 000		19 600		1290 (lluvias)	9 690	
pH, -	2.1-2.4	2.22 - 2.28	2.56	1.86		2.99-3.14	2.38	2.31
Cuenca que contamina	Río Chayanta - Río Caine	Río de la Ribera - Río Pilcomayo	Río Tasna - Río Quechisla- Río Pilcomayo					

A: Mina Siglo XX, Norte de Potosí [3]

B: Drenaje ácido de minas, Cerro Rico de Potosí, Real Socavón [4]

B': Drenaje ácido de minas, Cerro Rico de Potosí, Real Socavón [5]

C: Desmontes de minerales de baja ley. Nordeste del Cerro Rico de Potosí, [4]

C': Desmontes de minerales de baja ley. Nordeste del Cerro Rico de Potosí, [5]

D: Depósitos de colas de separación gravimétrica de estaño, San Miguel, Oeste del Cerro Rico de Potosí, [4]

E: Depósitos de colas de flotación de plomo y zinc, San Miguel, Oeste del Cerro Rico de Potosí, [4]

F: Agua no filtrada de mina Tasna, Potosí central [6]

El potencial de generación de aguas ácidas ha sido comprobada por diversos estudios realizados desde 1998 en las minas que tuvieron mayor importancia durante la minería del estaño (antes de 1985) y que produjeron grandes volúmenes de residuos de desmontes y colas de procesos de concentración. La Tabla 2 ilustra las concentraciones de metales pesados en aguas mineras provenientes de los pasivos ambientales existentes en las cercanías del Cerro Rico (Distrito de Potosí-Karikari), la Mina Siglo XX (Distrito de Llallagua) y la mina Tasna (Distrito de Tasna), todas ubicadas en el Departamento de Potosí.

3. LOS INGENIOS DE COOPERATIVAS MINERAS EN POTOSÍ

La minería del estaño tuvo su auge entre 1900 y 1985, considerándose a Bolivia como segundo o tercer productor mundial, después de Malasia e Indonesia. La tecnología empleada en la concentración de estaño, en este período, se basaba en el proceso hidro-metalúrgico de flotación-sedimentación (sink & float), con la generación de residuos particulados gruesos que se acumularon en desmontes, siendo los residuos finos tratados en estanques (diques de colas) donde sedimentaban.

El año 1985, a causa de la caída de los precios del estaño y otros minerales, varias empresas de la COMIBOL ocasionaban pérdidas económicas muy importantes al país, por lo que el gobierno aplicó políticas de libre mercado para estabilizar la situación inflacionaria del país que había alcanzado niveles extremadamente altos. De esta manera, decidió cerrar las empresas deficitarias de COMIBOL, algunas de las cuales explotaban los minerales polimetálicos del Cerro Rico. Surgieron, entonces, empresas mineras pequeñas y cooperativas mineras que se dedicaron, principalmente, a la explotación de zinc, plomo y plata, adoptando la tecnología basada en los procesos de trituración-molienda y flotación, los cuales generan residuos de partículas finas de 0.050 – 0.300 mm de tamaño. En el transcurso del período comprendido entre 1985 y la actualidad, se establecieron aproximadamente 40 ingenios en las orillas del río de la Ribera en la ciudad de Potosí, hacia el cual evacuaban los residuos de colas en forma directa, sin tratamiento, ocasionando un serio problema de contaminación ambiental, especialmente en la cuenca alta del río Pilcomayo, tanto por la concentración elevada de metales pesados, como por el largo periodo de evacuación. Se estima que durante gran parte del período comprendido entre 1985 y 2004, los 40 ingenios desecharon sus residuos de colas a una tasa de 1000-1300 ton/día de sedimentos con altas concentraciones de metales pesados [3]. La composición de estas colas se muestra en la Tabla 3, según el estudio ejecutado por Mitsui Co. Ltd [4].

TABLA 3 - ANÁLISIS DE COLAS DE INGENIOS, OCTUBRE DE 1998 [4]

			Ingenio A	Ingenio B	Ingenio C	Ingenio D	Ingenio E	Ingenio F
Mineral	Sn	%	0.17	0.68	0.55	0.24	0.66	0.27
	Pb	%	1.10	0.10	4.57	0.15	0.19	0.11
	Ag	g/t	171.90	14.00	666.70	152.9	130.90	56.90
	Zn	%	3.90	0.62	6.34	0.48	0.92	0.60
	Cd	%	0.18	0.02	0.006	0.19	0.04	0.01
	Fe	%	15.90	7.84	21.08	17.75	7.61	4.74
Agua	SS	mg/l	152 000	97 300	31 800	75 200	79 500	95 800
	pH		12.09	11.39	6.01 *	12.40	11.66	7.24 *

* Valores considerados dudosos por Mitsui por ser diferentes a los valores típicos de los demás ingenios

Esta práctica continuó hasta octubre de 2004, cuando entró en funcionamiento el dique provisional de colas de Laguna Pampa cerca de la comunidad de Cantumarca, a orillas del río de la Ribera. Actualmente, casi la totalidad de los ingenios conducen sus desechos hacia este sistema de tratamiento.

Desde 1996 a la fecha se han realizado diversos estudios sobre la calidad de las aguas de la cuenca del Río Pilcomayo, en puntos de muestreo que van desde la ciudad de Potosí hasta las zonas paraguaya y argentina. Estos estudios midieron las concentraciones de metales pesados en aguas filtradas, sin filtrar y en sedimentos de lecho de río. Los resultados compilados y analizados por Escalera [7], demuestran lo siguiente:

- La zona que sufre la mayor contaminación por metales pesados es la cuenca alta del río, desde el río de la Ribera hasta la zona de Sotomayor, Icla y Soroma a 180-200 km de la ciudad de Potosí. En la cuenca media, que va desde la confluencia con el río Pilaya hasta Misión La Paz en la República Argentina, la contaminación es leve.
- La contaminación minera proviene del drenaje ácido de minas, la lixiviación de colas de desmontes y, preponderantemente, de los sedimentos sulfurados (que contienen elevadas concentraciones de metales pesados) almacenados en el lecho del río, que fueron desechados continuamente por los ingenios mineros que estuvieron funcionando desde 1985.
- La mayor cantidad de sedimentos se almacenó en la zona que comprende la subcuenca del río Tarapaya a una tasa de 1100 t/d hasta octubre de 2004, mes en el que entró en funcionamiento regular el dique de colas provisional de Laguna Pampa
- Las aguas ácidas en pequeños caudales se neutralizan con las aguas de salida del dique de colas de Laguna Pampa (pH alto), reduciendo significativamente las concentraciones de metales pesados disueltos.
- Los elementos contaminantes encontrados en los sedimentos de la cuenca son, en orden decreciente de concentración, los siguientes: S > Zn > Sn > Pb > Cu > As > Ag > Cd > Hg > = Sb.

- Los ríos de la cuenca tienen una buena capacidad amortiguadora del descenso de pH que no permite una disolución significativa de metales pesados contenidos en sedimentos, aún en la zona de Potosí.

La Tabla 4 ilustra una comparación de las concentraciones de As, Pb, Cd y Zn, en aguas filtradas, observadas en la cuenca alta del río Pilcomayo hasta 200 km de la ciudad de Potosí, antes y después de la puesta en marcha del dique de colas de Laguna Pampa en octubre de 2004. Se compararon los resultados generados por varios estudios realizados por investigadores de varias universidades europeas [8, 9], consultores japoneses [4], el Proyecto Pilcomayo [10] (dependiente de la Comisión Trinacional para el Manejo Integrado de la Cuenca del Río Pilcomayo) y el Centro de Investigaciones Mineras y Ambientales (CIMA) de la Universidad Tomas Frías de Potosí [11].

TABLA 4 - METALES PESADOS DISUELTOS EN AGUA DE RÍO. POBLACIONES SITUADAS A ORILLAS DEL RIO PILCOMAYO [4], [8], [9], [10], [11]

	As, µg/l		Pb, µg/l		Cd, µg/l		Zn, µg/l	
	1997-2004	2004 -	1997-2004	2004 -	1997-2004	2004 -	1997-2004	2004 -
Río Tarapaya (15 km)	<u>17.2</u> (6.4 - 29.5)	7.1 (1.8 - 11.7)	<u>44.6</u> (1.9 - 200)	2.4 (0.32 - 5.66)	<u>16.1</u> (0.72 - 40)	<u>12.53</u> (0.4 - 36.8)	1151 (86.4-1280)	<u>4660</u> (10-18470)
Tasapampa, Tuero Chico, Puente Sucre, (140-150 km)	<u>39.4</u> (16.9 - 100)	5.5 (4 - 9.5)	<u>24.9</u> (1.43 - 30)	4.0 (0.69-10)	<u>23.74</u> (0.76-60)	0.74 (0.14-2)	158 (28-282)	95.3 (<5 -140)
Sotomayor, Icla Uyuni (180-200 km)	<u>33.7</u> (13.9 - 5.2)	3 (3)	<u>59.1</u> (3.36 - 150)	< 10 (<10)	1.5 (0.3-2.2)	< 2 (<2)	91.3 (41-123)	41.5 (13-70)
Guía OMS	10		10		5		2000	

Nota: Se presentan los valores promedio y el recorrido (entre paréntesis). Los valores subrayados en negrilla son mayores a los valores guía recomendados por la OMS.

En general, se observa que las concentraciones promedio de metales disueltos antes del funcionamiento del dique de colas eran superiores a los valores guía hasta poblaciones que están a 200 km de la fuente de contaminación. Después de 2004, dichas concentraciones han disminuido y la mayoría de los valores promedio satisfacen los límites guía.

4. POBLACIONES CON ESCASOS RECURSOS DE AGUA POTABLE Y DE CULTIVO

(a) Cuenca del río Pilcomayo

En la Tabla 4 se han tomado en cuenta lugares de muestreo que están muy próximas a poblaciones que se encuentran situadas a las orillas del Río Pilcomayo. A continuación se describe muy sucintamente su situación de acceso a fuentes de agua potable y agua para riego

- En la población de Mondragón a orillas del río Tarapaya (26 km de los ingenios de Potosí). La irrigación de cultivos se realiza con manantiales pequeños que vienen de las colinas adyacentes. La fuente principal de agua de bebida y de riego es un pequeño tributario que fluye al río Tarapaya [9]
- En la comunidad Puente Sucre hay 18 familias que no cuentan con agua potable suficiente, lo que provoca escasez de agua y tendrían que obtenerla directamente del río contaminado (Pilcomayo) que es la única fuente con que cuentan [12]
- En la comunidad Tuero Chico (de 32 familias) no se ubicaron fuentes cercanas, ya sea de ríos, quebradas u otra alternativa para el consumo de los animales. Existe una fuente algo alejada para agua potable, por lo que se hace necesario buscar otra alternativa para animales [12].
- En la comunidad de Tasapampa (de 82 familias) existe un sistema de riego proveniente del Río Cachimayu, construido por la alcaldía municipal de Yotala en 2001 que actualmente riega 47 ha.
- En la comunidad de Sotomayor (de 223 familias) la producción agrícola en la comunidad es de importancia, ya que se cultivan hortalizas prácticamente todo el año, utilizando el agua de riego proveniente del Río Pilcomayo que no es de buena calidad, debido a que se encuentra contaminada con metales pesados. Se está construyendo una planta de tratamiento de metales pesados por el Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro del Río Pilcomayo (Trinacional) que será entregada a la comunidad en la gestión 2007.

De los datos mostrados en la Tabla 4, se puede afirmar que se hace muy necesario separar los sólidos coloidales y sedimentables del agua de río en las comunidades mencionadas (excepto Sotomayor) para su uso como agua potable y

agua de riego. Esta remoción se puede encarar con sistemas de sedimentación y filtración convencionales, con la construcción de galerías filtrantes o con la infiltración del agua a través del lecho de río.

(b) Cuenca del río Chayanta [13]

▪ **Población de Quila-Quila**

Quila Quila está localizada en la Provincia Bustillo del Departamento de Potosí a unos 75 km de los centros mineros de Siglo XX y Catavi, los más importantes de la antigua COMIBOL. La población es de 400 habitantes (50% migrantes). La agricultura es la principal actividad con producción de vegetales, papa y cereales que son irrigados todos el año con aguas del río Chayanta.

El río Chayanta recibe las aguas ácidas de los centros mineros de Siglo XX - Catavi, a través de sus tributarios. La calidad de las aguas del río en periodo seco se muestra en la Tabla 5 a manera de comparación con las otras fuentes de agua potable y el agua infiltrada a través del lecho del río. En periodo seco (abril-noviembre) los habitantes del lugar utilizan como agua de consumo, las aguas del río Chayanta infiltrada a través de su lecho en una depresión de 2 m de diámetro y 1 m de profundidad. Esta agua es trasladada en recipientes por los pobladores hasta sus viviendas.

Encuestas realizadas a los pobladores de Quila Quila muestran que gran parte de la población encuestada, presenta problemas de salud (dolores frecuentes de cabeza, estómago, vómitos, diarreas y enfermedades de piel), atribuyendo dichos problemas a la calidad de agua que consumen. La calidad de las aguas de suministro de la población es la que se presenta en la Tabla 5.

TABLA 5 - CONCENTRACIÓN DE METALES EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO Y AGUA DE RÍO EN QUILA QUILA [13]

Parámetro	Unidades	Agua vertiente Quila Quila	Tanque I	Tanque II	Tanque III	Agua infiltrada del Río Chayanta	Agua del Río Chayanta	Valor límite (*)
pH							<u>4.6</u> - 6.9	6.5 - 8.5
Aluminio	mg/l	<u>14</u>	<u>1 - 20</u>	<u>1 - 65</u>	<u>1 - 13</u>	0.02 - 0.05	<u>4.5-9.6</u>	0.2
Antimonio	µg/l	< 4	< 4	< 4	< 4	4 - <u>7</u>	< 4 - <u>10</u>	5
Arsénico	µg/l	<u>16</u>	<u>16</u>	2-4	2 - 5	1 - 4	6.0 - <u>24</u>	10
Cadmio	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	<u>25 - 63</u>	<u>260 - 2620</u>	5
Cromo	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	1 - 3	< 10	50
Cobalto	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	22 - 99	100
Cobre	µg/l	3	3 - 4	4-5	4-6	5 - 14	205 - 812	1000
Hierro	mg/l	<u>45</u>	<u>31 - 101</u>	<u>27 - 309</u>	<u>81 - 447</u>	0.08 - 0.3	<u>3.1 - 15</u>	0.3
Plomo	µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	2	<u>10 - 21</u>	10
Manganeso	mg/l	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	<u>1.2 - 2.4</u>	0.1
Molibdeno	µg/l	7	6 - 8	3-5	2 - 3	2 - 3	2.0 - 10	70
Níquel	µg/l	< 5	< 5	< 5	< 5	20 - 23	<u>110 - 332</u>	50
Selenio	µg/l	<u>20</u>	<u>20- 23</u>	<u>18 - 29</u>	3 -16	2 - 10	5.0 - <u>20</u>	10
Estaño	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	2000
Zinc	mg/l	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	0.2 - 0.3	<u>15 - 26</u>	5

(*) Norma boliviana para agua de consumo humano (NB 512, 2004). Los valores en negrilla subrayados son superiores a la Norma Se observa que las aguas de vertiente y las aguas almacenadas de la población de Quila Quila poseen concentraciones menores a los requeridos por la Norma Boliviana a excepción del arsénico (2-16 µg/l), aluminio (1-65 mg/l), hierro (27-447 mg/l) y selenio (3-29 µg/l). Estos minerales pueden estar presentes en el subsuelo [13].

Las aguas infiltradas que son consumidas para beber en periodo seco tienen concentraciones muy altas de cadmio. El cadmio es un metal muy tóxico para la salud humana, debido a su capacidad de reemplazar al cinc y al calcio bioquímicamente. Puede causar la enfermedad ósea degenerativa llamada *itai-itai*, presión alta, destruye el tejido celular y se acumula en los riñones y en el hígado por largos periodos de tiempo (vida media entre 10 y 35 años) [14], [15].

5. PROCESOS ALTERNATIVOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS MINERAS ÁCIDAS

Los estudios anteriores demuestran que el problema principal y más extendido en Bolivia respecto de la contaminación de aguas naturales por metales pesados, es el aportado por los pasivos ambientales mineros con la generación de aguas

ácidas con elevadísimas concentraciones de metales pesados disueltos. Esta situación prevalecerá por largo tiempo, a menos que parte de esos pasivos ambientales sean aprovechados a través de procesos metalúrgicos cuya viabilidad técnica y económica haya sido demostrada. Consecuentemente, es necesario que se implementen medidas de remediación y mitigación de los impactos de esas aguas mineras.

El control de la contaminación por aguas mineras ácidas, puede realizarse en tres etapas [2]:

- Control del proceso de generación ácida (prevención e inhibición en la fuente)
- Control de la migración de aguas ácidas
- Recolección y tratamiento de aguas ácidas mineras

La opción más conveniente es el control de la generación de aguas ácidas *in situ*. Según Brown et al [16] y Sengupta [2], la oxidación de los sulfuros puede prevenirse o reducirse mediante los siguientes procesos:

- Evitar el contacto significativo con aguas superficiales, precipitación pluvial y aguas subterráneas, mediante barreras impermeables (cubiertas, sellos) tales como, membranas sintéticas, concreto, suelos impermeables, etc. Esta acción limita la formación de ácidos y también limita el transporte de los productos de oxidación a los medios acuáticos.
- Evitar el contacto de oxígeno a través de cubiertas que provean una baja difusión de oxígeno. Por ejemplo, suelos, arcillas compactadas, materiales sintéticos (PVC, polietileno de alta densidad y otros). En general, la exclusión de oxígeno es más práctica que la exclusión de agua
- Control del pH: el agua puede mantenerse alcalina mediante la mezcla de los minerales sulfurados con materiales alcalinos e.g. piedra caliza.
- Control de la actividad bacteriana mediante bactericidas (tenso-activos aniónicos, ácidos orgánicos y otros).

Cuando la generación de ácidos no se previene o se reduce, la migración de las aguas ácidas debe prevenirse o reducirse. Una de las maneras para lograr esto se basa en la prevención del ingreso de agua en la roca sulfurada. El ingreso de agua puede controlarse mediante el desvío de las aguas superficiales al área de las rocas, la prevención de la infiltración y la localización controlada del residuo generador de ácidos [16].

Una alternativa novedosa es el uso de barreras reactivas permeables (BRPs). Las BRPs son zonas permeables que interceptan y remedian una vertiente de agua subterránea. En lugar de impermeabilizar el flujo, tiene un efecto mitigante sobre el flujo migrante. Varias fuentes de carbono orgánico (compost, lodos biológicos, aserrín o astillas de madera, bosta de ovejas, celulosa) se utilizan comúnmente para inducir la reducción bacteriana de sulfatos, seguida de la precipitación de sulfuros de metales pesados. Este proceso se usó para disminuir la concentración de Fe, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en aguas subterráneas [17], [18].

La tercera opción es tratar el agua para neutralizar la acidez y remover los metales y sólidos suspendidos. Existen dos alternativas: el tratamiento activo, que requiere una operación y mantenimiento continuos, y el tratamiento pasivo, el cual debe autosustentarse.

5.1 Sistemas activos

Los sistemas activos se usan generalmente en minas que están en operación, donde la fuerza laboral y los medios financieros están disponibles. El tratamiento pasivo es mucho más atractivo para minas abandonadas y pasivos ambientales.

Las principales técnicas para el tratamiento activo son [16]:

(a) Neutralización y precipitación

Se basa en la adición de materiales alcalinos para elevar el pH de manera que el hierro y los metales pesados se precipiten. Los materiales más convenientes son la cal viva, la piedra caliza, la soda cáustica y el carbonato de sodio.

(b) Aireación del agua (por cascadas) o adición de oxidantes

Permiten la oxidación del Fe(II) a Fe (III) y el Mn(II) a Mn(IV), los cuales son menos solubles. La adición de coagulantes (sulfato de aluminio, cloruro férrico) y promotores floculantes ayudan en los procesos de coagulación y floculación, además de mejorar la eficiencia de la precipitación.

(c) Intercambio iónico

La pureza y la concentración de los metales en los lodos que se obtienen en la neutralización es en general insuficiente para permitir una recuperación rentable de metales. El intercambio iónico permite remover los metales de las aguas mineras ácidas. Posteriormente el metal puede eluirse para obtener una concentración mucho más alta. Los intercambiadores iónicos son a menudo muy caros y los flujos muy altos para permitir una recuperación rentables de metales. El desarrollo de intercambiadores más económicos y novedosos permitirá una mejor rentabilidad.

(d) Tratamiento biológico

Las bacterias sulfato reductoras (BSRs) pueden utilizarse en bioreactores para tratar aguas mineras ácidas. Las BSRs son anaerobias, heterotróficas que causan la reducción del ión sulfato a ión sulfuro que precipita los iones metálicos como sulfuros de metal [19]. Se han ejecutado investigaciones a escala de laboratorio, escala piloto y escala industrial. Tabak et al [20] condujo biotratamientos *ex-situ* de aguas ácidas mineras mediante precipitación selectiva secuencial (PSS) para recuperar metales en forma de hidróxidos y sulfuros y se reportaron las siguientes recuperaciones: aluminio 99.8% (como hidróxido), cadmio 99.7% (como sulfuro), cobalto 99.1% (como sulfuro), cobre 99.8% (como sulfuro), ión ferroso 97.1% (como sulfuro), manganeso 87.4% (como sulfuro), níquel 47.8% (como sulfuro) y finalmente cinc 100% (como sulfuro) con purezas entre 75 y 97.8%. Foucher et al [21] reporta recuperaciones de cobre a pH = 2.8 y cinc a pH = 3.5 usando BSRs.

(e) Procesos de membrana

La ósmosis reversa puede usarse para producir agua de alta pureza a partir de aguas ácidas mineras. La microfiltración con un retrolavado apropiado puede remover los sólidos suspendidos y asegurar una calidad consistente en la alimentación al proceso de ósmosis reversa.

(f) Oxidación fotoquímica [22]

En este proceso, la oxidación en medio ácido (pH 1 a 3) del arsénico As(III) a As (V) aguas aireadas (manteniendo una presión parcial de oxígeno no menor a 0,20 atm) y bajo la acción de radiación UV (254 nm – 350 nm), provista por lámparas de Hg o por la radiación solar, se ve favorecida por la presencia de foto absorbedores como el Fe (II) o Fe (III) y el Cu (II), los cuales aceleran la oxidación del arsénico en presencia de sulfatos. La remoción del arsénico, el cobre y otros metales pesados se logra a través de la co-precipitación con el Fe (III) en condiciones de pH próximo a neutro (> a 5), añadiendo cal apagada. La velocidad de la oxidación se reduce en presencia de turbiedad provocada o excesiva concentración de Fe (III). La relación molar óptima de Fe/As está entre 4 y 7. La oxidación solar se logra en 2 horas aproximadamente y la oxidación con lámparas UV en menos de media hora (15 a 30 minutos).

Considerando las características de las aguas mineras ácidas bolivianas, las cuales tienen altas concentraciones de hierro, sulfatos, arsénico, cobre y otros metales pesados, este proceso podría ser utilizado en la detoxificación con algunas ventajas sobre los otros procesos ya descritos. Estas ventajas son las siguientes:

- La precipitación por neutralización, sin previa oxidación del As (III) a As (V) no es tan eficiente para remoción de este elemento, debido a que el As (V) co-precipita más fácilmente que el As (III). Es decir se obtienen mayores eficacias de tratamiento con la foto-oxidación [22].
- Los procesos de intercambio iónico y microfiltración son muy caros si se los compara con el resto de los procesos, especialmente con los de la foto-oxidación y neutralización – precipitación.
- El tratamiento biológico puede ocasionar el desprendimiento de sulfuro de hidrógeno (malos olores) como producto de la reducción de los sulfatos. Además, se requieren tiempos de proceso más largos que en la foto – oxidación por radiación solar.

5.2 Sistemas pasivos

El tratamiento pasivo puede ser químico y biológico.

(a) Tratamiento químico

En el tratamiento químico, el ácido se neutraliza y los metales precipitan sin necesidad de la adición activa de reactivos alcalinos, dejando que el agua ácida fluya a través de un lecho de caliza. Es conveniente para pequeños flujos con concentraciones bastante bajas de hierro. Con concentraciones altas de hierro el hidróxido férrico formado cubre la

superficie de las partículas de caliza previniendo el contacto con el agua ácida. Alternativamente, en un lecho de caliza anóxico la mayoría del hierro permanece en estado ferroso y no se precipita el hidróxido férrico. Sin embargo, los sistemas tienen un ciclo de vida limitado debido a la disolución de la caliza y al atascamiento de los poros.

(b) Tratamiento biológico

Los sistemas estrictamente autosustentables y por lo tanto estrictamente pasivos son los sistemas biológicos, principalmente los humedales. Los humedales, tanto naturales como artificiales comprenden los siguientes componentes [16]:

- Substratos con diferentes porosidades: suelos naturales, mezclas de suelos, cenizas de plantas termoeléctricas a carbón mineral y otros
- Plantas adaptadas
- Columna de agua: el agua fluye dentro o encima del substrato
- Vertebrados e invertebrados
- Microorganismos aerobios y anaerobios

Los humedales proveen un ambiente donde tienen lugar la neutralización de las aguas mineras ácidas y la precipitación de metales pesados. La población microbiana es de suma importancia, el substrato y las plantas proveen los nutrientes y un área superficial incrementada sobre la cual se adhieren los microorganismos.

Los principales procesos que suceden son las reacciones de oxidación y reducción, debido a la existencia de condiciones aerobias y anaerobias. La velocidad de oxidación del Fe (II) a Fe(III) se incrementa por la actividad de *Tiobacillus ferrooxidans*. Los iones férricos precipitan como hidróxidos y los otros elementos tales como el Cd, Cu, Pb, Zn y As coprecipitan.

En condiciones anóxicas, las bacterias reductoras de sulfatos oxidan la materia orgánica, utilizando al ión sulfato como aceptor de electrones y reduciéndolo a sulfuro. El sulfuro de hidrógeno puede volatilizarse o combinarse con los cationes metálicos y precipitar como sulfuros, permitiendo su remoción. Se requiere un pH aproximadamente neutro. Otros procesos pueden suceder, pero se consideran de menor importancia.

6. CONCLUSIONES

- (a) Las concentraciones de metales pesados disueltos medidas después de octubre de 2004 (puesta en marcha del dique provisional de Laguna Pampa), en las aguas del río Pilcomayo en lugares próximos a las poblaciones de escasos recursos hídricos, han disminuido en comparación a los valores medidos antes de octubre de 2004 y ya satisfacen los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud. Sin embargo, en estos mismos lugares subsisten altas concentraciones de metales pesados y arsénico en los sedimentos almacenados de lecho de río que pueden ser arrastrados por las corrientes. Buenos procesos de sedimentación y filtración, imprescindibles para esta agua, podrían ser efectivos y suficientes para la remoción de los contaminantes.
- (b) Existen muchos indicios de que el problema principal y más extendido en Bolivia respecto de la contaminación de aguas naturales por metales pesados, es el aportado por los pasivos ambientales mineros con la generación de aguas ácidas con elevadísimas concentraciones de metales pesados disueltos. Esta situación prevalecerá por largo tiempo, a menos que parte de esos pasivos ambientales sean aprovechados a través de procesos metalúrgicos cuya viabilidad técnica y económica se haya demostrado.
- (c) Las aguas ácidas contaminan pequeños ríos, algunos de los cuales son fuente principal de agua potable de algunas comunidades pequeñas. Tales son los casos de las poblaciones de Quila –Quila (Río Chayanta) y Tasna (Río Tasna). En el caso de Quila Quila, las aguas están contaminadas principalmente por cadmio y ya se han desarrollado algunos estudios de tratamiento por filtración y adsorción a través de algunos materiales arcillosos y zeolitas [23].
- (d) Para el tratamiento de aguas ácidas mediante sistemas activos, la comparación favorece a la oxidación foto-química por radiación ultravioleta o solar por su capacidad de convertir el As (III) más soluble a As (V) menos soluble, el cual co-precipita a valores de pH mayores a 5. En ausencia de As, la neutralización con caliza y posterior precipitación de metales pesados es más recomendable. Ambos procesos son simples y más económicos que las otras alternativas.
- (e) Las aguas ácidas podrían tratarse mediante la oxidación fotoquímica y la co-precipitación subsecuente, sin añadir ningún otro compuesto químico, debido a sus altas concentraciones de Fe(II), Cu (II), As y otros metales.

- (f) El tratamiento pasivo más auto sustentable es el provisto por humedales o pantanos artificiales.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Jurado et al. *Inventariación de pasivos ambientales mineros de Bolivia*, Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales: Sostenibilidad a Múltiples Niveles y Escalas, Vol. II, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, julio 2007, pp. 755-764.
- [2] M. Sengupta. *Environmental impacts of mining. Monitoring, restoration and control*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA, 1993.
- [3] C. Vandecasteele. *Generation of minewater, its impact on the aquatic environment and remediation*, Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales: Sostenibilidad a Múltiples Niveles y Escalas, Vol. II, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, julio 2007, pp. 717-725.
- [4] Mitsui Co. Ltd. *Estudio de evaluación del impacto ambiental del sector minero en el departamento de Potosí*, Agencia de Cooperación Técnica del Japón, Informe Final (Principal), Septiembre 1999.
- [5] Proyecto Pilcomayo. *Datos de la consultoría de Halcrow y Serman. Estudio para la elaboración de una Línea Base Ambiental y Socio-económica de la Cuenca del Río Pilcomayo*, Comunicación personal, Tarija, Bolivia, agosto 2007.
- [6] Proyecto Pilcomayo. *Datos de estudios realizados por la organización "Amigos del Pilcomayo"*, Comunicación personal, Tarija, Bolivia, agosto 2007.
- [7] R. Escalera. *Interpretación de la calidad de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Pilcomayo y su relación con los impactos de la actividad minera, hidrocarburiífera, urbana u otra.*, Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo, Centro de Investigaciones en Procesos Industriales, Universidad Privada Boliviana, 2006.
- [8] A. J. Smolders et al. *Effect of Mining Activities on Heavy Metal Concentrations in Water, Sediment, and Macroinvertebrates in different reaches of Pilcomayo River*, Arch. Environ. Contam. Toxicol, vol. 44, 2003, pp. 314-323.
- [9] J. Miller et al. *Heavy metal contamination of water, soil and produce within riverine communities of the Río Pilcomayo Basin, Bolivia*, Science of the Total Environment, no 320, 2004, pp. 189-209.
- [10] Spectrolab. *Informe de la campaña de monitoreo de reconocimiento. Cuenca Alta del Río Pilcomayo*, Proyecto Pilcomayo, Tarija, Bolivia, agosto 2004.
- [11] Centro de Investigación Minero Ambiental, CIMA. *Resultados de análisis de aguas, sedimentos de la subcuenca del río Aljamayu y cuenca del río Pilcomayo*, Potosí, Bolivia, 2005.
- [12] L. Castro y M. Zambrana. *Fuentes alternativas para agua contaminada del Río Pilcomayo para comunidades de Tasapampa, Tuero Chico, Puente Mendez y Sotomayor*, Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales: Sostenibilidad a Múltiples Niveles y Escalas, Vol. II, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, julio 2007, pp. 799-805.
- [13] J. Rojas y C. Vandecasteele. *Influencia de la actividad minera en el norte de Potosí, Bolivia, sobre la cuenca del agua del Río Chayanta y sus consecuencias*, Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales: Sostenibilidad a Múltiples Niveles y Escalas, Vol. II, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, julio 2007, pp. 738-747.
- [14] D. Sparks. *Environmental soil chemistry*, Academic Press, U.S.A., 2003.
- [15] C. Baird. *Environmental Chemistry*, Editorial F. H. Freeman, 2nd Ed., 2001.
- [16] M. Brown et al. *Minewater treatment: Technology, application and policy*. IWA Publishing, London, UK, 2002.
- [17] S. Benner et al. *Long term performance of the nickel rim reactive barrier: a summary*. Proceedings 5th International Conference on Acid Rock Drainage, 2000, pp. 1221-1226.
- [18] R. McGregor et al. *The use of an in-situ porous reactive wall to remediate a heavy metal plume*. Proceedings 5th International Conference on Acid Rock Drainage, 2000, pp.1227-1234.
- [19] N. Kuyucak. *Microorganisms, biotechnology and acid rock drainage - emphasis on passive biological control and treatment methods*. Minerals and metallurgical processing, N°17, 2000, pp. 85-95.
- [20] H. Tabak et al. (2003). *Advances in biotreatment of acid mine drainage and biorecovery of metals: 1. Metal precipitation for recovery and recycle*. Biodegradation, Vol. 14, pp. 423-436. Citado por Xinchao W., R. C. Viadero, Jr.,* and K. M. Buzby, *Recovery of Iron and Aluminum from Acid Mine Drainage by Selective Precipitation*, Environ. Eng. Sci., Vol. 22, N° 6, 2005, pp. 745-755.
- [21] S. Foucher et al. *Treatment by sulfate-reducing bacteria of Chessy acid-mine drainage and metals recovery*, Chem. Eng. Sci., Vol. 4, N° 56, 2001, pp. 1639-1645. Citado por Xinchao W., R. C. Viadero, Jr.,* and K. M. Buzby, *Recovery of Iron and Aluminum from Acid Mine Drainage by Selective Precipitation*, Environ. Eng. Sci., Vol. 22, N° 6, 2005, pp. 745-755.
- [22] G. Khoe et al. *Photoassisted oxidation of species in solution*, Patent Number 5688378, USA,1997, Internet: <http://freepatentsonline.com/5688378.html>, acceso en junio 2007.

- [23] E. Encinas et al., *Remoción de cadmio proveniente de la actividad minera mediante materiales arcillosos*, Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales: Sostenibilidad a Múltiples Niveles y Escalas, Vol. II, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, julio 2007, pp. 873-880.