

**PROPUESTA DE
PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN:
PLANTA DE TRATAMIENTO ACTIVO
KUMURANA – LA LAVA**

Elaborado por:
Fundación MEDMIN
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

La Paz, junio de 2003

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

INDICE

Propuesta de Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava	2
1. Planta de tratamiento activo y programa de investigación.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Introducción	4
1.3. Los objetivos.....	6
1.3.1. Dentro del proyecto:.....	6
1.3.2. Específicos de la investigación:.....	7
2. La Presa de Colas.....	8
2.1. Procesos químicos	8
2.2. Procesos físicos.....	10
2.3. Funcionamiento técnico	13
3. Campaña de investigación	17
3.1. Metodología.....	17
3.1.1. Muestreo.....	17
3.1.2. Métodos de muestreo	17
3.2. Cronograma del seguimiento	18
3.3. Presupuesto del programa de investigación	18
4. Apéndice.....	21
4.1. Expresiones científicas	21
4.2. Información adicional	21
4.2.1. Velocidad y tiempo de sedimentación de forma laminar.....	21
4.2.2. Límites permisibles y concentraciones naturales.....	22
4.3. Bibliografía.....	23
4.3.1. Literatura científica.....	23
4.3.2. Páginas de Web.....	23

PROPUESTA DE PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN: PLANTA DE TRATAMIENTO KUMURANA – LA LAVA

Institución: Fundación MEDMIN

Encargados: Danilo Bocángel; coordinador del proyecto
Florian Erzinger; asistente científico

1. Planta de tratamiento activo y programa de investigación

1.1. Antecedentes

El proyecto de la construcción de una planta de tratamiento activo en Kumurana – La Lava hace parte del Proyecto Medio Ambiente Industria y Minería (PMAIM), lo que se ejecuta en Bolivia con el Soporte financiero del Banco Mundial (Credito AIF-2805/96) y el Fondo Nórdico para el Desarrollo (Crédito FND-160/95). El Viceministerio de Minería y Metalurgia, a través de la Unidad Sectorial de Medio Ambiente USMA, es responsable de la ejecución de los componentes D y E del PMAIM, que comprende programas de difusión de normas técnicas y jurídicas, programas de capacitación, generación de información para obtención de diagnósticos ambientales, elaboración de programas específicos de prevención y control; y asistencia técnica a municipios mineros en la construcción de obras de mitigación de impactos y remediación de pasivos ambientales.

El marco regulatorio ambiental tiene vigencia en Bolivia desde la promulgación de los Reglamentos de la Ley del Medio Ambiente (1996), y para el sector minero se fortalece y consolida desde la promulgación de la Ley del Código de Minería (1997) y el Reglamento Ambiental para Actividades Mineras (RAAM, 1977). Las estadísticas de procesamiento de licencias ambientales para actividades y proyectos del sector minero, en las instancias legales correspondientes (Viceministerio de Minería y Metalurgia, Viceministerio de Medio Ambiente Recursos Naturales y Prefecturas), reflejan un bajo grado de cumplimiento de la normativa ambiental, debido a las limitaciones económicas que confrontan las empresas y cooperativas mineras, por la caída de precios de los minerales en el mercado internacional.

La minería y sus actividades asociadas pueden ser la causa de daños considerables al medioambiente físico y biótico, si no se adoptan medidas de prevención y control ambiental, mediante la aplicación de tecnologías compatibles con la situación socio-económica de los concesionarios y operadores mineros. Los impactos típicos de las actividades mineras son la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, la degradación de los suelos, la destrucción de hábitats, riesgos sobre la salud y seguridad de los trabajadores y población del entorno son algunos de sus impactos típicos. El deterioro de los recursos naturales y la salud humana pueden tener un efecto negativo, en el potencial de crecimiento de una región en el largo plazo; aún si se obtienen beneficios económicos inmediatos para las empresas. Por lo tanto, es importante que las actividades mineras sean llevadas a cabo de modo que sus impactos sean reducidos al mínimo posible.

Por esas razones, se requiere desarrollar y difundir sistemas tecnológicos que sean económicamente viables para las operaciones de la minería chica y cooperativizada de nuestro país, y que permita controlar los impactos ambientales y socio-económicos de la actividad minera, aplicando una estrategia de control progresivo y paulatino, con una amplia participación de los

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

sectores involucrados y la aplicación de incentivos técnicos y financieros para la construcción de obras de prevención y control en la zonas de mayor impacto ambiental.

Debido a los conflictos ambientales que se han generado entre los operadores de las Minas Andacaba y Kumurana y campesinos de las comunidades rurales asentadas en la zona baja de la meseta de Cucho Ingenio - La Lava, se han desarrollado estudios de evaluación de impactos ambientales relacionados con la contaminación de aguas. En 1993, mediante la ejecución del Proyecto de Cooperación Geológica Boliviano-Alemán, se realizaron estudios ambientales en las regiones de Toropalca, Andacaba – Kumurana - La Lava, en el Departamento de Potosí, con el propósito de establecer el grado de contaminación de aguas superficiales, como producto de actividades mineras de la zona. En marzo de 1994, se concluyó un estudio experimental conducido por el Instituto de Investigaciones Minero Metalúrgicas – Sergeomin, a pedido de la administración de Empresa Minera Kumurana (Empresa Minera Gutierrez), para establecer métodos y costos de tratamiento de aguas ácidas de mina, a través de pruebas a escala de laboratorio y escala piloto, obteniéndose información importantes sobre las características geoquímicas de los efluentes de DAM y DAR de Mina Kumurana, y condiciones de tratamiento mediante uso de caliza y cal.

La Fundación MEDMIN, como responsable de la planificación y ejecución del Subproyecto 3-E del Proyecto Medio Ambiente Industria y Minería (PMAIM) “Manejo Ambiental en Microcuencas de Zonas Mineras”, realizó una evaluación ambiental y socioeconómica de 13 centros mineros preseleccionados. En la Fase II del Subproyecto 3-E se seleccionaron 5 zonas mineras beneficiarias del proyecto, entre las que fue tomada en cuenta la Microcuenca Kumurana – La Lava, para la elaboración de diseños constructivos y operativos, destinados a la implementación de obras de mitigación ambiental, relacionados con los diagnósticos ambientales y socio-económicos obtenidos en la Fase I y complementados en la Fase II del Subproyecto 3-E. El diagnóstico socio-económico realizado en la Fase I y Fase II del Subproyecto 3-E, “Manejo Ambiental en Microcuencas de Zonas Mineras”, mostró una necesidad primordial del recurso agua para desarrollar alternativas productivas y potenciar los medios de subsistencia de la población local. Por lo tanto, se reconoció una probada necesidad de instalar un sistema de tratamiento de aguas ácidas procedentes del socavón Santa Catalina en Mina Kumurana con fines ambientales y socioeconómicos.

En la Microcuenca del Río Kumurana existen factores favorables que facilitan el diseño operativo y constructivo de las obras, tales como la topografía de la zona, un caudal del efluente en un rango manejable y concentraciones relativamente moderadas de metales pesados. Estos aspectos permiten desarrollar el proceso de neutralización y oxidación en condiciones cinéticas óptimas, a muy bajo costo de inversión y operación. Por otra parte, los residuos de cal que serán descartados de la planta de cal, servirán para control de la acidez en la Laguna Santa Catalina y/o en las filtraciones de los desmontes de caja mina. Los diseños para cada una de la obras que forman parte del sistema de control ambiental se basan en el establecimiento de un proceso físico-químico de tratamiento activo, para reducir el grado de acidez y reducir el contenido de metales pesados en el efluente de drenaje ácido de Mina Kumurana. De esa manera se estima que en un plazo no mayor a los 6 meses se podrá alcanzar una calidad de agua Clase C, para fines de riego¹.

¹ Actualmente está en curso un programa de clasificación de cuerpos de agua, que definirá los límites definitivos a ser aplicados en el futuro, para control de calidad de aguas en descargas y cuerpos de agua; entre tanto, se aplica los límites permisibles para descargas, Anexo A-2 del Reglamento Ambiental en Materia de Contaminación Hídrica.

1.2. Introducción

El proyecto en si puede ser dividido en tres etapas: Preinversión, que incluye las gestiones realizadas y la elaboración de los expedientes técnicos y otros informes de acuerdo a contrato; inversión, que constituye la construcción misma de las obras, dirección y supervisión; y finalmente el monitoreo ejecutado a través de un programa de investigación. Todos los criterios técnicos estuvieron orientados al tratamiento de desagües de minería sin impacto adicional de origen de poblaciones humanas.

Una vez concluidas las obras, se realizaron pruebas hidráulicas en la presa de colas para dar lugar al programa de investigación, que evalúe su eficiencia de purificación. Los resultados de este monitoreo de unos quince días de duración se presentarán y valorizarán en el informe científico “Programa de investigación: Planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava”.

El programa de investigación contempla la medición de parámetros in situ: caudal, pH, temperatura y el potencial mV en la fuente de alimentación de la planta de caleo, en su salida de este sistema de neutralización, en la entrada de la descarga a los tanques de sedimentación y en la salida de ese sistema. Adicionalmente se toma muestras de aguas en los mismos puntos para hacer analizar las concentraciones de plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe), cianuro (Cn), estaño (Sn) y de arsénico (As) y además de sólidos suspendidos (SST) en las distintas muestras de agua. De esta manera, por un lado se podrá cuantificar la eficiencia del tratamiento físico-químico de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava y por otro será posible inferir conclusiones sobre si las descargas líquidas que salen de la planta de tratamiento cumplen la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

A continuación, en el capítulo 1.3., como parte del proyecto, se explican los distintos objetivos bajo los cuales fue construida la presa de colas Laguna Pampa y los objetivos de la campaña de investigación misma. Para facilitar el entendimiento del funcionamiento de la planta de tratamiento activo al lector del presente informe científico, en el capítulo 2. se da una breve introducción en el funcionamiento de una planta de purificación de aguas contaminadas mediante tratamiento físico-químico como es el caso en Kumurana, con explicaciones sobre la respectiva teoría científica acerca los procesos químicos en el capítulo 2.1. y acerca los procesos físicos en el capítulo 2.2. y sobre el funcionamiento práctico de una presa de colas en el capítulo 2.3.. Luego, en la parte principal de presente informe, el capítulo 3., se describe la campaña de investigación como los expertos científicos de la fundación MEDMIN la planificaron, iniciando con la explicación de la metodología utilizada en el el capítulo 3.1., seguido por un cronograma de seguimiento de la campaña en el capítulo 3.2. y por un cálculo de presupuesto para la conducción de dicho programa de monitoreo en el capítulo 3.3.. Finalmente, en el apéndice en el capítulo 4. se presenta unas definiciones de expresiones científicas que se utilicen en este informe (cap. 4.1.), informaciones adicionales que el lector necesita para su mejor entendimiento (cap. 4.2.) y las fuentes de literatura, en la cual se base el contenido de este documento (cap. 4.3.).

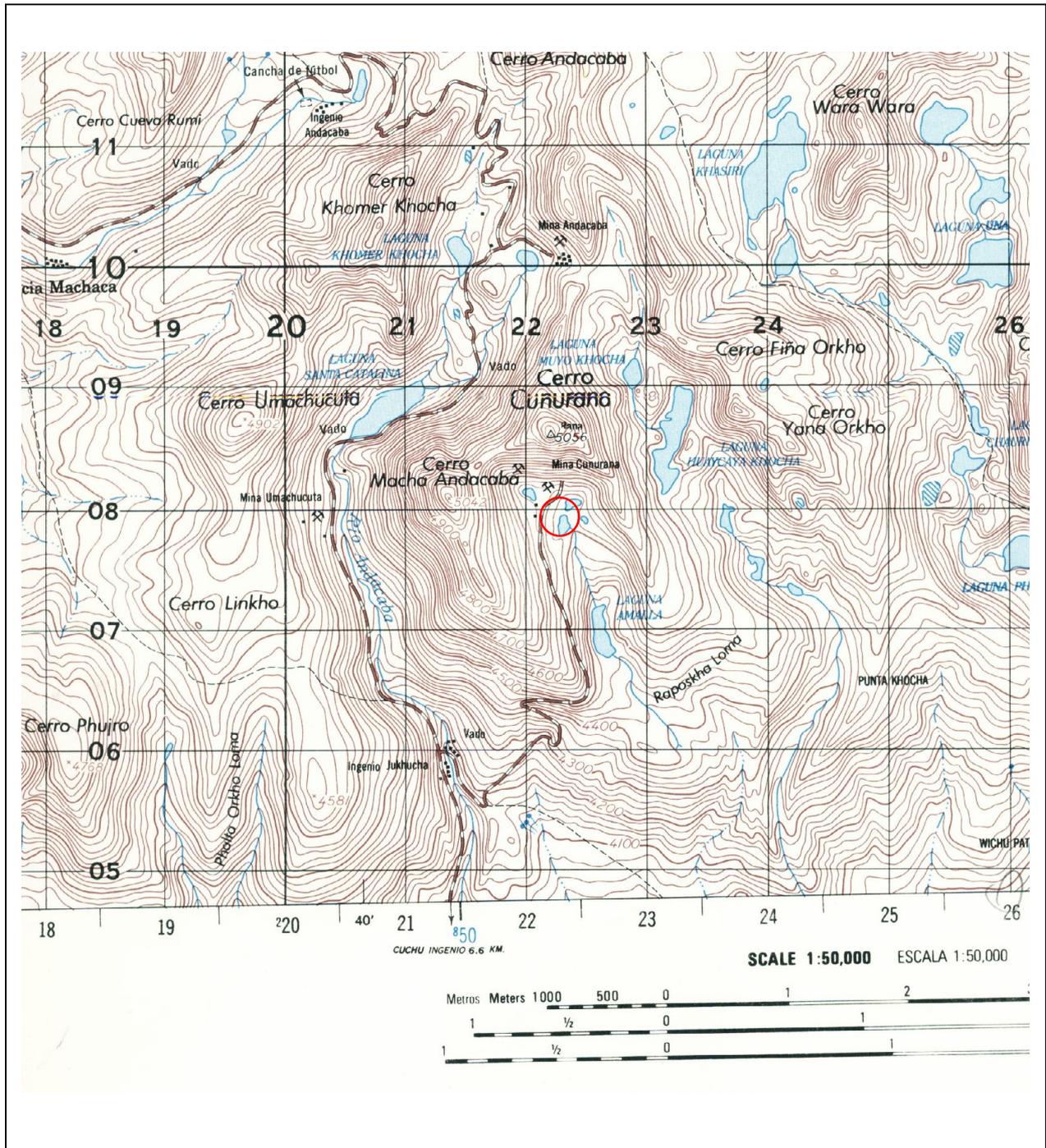


Figura 1: Exposición geográfica de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava (también se encuentra la gráfica "Cunurana"), ubicándose en el municipio de La Lava en el sureste de la ciudad de Potosí (aproximadamente S 19° 49', O 55° 39').

1.3. Los objetivos

Como objetivos prácticos del proyecto de la construcción de una planta de tratamiento activo y del programa de monitoreo, se tienen:

1.3.1. Dentro del proyecto:

Los objetivos del Proyecto Medio Ambiente Industria y Minería (PMAIM) son los siguientes:

- Contribuir en el mejoramiento del marco regulatorio ambiental del Sector Minero-Industrial de Bolivia y apoyar en su implementación.
- Asistir a los operadores y concesionarios de la Minería Pequeña y Cooperativizada, en la prevención de riesgos y en la remediación de pasivos ambientales originados en actividades mineras.
- Prestar asistencia técnica a los municipios mineros en la obtención de recursos financieros, del PMAIM y otros, para mejorar las condiciones medioambientales de su entorno, y aliviar la pobreza de las comunidades rurales dentro de sus jurisdicciones.

El Subproyecto 3-E del Proyecto Medio Ambiente Industria y Minería (PMAIM) “Manejo Ambiental en Microcuencas de Zonas Mineras” tiene como objetivos centrales los siguientes:

- Apoyar a los Municipios Mineros ubicados en microcuencas de actividad minera pequeña, en la prevención, mitigación y remediación de impactos ambientales negativos que se originan en actividades del sector minero, usando tecnologías de mitigación a través de módulos demostrativos, en el contexto de la realidad socio-económica local, es decir, utilizando la mejor tecnología disponible, que sea económicamente sostenible y socialmente viable, contribuyendo de esa manera en los procesos de desarrollo local.
- Promover el cumplimiento de las regulaciones ambientales vigentes, mediante la aplicación de incentivos técnicos y financieros, especialmente al Sub-sector de la Minería Chica y Cooperativizada.
- Planificar la ejecución de un plan de monitoreo y seguimiento para la fase de operación de la planta de tratamiento, orientado a una optimización y consolidación del proceso como método válido para su aplicación en otras microcuencas.

Unos de los objetivos específicos para el estudio de caso de Kumurana – La Lava dentro del Subproyecto 3-E son:

- Puesta en marcha y optimización operativa del sistema de tratamiento, mediante ajustes en los parámetros técnicos y económicos, que contribuyan en la sostenibilidad económica y social de del proyecto, a cargo de los beneficiarios.
- Introducción y aplicación de un plan de gestión ambiental local, orientado a promover la sostenibilidad del funcionamiento de las instalaciones, a través de la participación y concertación con los diferentes actores sociales involucrados.
- Definir una estrategia para apalancar la ejecución de futuros proyectos de prevención, mitigación, control y remediación de impactos ambientales orientados a completar el control ambiental integral dentro de la microcuenca Río Andacaba – Río La Lava, y que a su vez permita promover la planificación y ejecución de programas ambientales en otros centros mineros del sector de la Minería Chica y Cooperativizada de la zona.
- Validación de la tecnología propuesta y la difusión de los resultados y transferencia de la tecnología para futuros proyectos, pues en Bolivia no existen experiencias sobre diseño, construcción y operación de plantas de tratamiento de aguas en los Subsectores de la Minería Chica y Cooperativizada. La validación de un sistema de tratamiento activo con cal es urgente y necesaria para planificar la ejecución de medidas de mitigación similares, tanto para la propia

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

microcuenca como para la quebrada de Mina Andacaba y otros sitios contaminados del país, que confrontan limitaciones financieras para adquirir tecnología cara y donde la generación de alternativas para desarrollo local es una necesidad primordial.

1.3.2. Específicos de la investigación:

- Cuantificar la eficiencia de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava respecto de la eliminación de los minerales de metales pesados más importantes en estas aguas residuales como son el plomo (Pb), el cadmio (Cd), el zinc (Zn), el cobre (Cu), el hierro (Fe), el cianuro (Cn), el estaño (Sn) y el arsénico (As).
- Cuantificar la reducción de otros contaminantes no específicamente originados por las actividades mineras como son los sólidos suspendidos.
- Conocer la influencia del sistema descontaminador al pH, el potencial químico mV y a la temperatura del agua tratada.
- Averiguar si el elaborado sistema de un tratamiento activo de los efluentes de DAM y DAR de la Mina Kumurana alcanzan la calidad de agua necesaria para cumplir la Clase C de la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

2. La planta de tratamiento activo

El funcionamiento de una planta de tratamiento activo como en el caso Kumurana – La Lava base en toda una secuencia de procesos tanto químicos, tanto físicos:

El método de tratamiento que se ajusta a las características del efluente de la mina Kumurana, es decir, elevada acidez ($\text{pH} < 3$) y contenidos de metales pesados (Fe, Zn, Cu, Pb y Cd) muy por encima de los límites permisibles, es el sistema convencional de tratamiento activo con cal, en la fuente; que comprende una primera etapa de neutralización de la acidez mediante adición de lechada de cal; continúa el proceso con la oxidación de los iones ferrosos a férricos mediante oxigenación por aireación natural en cascadas (procesos químicos); pasa a la fase de precipitación de los metales pesados en forma de compuestos estables en tanques de almacenamiento temporal (proceso físico), de donde son descargados en forma periódica a tanques de deshidratación y preparación de lodos semisecos para traslado hasta los sitios de disposición final. Las aguas residuales de la fase de precipitación pasan a un proceso de clarificación en una laguna de gran volumen y tiempo de retención, para garantizar la calidad de los efluentes de aguas tratadas, y proceder a su descarga en cursos de agua conectados a áreas de uso y consumo en las comunidades rurales del entorno con fines de riego. De esa manera se espera obtener una calidad de agua de Clase C, apta para riego.

Por lo tanto, se ha elegido un procedimiento convencional de tratamiento de aguas ácidas de mina, pero minimizando el uso de energía eléctrica y equipos que requieren un mantenimiento costoso. La mano de obra se ha reducido a lo estrictamente esencial, para preparación y control de alimentación de cal y descarga de lodos.

2.1. Procesos químicos

En los efluentes del socavón Santa Catalina existen varios metales pesados, entre ellos los de mayor incidencia son el hierro, zinc, cobre, cadmio y plomo. Los minerales secundarios más comunes son:

- Melanterita ($(\text{Fe, Cu, Zn}) \text{SO}_4(\text{H}_2\text{O})_7$)
- Herrumbre coloidal ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), que evoluciona en Goetita después de desecación
- Goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), que puede transformarse en hematitas y limonitas por efecto de la temperatura
- Ferrihidrita ($\text{Fe}_5\text{HO}_8(\text{H}_2\text{O})_4$ o $\text{FeO}(\text{OH})$)
- Brochantita ($\text{Cu}(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$)
- Antlerita ($\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$)
- Anglesita ($\text{Pb}(\text{SO}_4)$)
- Zincosita ($\text{Zn}(\text{SO}_4)$)

Los compuestos de metales pesados solubles más comunes en las cargas de los efluentes del socavón Santa Catalina son la pirita (FeS_2), la pirrotina (FeS), la esfalerita (ZnS), la galena (PbS) y arsenopirita (AsFeS). La presencia de metales pesados disueltos en el agua como iones en forma reducida significa una amenaza vital tanto para los ecosistemas afectados y sus biodiversidades, tanto para los seres humanos consumando dicho agua. La mayoría de estos iones metálicos afectan al metabolismo intra- y intercelular tanto de forma aguda, tanto de forma crónica.

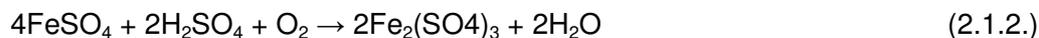
La eliminación de estos iones minerales se efectúa por la oxidación de estas especies reducidas y la neutralización del pH del agua ($\text{pH} > 3$), explicado a continuación en algunos ejemplos:

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

Descomposición oxidativa de la piritita (FeS_2):



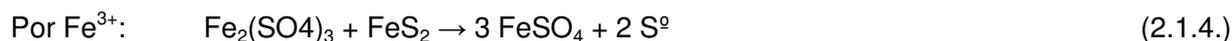
Formación de sulfato férrico:



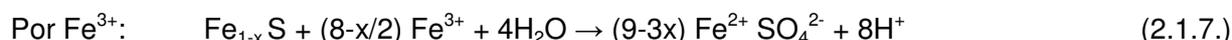
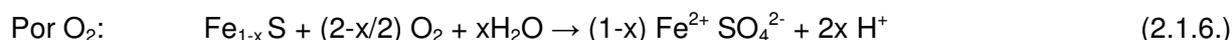
Formación de hidróxido férrico:



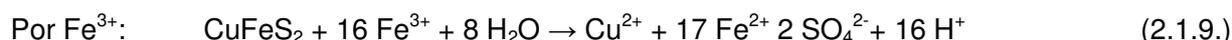
Interacción oxidante (reacción redox):



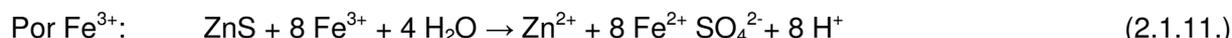
Descomposición oxidativa de la pirrotina (FeS):



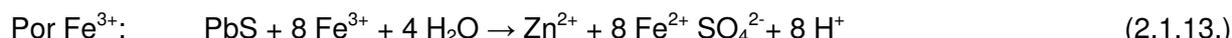
Descomposición oxidativa de calcopirita (CuFeS_2),



Descomposición oxidativa de la esfalerita (ZnS):



Descomposición oxidativa de la galena (PbS),



Descomposición de los compuestos iónicos por neutralización de los aguas ácidas por carbonato de calcio:



Los compuestos metálicos resultantes de estas reacciones son no solubles y en consecuencia precipitan en el curso del proceso.

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

La suma total de estos metales alcanza a 87 mg/L, que son equivalentes a una carga diaria de 127.8kg. Para llegar a los límites permisibles se debe precipitar y eliminar casi el 99% de estos contenidos, o sea 126.5kg/d.

Para efectos de cálculo se asume que la cantidad de precipitado es aproximadamente el doble en peso en relación con los contenidos de metales disueltos en el agua ácida, a menos que se maneje una precipitación controlada y parcial. Bajo estas consideraciones la cantidad de precipitado que se forma por día, utilizando un factor 2.3 es aproximadamente $126.5\text{kg/d} \cdot 2.3 = 290.95\text{kg/d}$ de precipitados de metales pesados.

Se debe considerar que al menos el 70% del sulfato de calcio (yeso), que se produce en las reacciones de neutralización, formarán parte del precipitado, los restantes 30% quedan en la solución como iones disueltos de Ca^{2+} y Mg^{2+} . En consecuencia, de los 230kg de cal empleada, aproximadamente 161kg pasaran a formar parte del precipitado, de este modo el peso total de precipitado alcanza a 452kg/d.

2.2. Procesos físicos

Los procesos físicos en una planta de tratamiento activo como en el caso de Kumurana – La Lava son por un lado la sedimentación por gravedad de los minerales contaminantes durante el periodo de almacenamiento en los tanques de sedimentación y la laguna de clarificación y por otro la decantación y la evacuación del agua de esta manera purificada.

Lo que interesa más para determinar el dimensionamiento de los tanques de sedimentación y la laguna de clarificación es el tiempo de sedimentación $t_{sed.}$ en cada uno de estos sistemas, para conocer el límite de cargamento con aguas negras, es decir el caudal máximamente permisible para no sobrepasar el tiempo de retención $t_{ret.}$ de estos dos cuerpos de agua. El tiempo de sedimentación $t_{sed.}$ obviamente depende de la velocidad de sedimentación $v_{sed.}$ y de la profundidad de la capa de agua recorrido por las partículas suspendidas en proceso de sedimentación h , la que en el caso de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava acende a 3.25m en promedio en los tanques de sedimentación y a 1.8m en la laguna de clarificación:

$$t_{sed.} = \frac{h}{v_{sed.}} \quad [\text{seg.}] \quad (2.2.1.)$$

La sedimentación de partículas suspendidas en aguas estancadas como es el caso en un tanque de sedimentación o una laguna de clarificación tiene lugar de forma laminar, es decir no turbulente. Bajo estas condiciones, para calcular la velocidad de sedimentación por gravedad $v_{sed.}$, la cual está relacionada al tamaño de los partículas suspendidas, es decir sus radios r , se sirve de la ley de Stokes:

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

Ley de Stokes:
$$v_{sed.} = \alpha \cdot B \cdot r^2$$

$$= \alpha \cdot \frac{2g(\rho_s - \rho_w)}{9\mu} \cdot r^2 \quad [\text{mseg.}^{-1}] \quad (2.2.2.)$$

Con:

α := Factor de forma (para esferas $\alpha = 1$) []
 g := Constante gravitacional = 9.814 [mseg.⁻²]
 ρ_s := Densidad de la partícula (para cuarzo $\rho_s = 2650$) [kgm⁻³]
 ρ_w := Densidad del agua = 998 [kgm⁻³]
 μ := Viscosidad dinámica del fluido (para agua $\mu = 10^{-3}$) [kgm⁻¹seg.⁻¹]

Esta fórmula aplicada a distintos radios de partículas nos da los tiempos de sedimentación anotados en la Tabla 1.

Tabla 1: Velocidades y tiempos de sedimentación laminar

r [mm]	Descripción	v_{sed} [cmseg ⁻¹]	$t_{sed,180cm}$ [h]	$t_{sed,325cm}$ [h]
1	Arena	360	0.00014	0.00025
0.5		90	0.0006	0.001
0.4		58	0.0009	0.002
0.3		32	0.0015	0.003
0.2		14	0.003	0.006
0.1	Arena fina	4	0.014	0.025
0.05		0.9	0.06	0.1
0.01	Arcilla	0.036	1.4	2.5
0.005		0.009	6	10
0.001	Bacteria	0.00036	139	251
0.0005		0.00009	555	1002
0.0001	Partícula coloidal	0.0000036	13878	25057

Fuente: <http://www.eng.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/SEDIMENT/sedsettle.html>

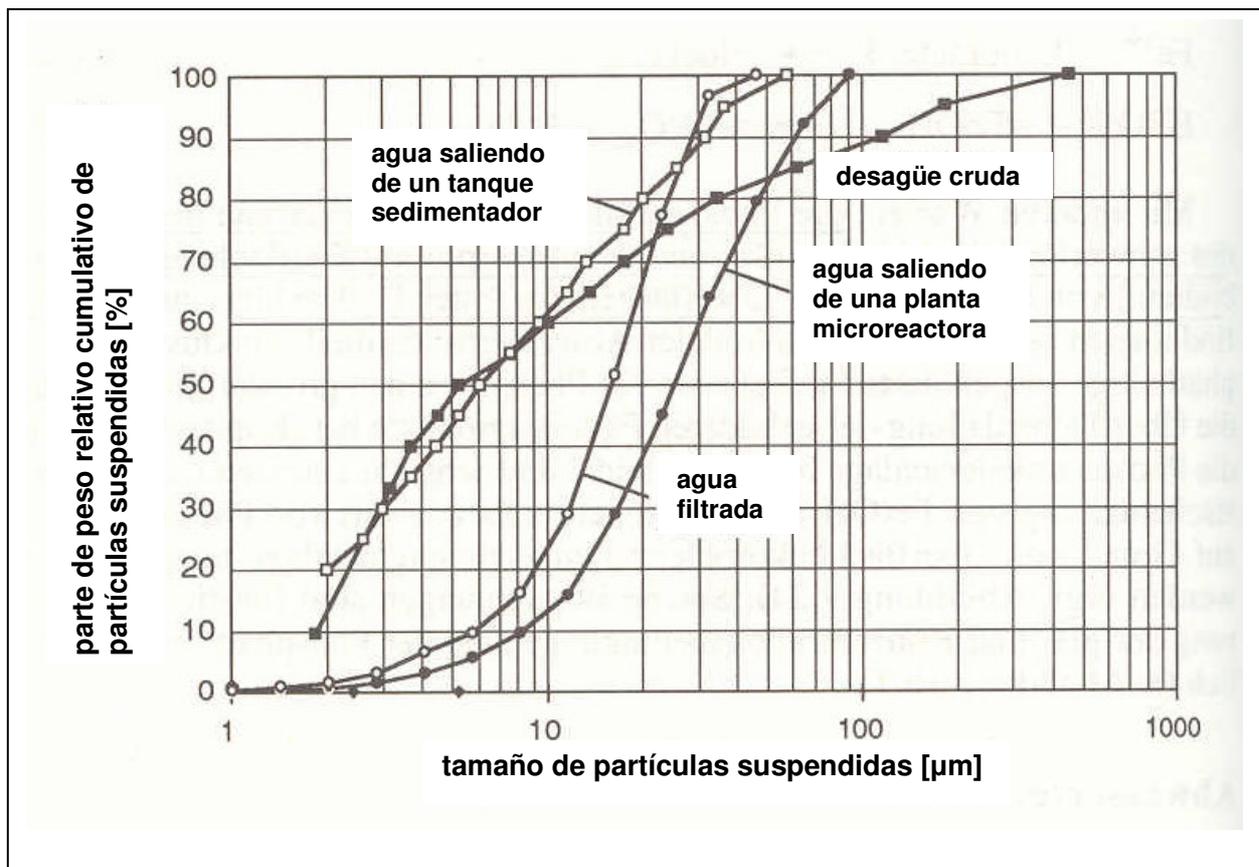


Figura 2: Distribución de frecuencia de tamaños de partículas suspendidas en aguas contaminadas.

En la Figura 2 reconocemos que las partículas de interés son las de un radio entre $10\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$, pues abarcan entre 60% y 90% del total de la carga suspendida en desagües crudas. Para este rango de volumen podemos notar que las partículas suspendidas en el agua almacenada en los tanques de sedimentación y en la laguna de clarificación de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava tienen tiempos de sedimentación entre algunas horas y al rededor de una semana (ver Tabla 1).

La decantación de agua no es realmente un proceso físico, sino más bien una metodología que se sirve del fenómeno físico que partículas suspendidas en un cuerpo de agua estancado siguen sedimentando por la atracción gravitacional de la tierra. Este hecho conduzca a la situación que la densidad de las partículas suspendidas disminuye con la altura de la capa de agua en el cuerpo de agua en su totalidad. De esta manera, el grado de pureza del agua estancada aumenta en las capas superficiales. Este efecto se utiliza por la decantación de modo de que este agua purificada en la capa superficial de un ancho de algunos centímetros se separa por un sistema de evacuación, en este caso por las cachimbas, de las capas de agua más profundas que muestran una densidad de sustancias contaminantes más elevada.

2.3. Funcionamiento técnico

El funcionamiento técnico de una planta de tratamiento activo como en el caso de Kumurana – La Lava base en varios pasos parciales fundamentales (ver Figura 3) que se van a explicar en detalle a continuación:

- Separación de los sólidos suspendidos (tratamiento físico)
- Dosificación y preparación de lechada de cal, a partir de cal viva
- Neutralización de la acidez mediante lechada de cal (tratamiento químico, ajuste de pH)
- Oxidación de iones ferrosos a férricos, precipitación y sedimentación de metales pesados (tratamiento físico-químico)
- Descarga, almacenamiento temporal para deshidratación y disposición final de lodos de compuestos secundarios de metales pesados
- Conducción de las aguas tratadas hasta el sistema de almacenamiento, distribución y uso por parte de grupos de beneficiarios

Las obras civiles constan fundamentalmente de una planta de cal, un canal de conducción de agua, dos tanques de precipitación de lodos, una laguna de clarificación de aguas con sistema de cachimbas para evacuación de agua tratada, un sistema de tanques de almacenamiento temporal de lodos para deshidratación, una laguna auxiliar de acumulación de lodos, un tanque de concreto para almacenamiento de agua tratada, sistema de tuberías y cajones de distribución.

La separación de sólidos suspendidos comprende la retención y almacenamiento de partículas finas suspendidas y material de arrastre de arenas y limos que llegan a la planta junto con el agua de mina. En el presente proyecto, la retención de sólidos sedimentables, que son mínimos, se lleva a cabo en un tanque ubicado al inicio del proceso, simultáneamente con la alimentación de lechada de cal. De esta manera los sólidos suspendidos son removidos junto con los residuos de cal.

En seguida, el agua, ensuciado principalmente por minerales suspendidos y metales pesados solubles por razón de un pH muy bajo, está sometido a la neutralización de su acidez por el añadido de carbonato de calcio (CaCO_3), en uso del idioma común denominado también como cal. Una vez dosificada la alimentación de lechada de cal, el agua es conducida por un canal abierto, hasta los tanques de precipitación y sedimentación de lodos de metales pesados. En la parte más inclinada de dicho canal se forman cascadas que facilitan una buena aireación, la que promueve la oxidación del hierro ferroso (Fe^{2+}) a hierro férrico (Fe^{+III}). Como el hierro férrico en diferencia al hierro ferroso forma compuestos estables, es decir complejos no solubles sobre todo con carbonato (CO_3^{2-}) (ver cap. 2.1.), de esta manera se logra iniciar la fase de precipitación.

El agua neutralizada entonces ingresa a dos tanques de sedimentación instalados en serie, en la parte interior de la laguna de Chaqui Kocha, con la finalidad de facilitar la precipitación y el almacenamiento temporal de los lodos. El rebose de los tanques de precipitación pasa a una laguna de clarificación de gran volumen, donde se sedimentan los lodos remanentes, permitiendo la obtención de una calidad de agua de Clase C, apta para riego.

El agua superficial del cuerpo del agua almacenado en la laguna de clarificación está evacuada por medio de decantación por un sistema de cachimbas y alcantarilla que atraviesa toda la laguna en una longitud de 150 metros de largo. Este agua tratada, antes de ser evacuada al curso del Río Kumurana, es conducida mediante cañería y canaleta hasta un tanque de almacenamiento y distribución instalada cerca de tomas de agua para sistemas de riego existentes.

En los cuerpos de agua de funcionalidad de facilitar la sedimentación de los sólidos suspendidos y los metales pesados precipitados, el agua se tiene que almacenar mientras un periodo adecuado respecto al tiempo de sedimentación necesitado en un cierto cuerpo de agua. Eso significa que el tiempo de retención del agua en el cuerpo de agua considerado tiene que ser mayor al tiempo de sedimentación promedio:

$$t_{ret.} \geq t_{sed.} \quad (2.3.1.)$$

El tiempo de retención de agua en un cierto cuerpo de agua se deduce del volumen de almacenamiento $V_{eff.}$ de dicho agua y del caudal promedio anual $Q_{prom.}$, por lo cual este cuerpo de agua está transfluido. Con los valores indicados en la Figura 3 se puede calcular:

$$t_{ret.} = \frac{V_{eff.}}{Q_{prom.}} \quad (2.3.2.)$$

Calculando con un volumen de almacenamiento $V_{eff.}$ de $320m^3$ para los tanques de sedimentación y de $18'000m^3$ para la laguna de clarificación, se determina un tiempo de retención $t_{ret.}$ promedio del agua en los tanques de sedimentación de 5.2 horas y en la laguna de clarificación de más de 12 días antes de ser decantado.

El tiempo de sedimentación $t_{sed.}$ por el otro lado se deduce del tamaño de las partículas suspendidas y de la profundidad del cuerpo de agua recorrido por las partículas como ya explicado anteriormente en el capítulo 2.2. Para el rango de partículas de interés (0,01mm - 0,001mm), en consecuencia resulten tiempos de sedimentación de 2.5 horas a 10 días para los tanques de sedimentación y de 1.4 horas a 6 días en la laguna de clarificación.

Ya que el valor del tiempo de retención sobre todo en caso de la laguna de clarificación $t_{ret., lag}$ es mucho mayor que tiempos de sedimentación correspondiente $t_{sed., lag}$ de las partículas suspendidas de interés en las desagües crudas, se puede partir de que la gran mayoría de los metales pesados y minerales contaminantes serán eliminados por sedimentación por gravedad después de ser precipitado. En el caso de la laguna de clarificación, donde el agua está evacuado por decantación por un sistema de cachimbos sólo de la capa superficial de algunos centímetros de ancho, el efecto de purificación será además mayor.

Los lodos de los tanques de precipitación son descargados periódicamente a otra laguna natural, para deshidratación y transporte hasta sitios de disposición final. Paralelamente se dispone de estanques, construidos para alternar las descargas de lodos. De estos tanques se realiza el carguío y transporte de los lodos semisecos hasta los lugares de disposición final establecidos, los que pueden ser depósitos de colas del ingenio, es decir dique de colas o lagunas de sedimentación, fosas naturales o construidas con capas intermedias de tierra o huecos de interior de la mina, que tengan las condiciones de aislamiento y un régimen hidráulico controlado. La opción más barata es descargar los lodos en un dique de colas o acumular en fosas naturales, en puntos de la quebrada donde no hay actividades que pueden afectar su estabilidad física y química.

En respecto del almacenamiento de los lodos acumulados se debe tomar en cuenta que estos compuestos secundarios en contacto con aguas ácidas vuelven a disolverse y pueden propagarse con flujos de drenaje ácido. Por lo tanto, el factor más determinante para su disposición es evitando contacto con aguas de mina o drenajes de roca. Por eso es vital cubrir los lodos por capas de tierra estéril del lugar, hasta llegar a colmatar la fosa, para luego impermeabilizar con una cobertura de arcilla y geomembrana.

El control operativo es fundamental para que funcione correctamente el sistema de tratamiento activo. Asimismo se dotara de los materiales necesarios para realizar trabajos de muestreo para control operativo y monitoreo ambiental. El control del proceso se realiza en forma combinada, manual y mecanizada; para regular el pH y la adición de lechada de cal se dispone de una cuba de

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

dosificación, donde se disuelve una cantidad de cal viva equivalente a un día de consumo. La fracción de cal que reacciona pasa en forma de lechada a un tanque agitador, y de este a un alimentador giratorio de disco que permite una alimentación regular, con una concentración estable y homogénea. Se dispone de un registrador continuo de pH con un electrodo sumergible, que coadyuvará en los trabajos de control operativo y en trabajos de evaluación. El alimentador electromecánico de lechada de cal y el medidor de pH son los instrumentos más esenciales de la plana de caleo, por lo que estarán en un ambiente cerrado y seguro, por razones de seguridad contra los cambios climáticos y seguridad física de las instalaciones. Por otro lado, las descargas de lodos, su almacenamiento y transporte se realizan en forma manual. Sin embargo, se tiene una capacidad de acopio que puede durar hasta un mes.

Planta de tratamiento activo Kumurana / La Lava

(Corte transversal)

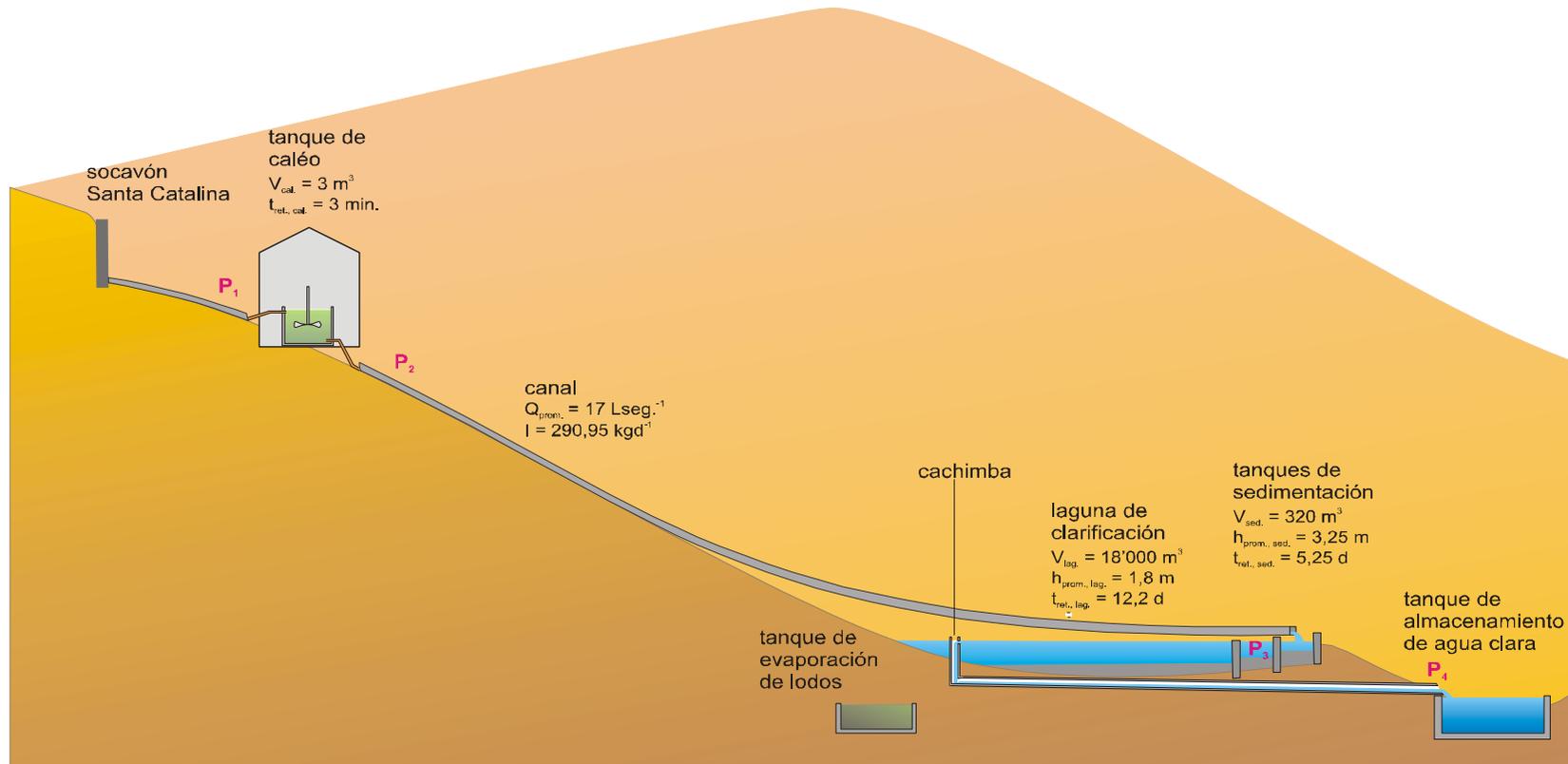


Figura 3: Esquema de funcionamiento de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava: Separación de los sólidos suspendidos, dosificación y preparación de lechada de carbonato de calcio, neutralización de la acidez mediante lechada de cal (tratamiento químico, ajuste de pH), oxidación de iones ferrosos a férricos en un canal de aireación, precipitación y sedimentación de metales pesados (tratamiento físico-químico) en los tanques de sedimentación y en la laguna de clarificación, descarga, almacenamiento temporal para deshidratación y disposición final de lodos de compuestos secundarios de metales pesados y conducción de las aguas tratadas hasta el sistema de almacenamiento, distribución y uso por parte de grupos de beneficiarios. Las muestras de agua se tomaron en los dos puntos P₁, P₂, P₃ y P₄.

3. Campaña de investigación

3.1. Metodología

3.1.1. Muestreo

En el plan de muestreo existen cuatro puntos de muestreo, uno a la fuente de alimentación de la planta de caléo, el segundo a su salida, el tercero a la entrada del agua químicamente tratada al sistema de sedimentación y el último a la salida de ese sistema (ver Figura 3):

- Punto de medición 1 (P_1): Entrada a la planta de caléo.
- Punto de medición 2 (P_2): Salida de la planta de caléo.
- Punto de medición 3 (P_3): Entrada al sistema de sedimentación.
- Punto de medición 4 (P_4): Salida del sistema de sedimentación.

Se recogió una muestra de agua en cada punto para análisis de todos los parámetros (**caudal, plomo, cadmio, zinc, cobre, hierro, estaño, cianuro, arsénico, sólidos suspendidos, pH, potencial mV y la temperatura**) en un intervalo de tiempo de 10 días durante 30 días (ver Tabla 2 – Tabla 5). La frecuencia de muestreo se determinó en respecto del tiempo de retención del agua en la presa de colas, que se estimó en un promedio de más de 10 días (ver cap. 2.3.).

3.1.2. Métodos de muestreo

La lista de métodos y procedimientos a ser usados en el campo y en el laboratorio y los límites de detección de los diferentes métodos individuales son:

Determinación del pH, del potencial mV y de la temperatura

La acidez / alcalinidad se determina generalmente por método potenciométrico midiendo la concentración de H^+ iones hidrógenos de forma instrumental empleando un pH-metro. Igualmente de forma potenciométrica se define el potencial mV la totalidad de los iones negativos suspendidos en el agua.

Equipo de medición:

- Equipo pH/mV Handylab SCHOTT, rango del pH-metro: -2 a 16, precisión: +/-1 dígito, resolución: 0.01.
- Accesorios: Electrodo combinado de medición de pH, solución KCl 3mol/L (300L) para conservar el electrodo.

Procedimiento:

Se limpia el electrodo de medición combinada de pH / potencial mV con agua destilado. Se mide el pH, el potencial mV y la temperatura del agua esperando que la se estabilice la lectura. Después de utilizarlo se enjuaga otra vez con agua destilada.

Determinación de los otros parámetros químicos y microbiológicos

Todo los otros parámetros químicos, es decir las concertaciones del plomo (Pb), del cadmio (Cd), del zinc (Zn), del cobre (Cu), del hierro (Fe), del cianuro (Cn), del estaño (Sn) y del arsénico (As) y además de los sólidos suspendidos (SST) en las muestras de agua fueron analizados por el laboratorio SGS ENVILAB (Société Générale de Surveillance), zona 12 de octubre, calle 10, N°115

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

carretera a Oruro, El Alto, Bolivia. Las muestras de agua fueron guardados a temperaturas entre 1 y 4 °C hasta se les entregó al laboratorio unos días después de la toma de muestras.

3.2. Cronograma del seguimiento

Para tener valores representativos del funcionamiento de la planta de tratamiento activo de Kumurana – La Lava por el programa de monitoreo, se escogió un intervalo de tiempo de diez días para medir los parámetros químicos de las aguas negras, tomando en los puntos de medición P₁, P₂ y P₃ cada vez una muestra de agua en la mañana y otra en la tarde y en el punto de medición P₄ cada vez sólo una muestra en la tarde. Las mediciones serán replicadas totalmente en tres días, abarcando de esta manera un periodo de un mes (ver Tabla 2 a Tabla 5).

Eso se justifica, por un lado por el tiempo de retención promedio del sistema que se estima en poco más de 10 días, por otro lado por el periodo de monitoreo que tiene que extenderse a un tiempo bastante largo para nivelar las fluctuaciones estadísticas diarias y/o semanales por razón de las actividades mineras variables en el tiempo.

3.3. Presupuesto del programa de investigación

Siguiendo el cronograma de seguimiento anteriormente explicado, se puede calcular el presupuesto para el programa de monitoreo de la siguiente manera (ver Tabla 6 y Tabla 7):

Para cada parámetro monitoreado (línea A), la cantidad de muestras que se recomienda tomar está anotada en la línea B. En la línea C están alistados los precios por entidad, es decir por cada análisis de una muestra de agua en respecto al parámetro correspondiente con el límite de detección adquirido, anotado en la línea D. Para conocer el precio total de cada parámetro por punto de muestreo, se calcula el producto del precio por entidad por la cantidad de muestras por punto de muestreo por cada parámetro (línea E). La suma de estos precios por punto de muestreo se encuentra en la línea F y la cantidad de puntos de muestreo están anotados en la línea G de la Tabla 6 y Tabla 7. Finalmente, el total del programa de monitoreo, anotado en la línea H de la Tabla 6 y Tabla 7, se conoce multiplicando la suma por punto de muestreo con la cantidad de dichos puntos de muestreo. Con los datos anotados se puede entonces estimar que el análisis de las muestras de agua abarcan un total de US\$ 1'134.

Calculando con una distancia de viajes de 3720km² y un total de horas de trabajo de 340 horas o 42½ días³ se puede adicionalmente estimar los costos de transporte en US\$ 405 y los costos de trabajo en US\$ 1'488 (ver Tabla 8). En consecuencia sale un total para todo el programa de investigación planificado por los expertos de la Fundación MEDMIN de US\$ 3'027.

² Las distancias implementadas en el cálculo son La Paz – Potosí := 550km, Potosí – Kumurana := 70km (cada estrecho se tendrá recorrer 6 veces).

³ El total de horas de trabajo se calcula por la suma de las horas en el campo (dos personas durante 9 días, días de viaje inclusos) con el total del trabajo necesario para la evaluación de los datos y la elaboración del informe final (4 semanas de 5 días de trabajo). Se calcula con el honorario de profesional de US\$ 35 por día (ver Tabla 8).

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

Tabla 6: Cálculo de presupuesto para el análisis de las muestras de agua de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava; P₁, P₂ y P₃

A: Análisis de agua	Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	Sn	Cn	As	SST	pH	Pot.	T	Prep. _{muestra}
B: # muestras por punto de muestreo	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
C: Precio por entidad [\$]	7	2	2	2	2	2	2	12	10	8	0	0	7
D: Límite de detección adquirido	0.02ppm	0.01ppm	0.02ppm	0.01ppm	0.05ppm	0.5ppm	0.01ppm	0.05ppm	0.5ppm	1%	1%	1%	
E: Precio por punto de muestreo [\$]	42	12	12	12	12	12	12	72	60	48	0	0	42
F: Suma por punto de muestreo	324												
G: # puntos de muestreo	3												
H: Análisis de agua total [\$]	972												

Tabla 7: Cálculo de presupuesto para el análisis de las muestras de agua de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava; P₄

A: Análisis de agua	Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	Sn	Cn	As	SST	pH	Pot.	T	Prep. _{muestra}
B: # muestras por punto de muestreo	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
C: Precio por entidad [\$]	7	2	2	2	2	2	2	12	10	8	0	0	7
D: Límite de detección adquirido	0.02ppm	0.01ppm	0.02ppm	0.01ppm	0.05ppm	0.5ppm	0.01ppm	0.05ppm	0.5ppm	1%	1%	1%	
E: Precio por punto de muestreo [\$]	42	12	12	12	12	12	12	72	60	48	0	0	42
F: Suma por punto de muestreo	324												
G: # puntos de muestreo	1												
H: Análisis de agua total [\$]	324												

Tabla 8: Cálculo de presupuesto de los costos de trabajo y de transporte para el monitoreo en la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava

Costos de trabajo

A: Trabajo de campo [h]	180
B: Trabajo de oficina [h]	160
C: Trabajo total [d]	42.5
D: Salario [\$ / d]	35
E: Costos de trabajo [\$]	1'488

Costos de transporte

A: Distancia recorrida [km]	3'720
B: Uso de gasolina [L/100km]	25
C: Precio de gasolina [Bs./L]	3.31
D: Costos de transporte [Bs.]	3'078
E: Costos de transporte [\$]	405

4. Apéndice

4.1. Expresiones científicas

Biodiversidad: Riqueza y diversidad de especies de flora y fauna encontrado en un cierto ecosistema.

Capacidad de buffer: La posibilidad de un sistema químico de estabilizar el pH alrededor un cierto valor de pH por el equilibrio carbonato (el más frecuente en la naturaleza) o otras sustancias buffer.

Bioacumulación: La acumulación de sustancias químicas en organismos biológicos independiente de si la sustancia sea consumida por la nutrición contaminada o absorbido directamente del medio ambiente. Este fenómeno causa un aumento de las sustancias acumuladas en la cadena trófica.

Balance hídrico: Calculo del equilibrio de los procesos de transporte del agua en un sistema casi-cerrado, es decir partiendo de la teoría de que la suma de los flujos que entran y de los que salen de un ecosistema sean nula.

Biodiversidad: Riqueza y diversidad de especies de flora y fauna encontrado en un cierto ecosistema.

Colas: Desperdicios generados por la actividad minera en el proceso de molienda.

Flujo de materia: Proceso de transformación respecto de un cierto elemento o compuesto, partiendo de la teoría de que el total de la masa en un cierto ecosistema sea mantenido.

4.2. Información adicional

4.2.1. Velocidad y tiempo de sedimentación de forma laminar

Ley de Stokes: $v_{sed.} = \alpha \cdot B \cdot r^2$ (4.2.1.1.)

$$= \alpha \cdot \frac{2g(\rho_s - \rho_w)}{9\mu} \cdot r^2 \quad [\text{mseg.}^{-1}]$$

Con:

α := Factor de forma (para esferas $\alpha = 1$) []

g := Constante gravitacional = 9.814 [mseg.⁻²]

ρ_s := Densidad de la partícula (para cuarzo $\rho_s = 2650$) [kgm⁻³]

ρ_w := Densidad del agua = 998 [kgm⁻³]

μ := Viscosidad dinámica del fluido (para agua $\mu = 10^{-3}$) [kgm⁻¹seg.⁻¹]

Tiempo de sedimentación: $t_{sed.} = \frac{h}{v_{sed.}}$ [seg.] (4.2.1.2.)

4.2.2. Límites permisibles y concentraciones naturales

Tabla 9: Límites permisibles para concentraciones de metales pesados en suelos

Pautas de salud	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Fe [mg/kg]
Holanda (niveles de acción)	55	530	720	190	12	
Estados Unidos ² (límites máximos)			4	2	0,08	1000 (?)
Canadá (límites máximos)		200	400	100	8	
Alemania (límites máximos)		500	300	500	2	
Suiza (límites máximos)		200		150	2	
Chile ³ (límites recomendados)	40	200			0,5	
Suiza (valor indicativo ⁴)		50	150	40	0,8	

² Valores permisibles en suelos definidos como objetivos medioambientales multimedia (Fitchko 1989). Tomada de Canter L. (1997).

³ Límites recomendados por INTA Chile (1996).

⁴ Valores indicativos jurídicamente no son vinculatorio.

Tabla 10: Límites permisibles para concentraciones de metales pesados en plantas de forraje

Pautas de salud	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Fe [mg/kg]
Suiza (límites máximos)	2	40			1	

Tabla 11: Concentraciones en la naturaleza de metales pesados en suelos

Concentración de trasfondo natural	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Fe [mg/kg]
Cuenca Pilcomayo ¹		6 - 34	17 - 132	3 - 24	<0,05 – 0,3	

¹ Datos obtenidos de Kabata-Pendias (1995).

4.3. Bibliografía

4.3.1. Literatura científica

Deutscheschweizerische Mathematikkommission (DMK), Deutscheschweizerische Physikkommission (DPK) (1977 4. ed): Formeln und Tafeln; Mathematik - Physik. Orell Füssli Verlag, Zürich.

Ley de Medio Ambiente (27 – Abril – 1992): Ley N° 1333.

Métodos Normalizados. Edición 20 APHA (American Public Health Association) - AWWA (American Water Works Association) - WPCF (Water Pollution Control Federation) y ASTM (American Society for Testing and Materials).

Fent K. (1998): Ökotoxikologie: Umweltchemie, Toxikologie, Ökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart / New York.

Reglamentos a la Ley de Medio Ambiente (1995): Decreto Supremo N° 24176.

Schwarzenbach R. P., Gschwend P. M. und Imboden D. M. (1993): Environmental Organic Chemistry. John Wiley & Sons, Inc. New York etc.

Sigg L. und Stumm W. (1994): Aquatische Chemie: Eine Einführung in die Chemie wässriger Lösungen und natürlicher Gewässer. Vdf Verlag der Fachvereine an den Schweizerischen Hochschulen und Techniken AG und B. G. Teubner, Zürich / Stuttgart.

4.3.2. Páginas de Web

<http://www.eng.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/SEDIMENT/sedsettle.html>