

**MEJORAMIENTO DEL ACTUAL TRATAMIENTO ACTIVO Y PROPUESTA DE  
UN MÉTODO PASIVO PARA EL MANEJO DE DRENAJES ÁCIDOS EN EL  
DISTRITO MINERO AUROARGENTÍFERO VETAS – CALIFORNIA  
(SANTANDER)**

RAUL MORENO JEREZ  
JAZMIN ROCIO JIMENEZ JAIMES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA

2012

**MEJORAMIENTO DEL ACTUAL TRATAMIENTO ACTIVO Y PROPUESTA DE  
UN MÉTODO PASIVO PARA EL MANEJO DE DRENAJES ÁCIDOS EN EL  
DISTRITO MINERO AUROARGENTÍFERO VETAS – CALIFORNIA  
(SANTANDER)**

RAUL MORENO JEREZ  
JAZMIN ROCIO JIMENEZ JAIMES

Monografía para optar el título de  
Especialista en Ingeniería Ambiental

Director:  
ERWIN WOLFF CARREÑO  
Geólogo Especialista en Ingeniería Ambiental

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA

2012

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	21
1. DRENAJES ACIDOS.....	24
1.1. DEFINICION DE LOS DRENAJES ACIDOS.....	24
1.2. COMO SE FORMAN LOS DRENAJES ACIDOS.....	25
1.3 PREDICCION DE LOS DRENAJES ACIDOS.....	29
1.4 PASOS A TENER EN CUENTA PARA PREDECIR UN DRENAJE ACIDO ...	32
1.5. CARACTERIZACION DE LOS DRENAJES ACIDOS.....	35
2. LA PROBLEMÁTICA EN EL MUNDO DE HOY.....	37
2.1 LOS DRENAJES ACIDOS DE MINAS EN COLOMBIA.....	38
2.2 LOS DRENAJES ACIDOS EN EL DISTRITO MINERO DE VETAS Y CALIFORNIA.....	39
3. CONTROL DEL DRENAJE ACIDO.....	41
3.1 PREVENCIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN.....	41
3.2 TRATAMIENTO DE LAS SOLUCIONES GENERADAS.....	43
4. SISTEMA DE PREVENCION Y CONTROL DE LOS DRENAJES ACIDOS EN EL MUNICIPIO DE CALIFORNIA.....	45
4.1. SISTEMAS ACTIVOS PARA TRATAMIENTO DE LOS DRENAJES ACIDOS UTILIZADOS EN DISTRITO MINERO DE VETAS Y CALIFORNIA EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER.....	47
4.2 SISTEMAS PASIVOS PARA TRATAMIENTO DE LOS DRENAJES ACIDOS. FITOREMEDIACION.....	53
4.2.1. Lemna Minor.....	56
4.3 FACTORES QUE SE DEBEN TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO DEL TRATAMIENTO:.....	59
4.4. ETAPAS DEL PROCESO PROPUESTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS DE MINAS.....	60
5. RECOMENDACIONES.....	66

6. CONCLUSIONES .....	67
BIBLIOGRAFIA .....	68
ANEXOS.....	70

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura No. 1 Planta De Tratamiento De Soluciones Acidas De Bocaminas .....	50
Figura No. 2 Disposición de las celdas en un Humedal aerobio y circulación del agua.....	55
Figura No. 3 Planta Piloto Propuesta para Tratar las Soluciones Acidas Provenientes de las Bocaminas.....	64
Figura No. 4 Planta Piloto Propuesta para Tratar las Soluciones Acidas Provenientes de Desmontes o Relaveras.....	65

## LISTA DE GRAFICOS

	<b>Pág.</b>
Grafico No 1 Evolución de conductividad y Sulfato en lixiviado de una Muestra con respecto al tiempo. <sup>[1]</sup> .....	34

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

	<b>Pág.</b>
Fotografía No. 1 Drenaje acido de mina entrando al efluente hídrico.....	21
Fotografía No. 2 . Drenaje acido de mina, color rojizo .....	40
Fotografía No. 3 Celda de Humedad .....	34
Fotografía No. 4. Drenaje acido generado en la etapa de exploración de un Proyecto Minero, en California Santander.....	45
Fotografía No. 5. Tratamiento Activo usando dosificación con temporizador utilizando agitación mecánica.....	47
Fotografía No.6 Sistema conformado por una serie de piscinas intercomunicadas donde se realizan los diferentes procesos de mezcla de los compuestos químicos.....	48
Fotografía No. 7 Dosificación de reactivos químicos .....	49
Fotografía No. 8 Sedimentación .....	49
Fotografía No. 9 Turbulencia generada por un Retro mezcladorHidráulico. ....	51
Fotografía No. 10 Floculadores Hidráulicos Horizontales. ....	52
Fotografía No. 11 Sistema de Sedimentación tipo laminar .....	53
Fotografía No. 12 Lemna minor extendida al frente de la bocamina.....	56
Fotografía No. 13 Lemna Minor. Enciclopedia Google .....	58
Fotografía No. 14 Lemna Minor. California, Santander.....	58
Fotografía No. 15 Cascada de aireación propuesta.....	62

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla No. 1 Sulfuros más Importantes.....	26
Tabla No. 2 Mineralización distritos mineros Vetas-California (Santander) .....	40
Tabla No. 3 Caracterización de algunos Drenajes Acidos en el municipio de California, Santander .....	46

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo No. 1 RESULTADO DE LA SOLUCIÓN DONDE SE ENCONTRO LA PLANTA LEMNA PROPUESTA PARA REALIZAR LA FITOREMEDIACION EN EL SISTEMA PASIVO .....	70
Anexo No. 2 RESULTADO DE ANÁLISIS QUIMICO DE LAS SOLUCIONES DE LAS AGUAS ACIDAS DE BOCAMINAS.....	71

**TITULO:** MEJORAMIENTO DEL ACTUAL TRATAMIENTO ACTIVO Y PROPUESTA DE UN MÉTODO PASIVO PARA EL MANEJO DE DRENAJES ÁCIDOS EN EL DISTRITO MINERO AUROARGENTÍFERO VETAS – CALIFORNIA (SANTANDER)

**AUTOR:** RAUL MORENO JEREZ  
JAZMIN ROCIO JIMENEZ JAIMES

**PALABRAS CLAVES:** Drenaje ácido, Fitorremediación, drenajes de calizas anoxicas, los agentes contaminantes del agua

**CONTENIDO:**

El drenaje ácido ocurre en la naturaleza asociado a la exposición de las rocas al ambiente. Para el tratamiento de los Drenajes Ácidos, remoción de los metales pesados y la obtención de un pH adecuado, se han diseñado una serie de sistemas y métodos para devolverle a las aguas estándares normales desde el punto de vista físico-químico, se realiza una regulación de los parámetros como contenidos de metales pesados, sólidos suspendidos y pH.

Existen varios sistemas de control que buscan la remoción de los metales pesados y la regulación de pH; un sistema empleado es el de piscinas consecutivas y la aplicación de sustancias químicas como sulfato de Aluminio.

Existen otros sistemas más económicos como los tratamientos pasivos que incluyen métodos de aireación, pozos de sedimentación, humedales aeróbicos y anaeróbicos, drenajes de calizas anoxicas, sistemas reductores de alcalinidad y fitorremediación.

Dentro de los tratamientos para la descontaminación de los Drenajes Ácidos hemos contemplado los procesos de bio-acumulación de metales por parte de la flora nativa como la Lemna Minnor en beneficio de los ecosistemas que al ser intervenidos por los Drenajes Ácidos, generan un impacto negativo en las fuentes de agua afectando la flora y la fauna y lógicamente los asentamientos humanos que dependen del suministro del líquido para su subsistencia.

Los procesos de fitorremediación para el manejo y control de drenaje ácido consisten en el uso de plantas para limpiar los agentes contaminantes del agua. El objetivo es utilizar una especie nativa de las minas de California y Vetas para absorber los metales pesados y los contaminantes de las aguas de la bocamina.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director: Dr. Erwin Wolff Carreño.

**TITLE:** OPTIMIZATION OF THE CURRENT ACTIVE TREATMENT AND PROPOSAL OF A PASSIVE TREATMENT FOR THE MANAGEMENT OF THE ACID DRAINAGE IN THE AUROARGENTIFEROUS MINING DISTRICT OF VETAS, CALIFORNIA, SANTANDER.

**AUTHOR:** RAUL MORENO JEREZ  
JAZMIN ROCIO JIMENEZ JAIMES

**KEY WORDS:** Acid Drainage, Phyto-remediation, anoxic limestone drains, the polluting agents of the water

**CONTENT:**

The acid drainage occurs in nature associated with exposure of rocks to the environment. For treatment of the acid drainage and removal of heavy metals and to obtain a suitable pH, we have designed a series of systems and methods for restoring to normal standards water from the standpoint of physico-chemical, an adjustment is performed parameters such as contents of heavy metals, suspended solids and pH.

There are several systems that seek to control the removal of heavy metals and pH regulation, a system used is the straight pool and the application of chemicals such as aluminum sulfate.

There are other economic systems as passive treatments that include methods of aeration, sedimentation wells, aerobic and anaerobic wetlands, anoxic limestone drains, reducing alkalinity systems and phytoremediation.

Among the treatments for the decontamination of acid mine drainage have been referred to the processes of bioaccumulation of metals by native plants such as Lemna Minnor benefit of ecosystem comprising at be taken over by Acid Drainage generate an impact negative water sources affecting the flora and fauna and human settlements who obviously depend on the supply of liquid for their livelihood.

Phytoremediation processes for handling and controlling Acid Drainage consist of using plants to clean the polluting agents of the water. The objective is to use a native species of the mines of California and Vetas to absorb heavy metals, polluting agents of waters of the pithead.

---

\* Work Degree

\*\* Faculty of de Physico-chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Specialization in Environmental Engineer. Directress: Dr. Erwin Wolff Carreño.

## GLOSARIO<sup>1</sup>

**ACUÍFERO:** 1. formaciones rocosas que contienen agua en cantidades recuperables. 2. Zona terrestre con rocas permeables capaces de retener cantidades de agua que pueden ser explotables. Si su parte superficial está en contacto con la atmósfera, se denomina acuífero libre; si está cubierto por rocas impermeables y el agua retenida está a presión mayor que la atmosférica, se denomina acuífero confinado.

**ANÓXICO:** un ambiente anóxico es aquel que carece de oxígeno. En el medio acuático, la contaminación por sustancias orgánicas favorece un intenso crecimiento bacteriano que consume el oxígeno disuelto en el agua.

**BOCAMINA:** 1. la entrada a una mina, generalmente un túnel horizontal. 2. Sitio en superficie por donde se accede a un yacimiento mineral.

**DESMONTE:** son los desechos que se generan producto de los trabajos realizados para llegar a la zona donde se encuentra el mineral. Así, por ejemplo, en el caso de una mina de tajo abierto hay que remover una gran cantidad de material de la superficie para poder llegar al cuerpo de mineral que será usado en el proceso productivo.

**ESTUDIOS GEOLÓGICOS:** recopilación de información geológica de un área o una región, con un objetivo primordial (minería, exploración minera, obras civiles, entre otros). Un estudio geológico provee información sobre litología, estructuras, ocurrencias minerales, entre otros. Un estudio geológico puede ser general o detallado, por ejemplo, en el caso de túneles para obras civiles, un estudio

---

<sup>1</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, Ministerio de Minas y Energía, Glosario Minero.  
<http://plataformaenergetica.org/obie/system/files/Glosario%20Minero.pdf>

geológico suministra información de la zona a perforar metro a metro, con detalles de la estructura, permeabilidad, niveles freáticos, dureza de las distintas unidades rocosas y otros, para contar con la solución a los problemas que se van a encontrar antes de que la perforación alcance las zonas donde existan estos posibles problemas, para salvar de esta manera tiempo, dinero y hasta vidas humanas.

**FITORREMEDIACION:** uso de plantas y de su microbiota asociada para reparar suelos o aguas subterráneas contaminadas.

**FLOCULACION:** aglomeración de partículas finas suspendidas en un líquido, por métodos químicos o físicos.

**GNEIS<sup>2</sup>:** (sin. neis) (viejo término de los mineros alemanes) - Roca metamórfica del metamorfismo general, muy común, normalmente meso o catazonal, de grano medio o grueso, con foliación a menudo neta, caracterizada por franjas generalmente de tinte oscuro, ricas en minerales ferromagnesianos, alternando con franjas claras de cuarzo y de feldespatos, éstos últimos abundantes y visibles a simple vista.

**MINA ACTIVA:** mina en la cual actualmente se adelantan labores de explotación.

**MINA INACTIVA:** denominación que se da una mina, si se encuentra en cese debido a diversas circunstancias, pero hay, por ejemplo, vigilancia de la mina y labores de mantenimiento de equipos.

**MINERIA SUBTERRANEA:** actividades y operaciones mineras desarrolladas bajo tierra o subterráneamente.

---

<sup>2</sup> Se encuentra en Internet, <http://es.wikipedia.org/wiki/Gneis>

**MUESTREO:** es un proceso selectivo de separación, realizado sobre una porción dada de material (yacimientos, lote original o muestra previa) con el objeto de reducir su volumen, pero mantener sus características globales, físicas, químicas o mineralógicas con el fin de determinar las propiedades o composición del material original.

**NEUTRALIZACIÓN:** 1. adición de un material ácido o alcalino al agua o al suelo para ajustar su pH hasta alcanzar el valor de 7 (neutro). 2. proceso por el que una disolución ácida o básica pasa a ser neutra. Las disoluciones ácidas se neutralizan con disoluciones básicas y al revés.

**OXIDACION:** cambio en el estado de oxidación de un elemento representado por la pérdida de electrones. Dícese también del proceso durante el cual son eliminadas sustancias químicas oxidables como carbono y azufre presentes en el mineral por la acción del oxígeno u otro agente oxidante.

**PISCINA DE SEDIMENTACIÓN:** excavación artificial destinada a la acumulación de sólidos y líquidos con alto contenido de sedimentos, cuya función principal es permitir la decantación de los sólidos en suspensión en un determinado período de tiempo.

**RELAVES (O COLA)<sup>3</sup>:** son desechos tóxicos subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas. Los relaves contienen altas concentraciones de químicos y elementos que alteran el medio ambiente, por lo que deben ser transportados y almacenados en «tanques o pozas de relaves» donde lentamente los contaminantes se van decantando en el fondo y el agua es recuperada o evaporada. El material queda dispuesto como un depósito estratificado de materiales sólidos finos. El manejo de relaves es una operación clave en la recuperación de agua y para evitar

---

<sup>3</sup> Op,cit.

filtraciones hacia el suelo y napas subterráneas, ya que su almacenamiento es la única opción.

**SEDIMENTADOR:** tanque redondeado usado en plantas de tratamiento de minerales para separar sólidos de líquidos

**TURBIDEZ:** 1. disminución de la transparencia del agua causada por la presencia de partículas sólidas en suspensión. 2. Es el aspecto que ofrece un líquido a causa de la presencia de materias en suspensión. Su intensidad puede servir para apreciar la concentración de estas materias.

## JUSTIFICACION

El drenaje ácido ocurre en la naturaleza asociado a la exposición de las rocas al ambiente. La exposición de los minerales sulfurosos al aire, agua, procesos microbianos y oxidación produce drenajes ácidos, estos generalmente se caracterizan por ser fuertemente ácidos y poseer alta cantidad de metales pesados disueltos. Cuando esta agua contaminada entra a las corrientes de agua superficiales, ocurren alteraciones del ecosistema. La flora y la fauna pueden ser afectadas y los recursos hídricos pueden tornarse dañinos para el consumo humano o los propósitos agrícolas e industriales. También la infiltración del drenaje ácido de la mina puede contaminar suelos y el agua subterránea.

Hoy en día toda la población que se encuentra directamente bajo el impacto del desarrollo de la minería y las mismas empresas mineras deben tener claro la importancia de cada una de las etapas de un Proyecto Minero. Hay que reconocer que en todas las etapas pueden desarrollarse efectos de drenaje ácido, este tema es muy conocido y tiene mucha variabilidad de proyecto en proyecto, esto se debe principalmente a que la geología y el ambiente varían de un lugar a otro entonces se hace difícil de predecir el drenaje ácido y se debe caracterizar cada lugar de acuerdo a las diferentes condiciones que se presentan.

En el caso del Distrito minero auroargentífero de Vetas y California actualmente se están aplicando tratamientos activos para el manejo de los drenajes ácidos provenientes de antiguas labores de pequeña minería, pero es importante resaltar el hecho de la permanencia por mucho tiempo de estos drenajes. Ante esta situación se plantea el mejoramiento del actual tratamiento activo y se realiza la propuesta de un método pasivo para el manejo de drenajes ácidos en este distrito minero, tratamiento pasivo que pueda ser aplicable durante todas las

etapas del proyecto minero, incluso en la etapa de Post-cierre que es donde se concentran verdaderamente los pasivos ambientales.

Plantear una solución para el tratamiento de los drenajes ácidos de mina, como la aplicación de métodos pasivos, que disminuyen los costos de aplicación y permiten una inversión baja en el mantenimiento teniendo en cuenta la permanencia en el tiempo de los mismos, ofrecen una solución factible y han entregado resultados satisfactorios en la reducción de la cantidad de metales pesados y acidez en los países donde se han aplicado. Los procesos aeróbicos y anaeróbicos apuntan a quitar los agentes contaminantes pero principalmente los procesos anaerobios tales como reducción bacteriana del sulfato muestran un mejor funcionamiento. La presencia de plantas, microorganismos y sustancias orgánicas es esencial para alcanzar un tratamiento acertado. Las plantas sirven como hábitat para poblaciones microbianas que actúan en el proceso de remoción y las sustancias orgánicas proporcionan una fuente de carbón para plantas y microorganismos, de tal modo que facilitan el proceso de remoción también.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los problemas más importantes que tiene que afrontar la Minería es sin lugar a dudas los Drenajes Ácidos por su contenido en elementos contaminantes provenientes de la roca con concentraciones de sulfatos y metales pesados por encima del límite permisible, elementos como Fe, As, Co, Ni, Cu, Pb, Mn y otros sulfuros principalmente de hierro, que dependen principalmente de la mineralogía de la zona donde se esté generando el drenaje, estos contaminantes van directamente a cambiar la composición de las aguas.

En épocas de verano las corrientes de los ríos disminuyen y los drenajes ácidos provenientes de antiguas labores mineras entran en contacto con las corrientes de agua superficiales aumentando su impacto, en la Fotografía No 1 se observa este fenómeno cuando se evidencia el cambio de coloración en las rocas del lugar puntual del vertimiento del efluente hídrico.

**Fotografía No. 1** Drenaje acido de mina entrando al efluente hídrico.



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Rocío Jiménez Jaimes

El presente trabajo, es una aplicación práctica del tratamiento pasivo de los drenajes ácidos. Sin embargo, existe la posibilidad de realizar un mejoramiento a los métodos activos que actualmente se están realizando en el tratamiento de aguas acidas.

En el distrito minero de California y Vetas el tratamiento aplicado es el método activo y se basa en un sistema de piscinas consecutivas para un mayor periodo de residencia del agua y la aplicación de sustancias químicas como sulfato de Aluminio y Carbonato de calcio. Los métodos activos para tratar las aguas ácidas tienen un costo muy elevado, por lo que no se puede mantener esta tecnología por un período prolongado una vez finalizada la vida de la mina. Máxime teniendo en cuenta que el problema de las aguas ácidas puede perdurar, según las estimaciones de Younger)<sup>4</sup> (1997) por cientos de años.

Existen otros sistemas más económicos, son los tratamientos pasivos de efluentes contaminados que buscan disminuir los elementos contaminantes de los drenajes a los estándares requeridos por la legislación. Los sistemas de tratamiento pasivo incluyen *sistemas de aireación, pozos de sedimentación, humedales aeróbicos y anaeróbicos, drenajes de calizas anóxicas y sistemas reductores de alcalinidad anaerobic wetlands.*

Un humedal natural tiene procesos de filtración, sedimentación, inmovilización física y química, descomposición química y biológica que proporcionan un método eficaz para remover agentes contaminantes, en este caso particular se propone utilizar la Lemna Minor para remover metales pesados como el cobre presente en estas soluciones. Esta propuesta es una solución que puede ser la base para

---

<sup>4</sup> YOUNGER ,Paul. Groundwater leachate control, conferencia on the wetland solution for minewater pollution. Water and effluent treatment news (3-9-97), vol 3,(n.15) p11

estudios posteriores con respecto a los procesos de Fito-remediación para el manejo y control de los Drenajes Ácidos.

Aunque en algunos casos el tratamiento en humedales construidos no puede alcanzar el estándar de efluentes, centenares de estos sistemas son ahora usados para disminuir concentraciones de contaminantes de minas activas. Un buen diseño realizado en base a una buena predicción de las características del drenaje ácido permite conocer un poco más su comportamiento, factor que puede mejorar considerablemente el tratamiento propuesto, entregando una opción eficaz para solucionar el problema.

## 1. DRENAJES ACIDOS

### 1.1. DEFINICION DE LOS DRENAJES ACIDOS

El drenaje ácido<sup>5</sup> es un agua de pH bajo, enriquecida en sulfatos y con grandes concentraciones de acidez. La acidez de los Drenajes ácidos es producida por oxidación e hidrólisis de minerales de sulfuros y está representada por acidez mineral (hierro, aluminio, manganeso y otros metales, que depende de la geología del depósito)

Las reacciones de oxidación ocurren en forma natural, y se aceleran por el aumento de exposición de la roca al oxígeno y al agua y por la acción catalizadora de algunas bacterias.

Los drenajes ácidos se caracterizan por tener valores de pH bajo entre 1,5 y 5 asociado a una acidez creciente y una alcalinidad decreciente en el transcurso del tiempo, tienen niveles elevados de metales disueltos, dentro de las características físicas se encuentra un color rojizo generalmente por la presencia del ión Fe (III) ó un color azul verdoso atribuida al Fe (II). Los cambios en la coloración se atribuyen a las reacciones de precipitación de los metales disueltos<sup>6</sup>.

Los drenajes ácidos cuando provienen del interior de antiguas labores mineras son denominados DAM, Drenajes Ácidos de Minas y cuando provienen de escombreras o relaveras, material de roca acumulada por el hombre se generan los llamados DAR, Drenajes Ácidos de Roca. Básicamente el principio en los

---

<sup>5</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, Ministerio de Minas y Energía, Glosario Minero.  
<http://plataformaenergetica.org/obie/system/files/Glosario%20Minero.pdf.op>

<sup>6</sup> Disponible en Internet Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas.  
<http://www.minem.gob>

DAM y los DAR es el mismo, la diferencia principal radica es en que el nombre Drenaje Acido de Mina se aplica a los drenajes provenientes de las bocaminas.

## **1.2. COMO SE FORMAN LOS DRENAJES ACIDOS**

En los procesos de formación de los Drenajes Ácidos se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

1. Existe Acidez debido a la oxidación de los sulfuros principalmente la Pirita, también se presenta acidez mineral debido a la presencia de sulfatos y otras sales solubles.
2. La acidez mineral ocurre sin oxidación en la superficie, existe la presencia de sulfatos que pueden ser primarios o depositados geológicamente con los minerales, también existen sulfatos secundarios, desarrollados en la zona de la tierra intervenida eso da inmediatamente una acidez por contacto.
3. El drenaje acido por oxidación de sulfuros es un proceso más lento. Se debe tener en cuenta que no solamente hay acidez cuando hay una exposición o lixiviación de metales en el agua, hay algunos metales como zinc, plomo antimonio y otros que sus sales se disuelven, sus sulfuros se oxidan y no generan ácidos pero le transfieren al agua carga química; Este fenómeno de la carga metálica es importante especialmente si hay presencia de Zinc y plomo.
4. Para caracterizar los Drenajes Ácidos de Minas es importante tener en cuenta que cuando los minerales contienen azufre, como los sulfuros, al estar en contacto con el ambiente producen oxidación formando ácido

sulfúrico y su metal asociado disuelto, según la mena que intervenga en el proceso.

El número de especies que forman los sulfuros es superior a 300, aunque tan sólo 30 pueden considerarse importantes, por encontrarse en grandes cantidades y estar más o menos difundidos. El resto suele poseer un interés muy limitado al coleccionismo o a alguna actividad científica concreta. Entre los sulfuros importantes y que están considerados como menas metálicas, se mencionan los siguientes:

**Tabla No. 1** Sulfuros más Importantes



Ag
As
As
As
Co y Ni
Co y Ni
Co y Ni
Ni
Sb
Bi
Cd

**Fuente:** Internet Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/Sulfuro>

Los componentes principales para la obtención del ácido son los minerales sulfurosos reactivos, agua que puede estar presente también en la atmósfera húmeda y un oxidante que es el oxígeno de la atmósfera o de algún compuesto químico. Como en cualquier reacción la velocidad de la misma así como la

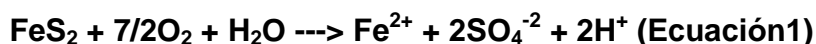
magnitud depende de una serie de factores secundarios como bacterias, pH, temperatura, etc.

Los minerales sulfurosos más comunes, considerados como fuente de DAR, son los minerales de hierro, en forma especial, la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_x$ ) y marcasita ( $\text{FeS}_2$ ).

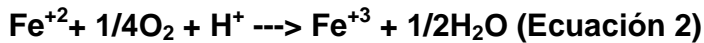
La oxidación y lixiviación de los minerales, generalmente como resultado de la generación de ácido a partir de los minerales de sulfuro de hierro asociados, pueden dar como resultado la liberación de acidez y metales disueltos en el agua de drenaje.

Todo mineral sulfuroso tiene el potencial de oxidarse y lixiviar metales. Los minerales de metales bases, tales como calcopirita ( $\text{CuFeS}_4$ ), enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), pueden encontrarse asociados a cuerpos mineralizados. La oxidación y lixiviación de los minerales, generalmente como resultado de la generación de ácido a partir de los minerales de sulfuro de hierro asociados, pueden dar como resultado la liberación de acidez y metales disueltos en el agua de drenaje.<sup>3</sup>

Las reacciones de generación de ácido se expresan generalmente como la oxidación de la pirita, uno de los minerales sulfurosos más comunes. Inicialmente, los sulfuros reaccionan con el oxígeno y el agua para formar sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), hierro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) e iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ). Esta reacción total de generación de ácido, en la que se muestra la pirita siendo oxidada por el oxígeno, puede representarse por la siguiente ecuación



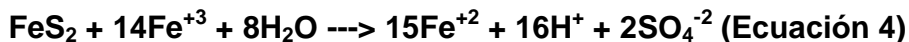
Posteriormente, el hierro ferroso reacciona con el oxígeno para formar hierro férrico<sup>[5]</sup>:



Dependiendo del pH en el ambiente alrededor del sitio de oxidación, el hierro férrico puede luego precipitarse en la forma de hidróxido (Ecuación 3), o puede, a su vez, ser utilizado como oxidante (Ecuación 4). A niveles de pH por encima de 3.5, el hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) tiende a precipitarse como hidróxido férrico. Esto forma el precipitado rojo que se observa en la mayoría de minas que generan ácido. Durante esta reacción, se liberan iones de hidrógeno adicionales.<sup>3</sup>



A medida que se desarrolla la generación de ácido y se consume la alcalinidad disponible, el hierro férrico, a su vez, sirve como oxidante y puede promover la oxidación química de los minerales sulfurosos. En el caso de la pirita, la reacción que ocurre es la siguiente<sup>3</sup>:



La oxidación química de la pirita (Ecuación 1) es una reacción relativamente rápida a valores de pH mayores que 4.5, pero mucho más lenta a niveles de pH más ácidos. La velocidad del suministro de oxígeno es el elemento que controla principalmente la velocidad de la oxidación química. A niveles de pH inferiores a 4.5, la oxidación por el hierro férrico se convierte en el proceso de oxidación dominante. La velocidad de producción de hierro férrico, a partir del ferroso (Ecuación 2), se convierte en la etapa controlante del proceso total de oxidación. Sin embargo, por catálisis biológica, esta reacción es relativamente rápida.<sup>3</sup>

Por lo general, se reconoce que ciertas bacterias<sup>7</sup> pueden acelerar la velocidad con la cual ocurren algunas de las reacciones anteriormente indicadas,

---

<sup>7</sup>Disponible en internet .Drenaje Ácido de Mina". [www.ecoamerica.cl](http://www.ecoamerica.cl) (Mayo 2007)

incrementando con ello la velocidad de generación de ácido. La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* es capaz de oxidar compuestos de azufre reducidos, así como oxidar el hierro ferroso en férrico (que entonces puede actuar como oxidante). Otras bacterias conocidas como participantes o acelerantes de la oxidación de los minerales sulfurosos son: *Thiobacillusthiooxidans* y *Sulfolobus*.<sup>[5]</sup>

### 1.3 PREDICCIÓN DE LOS DRENAJES ACIDOS

La identificación prematura de los materiales potencialmente generadores de ácido y el desarrollo de un plan de manejo adecuado de los desechos pueden reducir los problemas ambientales de largo plazo y los costos de las medidas correctivas.

Desde la etapa exploratoria debe iniciarse el estudio sobre el potencial de composición de un Drenaje Acido, a partir del momento en que se obtienen los núcleos de perforación debe existir un diseño de procedimiento en el manejo de los testigos para que no se efectúe lavado de los mismos, sin antes realizar el respectivo análisis mineralógico que permita identificar los sulfuros presentes, para tener un acercamiento en el potencial de sustancias presentes en el drenaje ácido.

En las zonas donde se desarrolle la etapa exploratoria de un proyecto minero particularmente, se puede determinar por los resultados de las exploraciones los posibles componentes del drenaje ácido de acuerdo a la mineralogía obtenida de la zona, sin necesidad de realizar un barrido de todos los elementos.

¿Bajo qué condiciones se debe realizar una evaluación del potencial del Drenaje ácido? Esto no quiere decir que cada vez que se abra un sendero se tiene que evaluar. Depende principalmente del volumen a remover, se procede entonces a estudiar el potencial, sí va a ver una excavación de alto volumen o que implica disponer roca en una zona donde pasa el agua, sí se van a generar las

condiciones para un cambio importante ahí se debe evaluar el potencial de Drenaje Acido, que incluye:

Caracterización geológica, pruebas estáticas, pruebas cinéticas o pruebas que simulan el drenaje ácido de Roca. El primer paso antes de realizar un estudio del potencial de los Drenajes ácidos en el laboratorio es aprender de la naturaleza, hacer una lectura directa en campo, partiendo de la observación geológica, por esta razón, cuando ya se han generado drenajes ácidos en una zona, la caracterización de estos, su comportamiento puede contribuir a realizar una buena aproximación del potencial de Drenaje ácido, cuando se presenta el estudio de impacto ambiental, dentro del desarrollo de un proyecto de gran minería.

Para realizar la predicción de un drenaje ácido se realiza una caracterización geológica. Dentro de esta caracterización geológica se determina el Material que se va a excavar, que puede ser un cuerpo mineralizado y dentro de ese cuerpo mineralizado tener una parte de material que se va a convertir en lastre y otro que se va a procesar. Con los geólogos se va sectorizando este cuerpo en sus distintas unidades geológicas y se diferencia la sección que corresponde al lastre, el cual se dispone en un botadero o escombrera.

El material de la escombrera, será generador de drenaje ácido, de este se deben tomar suficientes muestras para obtener un buen promedio de las condiciones de cada unidad, para realizar las siguientes pruebas:

**Pruebas Estáticas:** Una prueba estática define el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquellos potencialmente consumidores de ácido en una muestra. Los minerales que producen ácido son, por lo general, minerales sulfurosos reactivos. Estas pruebas no están diseñadas para tratar las características geoquímicas que dependen del tiempo, las cuales controlan la calidad del agua de drenaje.<sup>3</sup>

Los principales pasos en las pruebas estáticas son:

- Análisis del contenido metálico de la muestra sólida;
- Medición del pH en pasta
- Determinación del contenido total de azufre y de las especies sulfurosas;
- Titulación para la determinación del potencial de neutralización

La determinación del **Potencial de Acidificación (PA)** se realiza principalmente basándose en el análisis químico de la muestra por azufre total y azufre como sulfato. De esta manera se calcula por diferencia el azufre como sulfuro, que sirve de base para el cálculo del PA.<sup>3</sup>

**El Potencial de Neutralización (PN)** representa la cantidad total de minerales neutralizantes presentes en el material, principalmente carbonatos, se determina mediante una digestión ácida de una porción de muestra durante 24 horas, a temperatura controlada y posterior titulación.<sup>3</sup>

Obtenidos ambos potenciales se determina el **Potencial Neto de Neutralización (PNN)** por diferencia. Así:

$$\text{PNN} = \text{PN} - \text{PA}$$

El test estático es utilizado como un método de predicción cualitativo solo predice si existe o no potencial de generación de ácido en determinada muestra a evaluar y permite categorizar los materiales en tres grupos<sup>1</sup>:

<b>POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ACIDO</b>	<b>PNN (POTENCIAL NETO DE NEUTRALIZACIÓN)</b>	<b>PN/PA</b>
Bajo a Nulo	Mayor que 20 kg/t	Mayor que 3
Marginal	Menor que 20 kg/t	Entre 1 y 3.
Alto	Es negativo	Menor que 1

**Pruebas de extracción de Lixiviado:** Las pruebas de corto plazo de extracción de lixiviado se utilizan para determinar los constituyentes fácilmente solubles en una muestra. Muchos tipos de roca tienen constituyentes fácilmente solubles, disponibles para la lixiviación inmediata, totalmente independiente de cualquier generación de ácido que pudiera ocurrir. Al exponerse al aire, comenzará la oxidación de todo producto oxidable expuesto, contenido en el testigo de perforación, muestras por lotes o roca minada. La velocidad de oxidación y la acumulación de productos de oxidación dependerán de las condiciones de disponibilidad de aire y agua y de las condiciones de lixiviación a las cuales están sometidas las muestras o roca. Tienen el propósito de cuantificar la movilidad de los contaminantes y, mediante ello, permitir la clasificación del material con el fin de escoger el método adecuado de disposición y contención de desechos.<sup>[6]</sup>

**Pruebas cinéticas:** Las pruebas cinéticas confirman el potencial de generación de ácido y predicen la calidad del agua de drenaje, a corto y largo plazo, en el campo. Las pruebas cinéticas geoquímicas someten a intemperismo a las muestras, bajo condiciones controladas de laboratorio. Con el fin de confirmar el potencial para generar acidez, determinar las velocidades de generación de ácido, oxidación de sulfuros, neutralización y agotamiento de metales, con el fin de probar las técnicas de control y tratamiento. Las pruebas cinéticas están diseñadas para realizar una simulación en periodos de tiempo, para determinar el comportamiento de la muestra, al tener en cuenta la mineralogía no es necesario hacer una prueba cinética sobre 60 muestras su costo sería bastante alto. La prueba cinética debe realizarse por 6 meses como mínimo. Para obtener resultados representativos.

#### **1.4 PASOS A TENER EN CUENTA PARA PREDECIR UN DRENAJE ACIDO**

Finalmente, se propone aplicar la siguiente metodología cuando se trata de evaluar un drenaje ácido:

1. Caracterización de las muestras de drenaje ácido.
2. Aplicar el test ABA (Acid-Base Account) para medir el potencial de generación ácida de las muestras. se basa en un balance entre los componentes de la muestra potencialmente generadores de ácido (Potencial de Acidificación, PA) y los componentes neutralizantes de ácidos (Potencial de Neutralización, PN).<sup>3</sup>
3. Aplicar el Test TCLP (Procedimiento de Lixiviación para la Característica de Toxicidad) para evaluar la característica de toxicidad por lixiviación a las muestras.<sup>[1]</sup>
4. Aplicar el test de Celda de Humedad para evaluar la estabilidad de las muestras en el tiempo, realizando un seguimiento semanal, dependiendo de que exista solución para evaluar se analizan los parámetros de pH, conductividad, alcalinidad, acidez total, sulfato y Hierro; seguimiento quincenal para los elementos metálicos como Mo, Se, Ba, Cr, Mn, Pb, Zn, Cu o en su defecto los elementos que se hayan determinado que pueden estar presentes de acuerdo a la evaluación mineralógica y observación de testigos en campo. En la Fotografía No 3, se observa la celda de humedad

Como resultado de realizar estas pruebas se puede predecir:

- ✓ El comportamiento de pH durante el tiempo; determinando sus posibles variaciones.
- ✓ Como varia la alcalinidad con respecto al tiempo
- ✓ Cuales metales de estudio van a liberar las muestras.
- ✓ La cantidad de liberación de un elemento.

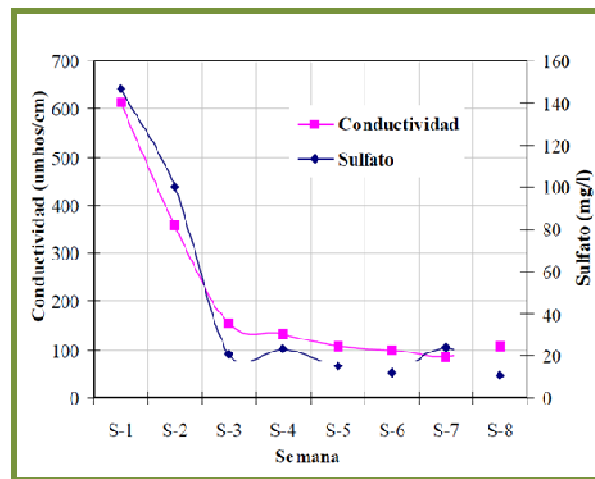
**Fotografía No. 2** Celda de Humedad



**Fuente:** Suministrado por Erwin Wolff Carreño

Se obtienen curvas de conductividad vs tiempo como la que se observa en el Gráfico 1, El análisis de la gráfica proporciona el tiempo en el cual se empieza a generar el sulfato.

**Gráfico No 1** Evolución de conductividad y Sulfato en lixiviado de una Muestra con respecto al tiempo.



**Fuente:** Informe Final<sup>8</sup> Proyecto 10000322-38. De CIMMT y S.S.A. Área Consultoría Ambiental. Aplicación Test ABA. Junio 2002

<sup>8</sup> Disponible en internet, [https://www.e-seia.cl/archivos/2.A\\_Aplicacion\\_Test\\_ABA\\_\\_TCLP\\_y\\_de\\_Celda\\_Humeda\\_a\\_Muestras\\_de\\_Minerales.pdf](https://www.e-seia.cl/archivos/2.A_Aplicacion_Test_ABA__TCLP_y_de_Celda_Humeda_a_Muestras_de_Minerales.pdf)

## 1.5. CARACTERIZACION DE LOS DRENAJES ACIDOS

Las reacciones químicas suceden de acuerdo a la caracterización ambiental del área en estudio: para caracterizar un sitio en particular se debe tener meteorología, hidrología, geología, química del agua porque no se tienen los mismos productos o materiales de un lugar a otro.

En la caracterización de un drenaje ácido se debe tener en cuenta los siguientes componentes, enumerados a continuación<sup>[1]</sup>:

- . pH, acidez, alcalinidad;
- . sulfatos;
- . nutrientes;
- . metales (disueltos o totales);
- . sólidos disueltos totales (SDT); y
- . sólidos suspendidos totales (SST).

Los drenajes ácidos presentan las siguientes características que los identifican<sup>[1]</sup>:

- . valores de pH por debajo de 7 hasta 1.5
- . alcalinidad decreciente y acidez creciente
- . concentraciones elevadas de sulfato
- . concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales)
- . concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales

Los drenajes ácidos deben ser caracterizados de manera individual, cada caso presenta una situación particular tomando en cuenta los siguientes aspectos:

1. Identificar la forma como se presentó el efluente.

2. Posteriormente se hace una caracterización geoquímica de los drenajes: pH, turbiedad, cadmio, cobre, hierro, plomo, zinc, realizando un barrido de elementos que dependen de la geología de la región.
3. Identificar el Caudal a tratar (Caudal medio). Resultado del análisis efectuado durante un año hidrológico medido a la misma hora cada día.

## 2. LA PROBLEMÁTICA EN EL MUNDO DE HOY

La contaminación por los Drenajes ácidos es un problema global, trasciende fronteras puesto que al viajar a través del agua, se contaminan varios efluentes hídricos e involucra a los países cuya industria minera ha sido una de sus principales actividades productivas. Se genera en minas de oro, plata, uranio, carbón, Zinc, yacimientos con presencia de sulfuros.

Canadá que goza de grandes extensiones de tierra y con un abastecimiento de agua de más de 9.000 lagos la contaminación minera afecta las corrientes de agua especialmente los del río Tsolum en Columbia Británica principalmente residuos de minas de Cobre, Mount Washington. Es importante resaltar la contaminación generada por las minas Equity Silver, Coast Copper, Windy Craggy en la Provincia de Ontario. También las minas ubicadas en la provincia de Quebec como la de Doyon o en la provincia de Manitoba y en el estado de Yukón con su mina Vangorda Plateau. Canadá cuenta actualmente con más de 200 minas en producción y es un país líder internacional del sector minero.

En el norte de Australia, EEUU, Reino Unido, España estudian las mejoras en la calidad de los drenajes ácidos provenientes de minas de oro, uranio y polimetálicas, con humedales dedicados a la eliminación de metales de aguas ácidas de mina.

En EEUU la USEPA encargó a la Colorado School of Mines realizar unos estudios Teóricos para el diseño de humedales dedicados a la eliminación de metales de aguas ácidas de mina. Una vez concluido este proyecto se publica un manual: Handbook for Constructed Wetlands Receiving Acid Mine Drainage en el que se describen numerosos casos de laboratorio y de campo, la filosofía de funcionamiento de los humedales, las variables de diseño, rendimientos

alcanzados en el tratamiento de aguas ácidas con elevados contenidos metálicos, así como los costes de construcción y operación de estos sistemas.

También en América latina la explotación minera está muy ligada a su desarrollo histórico; En Perú las minas, presentan un declarado problema de drenaje ácido; en áreas antiguas, <sup>9</sup>áreas abandonadas de desmontes mineros, en las minas activas y también en las áreas mineras de larga explotación como Cerro de Pasco, Huancavelica y Ayacucho.

En la mayoría de zonas en el Perú con problemas de Drenaje Ácido, no existe tratamiento de este, los cuales ingresan a los cursos de agua naturales, generando un impacto de contaminación sobre los efluentes hídricos.

La lucha contra los Drenajes Ácidos en los diferentes países cuya estrategia de desarrollo apunta a fortalecer la industria minera debe crear mecanismos para que la problemática no desborde en procesos irreversibles de contaminación de los acuíferos y los ecosistemas.

Los Drenajes Ácidos de Minas han sido tan antiguo como la minería misma y los países han tomado conciencia de los daños que pueden ocasionar a sus ecosistemas y se constituye como uno de los retos económicos y ambientales más importantes en la industria minera en el mundo.

## **2.1 LOS DRENAJES ACIDOS DE MINAS EN COLOMBIA**

---

<sup>9</sup> YOUNGER, paul L (1997) Corrección de aguas ácidas de mina aplicación de métodos activos y pasivos en Europa, Professor of Hydrogeochemical Engineering, School of Civil Engineering, and Geosciences, Devonshire Building, University of Newcastle upon Tine.

El término que es acuñado en estos momentos para describir el auge minero en Colombia es el de “locomotora de la Minería”, pero ante un panorama de desarrollo de grandes proyectos mineros, en el país, los métodos para tratar drenajes ácidos deben despertar el mismo interés. En Colombia la problemática de los Drenajes Ácidos se presentan principalmente en minería de Carbón y de Oro, en las explotaciones mineras activas, y en las minas que han sido clausuradas.

El azufre está presente en diferentes minerales y rocas y durante las labores mineras, se puede producir drenaje ácido, por esta razón no solamente está asociado a la minería auroargentífera. En Colombia dentro de las empresas del sector minero, energético y metales preciosos podemos mencionar la importancia que ha cobrado en los últimos tiempos la inversión extranjera en la minería aurífera, además la explotación de carbón en Colombia es muy importante, allí existen drenajes ácidos; todas estas empresas en pleno desarrollo que pueden en cualquier etapa de su proyecto minero generar el problema de drenaje ácido.

Los Drenajes ácidos que se producen en las minas en Colombia no tienen mayor diferencia con los que se producen en el mundo ya sea en explotaciones Subterráneas o a cielo abierto.

## **2.2 LOS DRENAJES ACIDOS EN EL DISTRITO MINERO DE VETAS Y CALIFORNIA**

California y Vetás son municipios de tradición minera, ubicados en el departamento de Santander en Colombia. En la zona minera existe, como característica la presencia de los sulfuros y una serie de minerales como la pirita, que a su vez por la descomposición en procesos industriales o artesanales de minería generan acidificación de las aguas. A continuación se presenta la mineralización de los dos distritos mineros:

**Tabla No. 2** Mineralización distritos mineros Vetas-California (Santander)

<b>MINERALIZACIÓN CALIFORNIA</b>	Oro Fino, Sulfuro de hierro (pirita), Sulfuro de cobre (calcosina – covelina), Sulfuro de hierro – cobre (bornita – calcopirita), Sulfuro de arsénico – cobre (enargita), Sulfosal de arsénico (tenantita), Sulfosal de antimonio (tetraedrita), Sulfuro de plomo (galena), Sulfuro de zinc (esfalerita), Alunita (Sulfato K, Al), Jarosita (Sulfato K, Fe).
<b>MINERALIZACIÓN VETAS</b>	Oro grueso, Sulfuro de hierro (pirita - marcasita), Sulfuro de plomo (galena), Sulfuro de zinc (esfalerita).

**Fuente:** Convenio Cooperación Técnica Colombo – Alemana, 1998

En el distrito minero de Vetas y California desde la época de la colonia hasta ahora la extracción del oro se ha hecho en forma artesanal y la gran mayoría de las minas se han realizado en labores subterráneas, en estos túneles se ha presentado la generación de drenajes ácidos de mina.

En la Fotografía No 2 se puede observar el cambio en las características físicas del agua, cuando esta es afectada por presencia de contaminantes, el agua cambia de color tornándose rojo ladrillo, indicador generalmente de presencia de hierro en la solución, el drenaje ácido proviene de una bocamina ubicada en California, Santander.

**Fotografía No. 3 .** Drenaje ácido de mina, color rojizo



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Jiménez

### **3. CONTROL DEL DRENAJE ACIDO**

Existen dos líneas de acción para manejar el drenaje ácido las cuales se enuncian en orden de preferencia:

#### **3.1 PREVENCIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN.**

Cuando se habla de prevención, se efectúa el control primario, básicamente consiste en ejercer una vigilancia de las reacciones de generación de ácido. Es fundamentalmente el control de todo producto soluble y la prevención de oxidación y generación de ácido en el futuro.

La opción más conveniente es la prevención de las reacciones de oxidación, mediante la eliminación de uno o más de los componentes esenciales, o bien mediante el control del ambiente con el fin de limitar la velocidad de generación de ácido a un nivel insignificante. Si se puede lograr el control primario, los productos de la generación de ácido no se manifestarán y el control secundario o terciario será innecesario. Se puede efectuar como se describe a continuación:

Cuando existe la pirita y otros sulfuros de acuerdo a la mineralogía de la zona, bajo la presencia conjunta del agua y del oxígeno para la progresión del proceso, se genera drenaje ácido. Teniendo en cuenta lo anterior, el control del drenaje ácido se puede efectuar al remover la fuente de oxígeno (sumersión total en agua), el proceso para la formación del drenaje ácido no se lleva a cabo y se aplica en escombreras o relaves. De la misma manera, la producción de Drenaje Ácido puede ser considerablemente retardada o detenida inhibiendo la reproducción bacteriana mediante un agente bactericida. (Se ha comprobado que la

inhibición de los microorganismos puede llegar a reducir la producción de ácido en un 75%).

Dentro de las medidas de manejo aplicadas a los drenajes ácidos, se presentan algunas alternativas básicas como:

- La cantidad del Drenaje ácido se limita mediante el control del flujo de agua; al mismo tiempo, se recolecta y trata este drenaje.
- Si es el caso de una bocamina, realizar el recorrido dentro del túnel para identificar si se generó en un punto en particular y se puede realizar la captación de la solución, desde el interior dentro de la bocamina, esta práctica impide un recorrido a través del túnel disolviendo metales que proporcionan mayor concentración y carga de elementos contaminantes a la solución.
- Exclusión del Agua: Se puede realizar recubriendo y sellando los materiales. La desviación y/o cubiertas de agua de superficie pueden limitar el volumen de drenaje contaminado y, con ello, reducir el tamaño de la planta de tratamiento.
- Exclusión de oxígeno: Recubrimiento y sellado de los materiales. Se pueden colocar cubiertas y sellos en la superficie y lados de un embalse de relaves o botaderos, para restringir el acceso de oxígeno y agua y, así, inhibir la generación de ácido. Para limitar la entrada de oxígeno o agua, la cubierta deberá tener muy baja permeabilidad a estos elementos y no tener agujeros o imperfecciones a través de los cuales puedan ingresar.
- Control de pH: Mezcla con materiales alcalinos
- Control de la acción bacteriana: Bactericidas.

### 3.2 TRATAMIENTO DE LAS SOLUCIONES GENERADAS

Si se han aplicado medidas preventivas y aun así se producen Drenajes Ácidos se deben tomar medidas para mitigar. Para eso se han diseñado una serie de métodos que pueden ser:

#### **Métodos Activos:**

El método activo, utiliza reactivos químicos alcalinos, y requiere de la instalación de asistencia mecánica. Al añadir los reactivos alcalinos al agua ácida, ésta se neutraliza (pierde su alta acidez), y se favorece la precipitación de algunos metales tóxicos disueltos en el agua, es decir, estos metales solubles se vuelven sólidos. De esta manera, es más fácil remover los tóxicos del líquido. Dentro de los métodos activos tenemos:

**Neutralización y Sedimentación:** Se utilizan agentes químicos que neutralizan y se sedimentan. Usualmente el reactivo utilizado en el proceso es la cal. Otros reactivos empleados son:

- ✓ Soda cáustica
- ✓ Ceniza de soda
- ✓ Hidrosulfuro de sodio

Los pasos que suceden en el tratamiento se describen a continuación:

1. Se elimina la acidez de la solución mediante neutralización.
2. Se favorece la precipitación de los metales pesados en forma de óxidos, hidróxidos o sulfuros.

3. Otros contaminantes como sólidos suspendidos, arsenato, antimonio se eliminan por formación de un complejo y precipitación.

Los métodos de tratamiento convencionales o activos de aguas ácidas tienen un costo elevado, por lo que no pueden ser mantenidos por un período prolongado una vez finalizada la vida de la mina , teniendo en cuenta que el problema de las aguas ácidas puede perdurar, según las estimaciones de varias decenas de años.

Las principales operaciones unitarias en una planta de tratamiento químico del DAR pueden ser:

- Poza de retención aguas arriba para el DAR
- Preparación de cal (hidratación, mezcla de pulpa)
- Una o dos etapas de neutralización por agitación
- Tercera etapa para la eliminación de otros metales o aniones
- Separación líquido/sólido
- Retención de solución del efluente tratado para muestreo previo a la descarga
- Disposición de residuo

**Métodos pasivos:** Entre los métodos pasivos que más se han utilizado, se destacan los humedales aerobios, los humedales anaerobios o balsas orgánicas, los drenajes anóxicoscalizos (ALD, AnoxicLimestoneDrains), los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems) y las barreras reactivas permeables cuando son aguas subterráneas (PRB, Permeable Reactive Barriers). En la práctica estos métodos se emplean solos o combinados dependiendo del tipo de drenaje ácido y de los requerimientos de tratamiento. En el numeral 4.2 se profundiza sobre el método pasivo en particular.

#### **4. SISTEMA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LOS DRENAJES ÁCIDOS EN EL MUNICIPIO DE CALIFORNIA**

El municipio de California ubicado en el departamento de Santander fue caracterizado durante muchos años por una actividad de pequeña minería, estas labores han dejado socavones con generación de drenaje ácido de mina, se necesita aplicar un tratamiento para mitigar estas soluciones ácidas, con contenidos elevados de sulfatos, presencia de metales pesados y pH por debajo de 5, antes de ser vertidas en corrientes hídricas superficiales. (Fotografía No. 4)

**Fotografía No. 4.** Drenaje ácido generado en la etapa de exploración de un Proyecto Minero, en California Santander.



**Fuente:** Suministrado por Erwin Wolff Carreño

Existen diferentes mecanismos que permiten minimizar este impacto ambiental. En la zona minera de California se han dedicado esfuerzos investigando un tratamiento activo y en algunos casos se está implementando este procedimiento. Considerando la propuesta de utilizar un método pasivo que proporcione la posibilidad de ser aplicado en esta región, se realiza un estudio de especies

vegetales que utilizan la Fitorremediación, proceso en el que se emplean plantas para resolver problemas de contaminación medioambiental con el fin de atacar algunos contaminantes específicos tales como los metales pesados, este método formula un mecanismo más económico y aplicable en la etapa de cierre de las minas después que culmine la explotación minera.

Para el presente estudio se visitaron algunas bocaminas de la región, para obtener un acercamiento sobre la composición de los DAM y el valor de pH. se solicitaron los análisis químicos a las respectivas empresas, estos análisis son preliminares y no se tienen en cuenta aspectos técnicos que se enuncian en el presente documento. A continuación en la tabla No. 2 se presentan los resultados.

**Tabla No. 3** Caracterización de algunos DAM en el municipio de California, Santander

# DE BOCAMINA		METODO	BC O23	BC O18	BC O16	BC 155	BC O26	VALORES DE REFERENCIA (Res 1594/84)
COORDENADAS	NORTE		1.306.427	1.306.448	1.306.427	1.307.275	1.306.432	
	ESTE		1.127.547	1.127.537	1.127.535	1.129.474	1.127.599	
	ALTURA		2358	2358	2356	2540	2381	
II			0037-68	0037-68	0037-68	100-68	0037-68	
CAUDAL	V/seg		0,26	0,22	0,28	1,8	0,29	
ANALISIS QUIMICO	pH	St Mth. 4500 H+B	2,69unid. de pH	3,25unid. de pH	3,44unid. de pH	2,60unid. de pH	3,15unid. de pH	5-9unid. de pH
	TURBIEDAD	St Mth. 2130B	164NTU	5,89NTU	3,76NTU	126NTU	0,23NTU	----
	CADMIO	St Mth. 3500B	0,035 mg/L Cd	<0,01 mg/L Cd	0,057 mg/L Cd	0,066 mg/L Cd	<0,01 mg/L Cd	0,01 mg/L Cd
	COBRE	St Mth. 3500B	11,5 mg/L Cu	0,39 mg/L Cu	5,92 mg/L Cu	14,2 mg/L Cu	7,66 mg/L Cu	1,0 mg/L Cu
	HIERRO	St Mth. 3500B	8,8 mg/L fe	1,91 mg/Lfe	1,11 mg/Lfe	28,1 mg/Lfe	0,7 mg/Lfe	----
	PLOMO	St Mth. 3500B	<0,04 mg/L Pb	<0,04 mg/L Pb	<0,04 mg/L Pb	<0,04 mg/L Pb	<0,04 mg/L Pb	0,05 mg/L Pb
	ZINC	St Mth. 3500B	0,35 mg/L Zn	0,12 mg/L Zn	0,19 mg/L Zn	1,71 mg/L Zn	0,35 mg/L Zn	15 mg/L Zn

**Fuente:** Suministrado por Sociedad Minera Calvista SAS

De los datos presentados en la Tabla No. 2 se observan valores de Cu, Fe y Cd por encima del máximo permisible y son soluciones acidas con valores de pH que se encuentran por debajo de 5.

#### 4.1. SISTEMAS ACTIVOS PARA TRATAMIENTO DE LOS DRENAJES ACIDOS UTILIZADOS EN DISTRITO MINERO DE VETAS Y CALIFORNIA EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER

A continuación se presentan dos casos de tratamientos activos aplicados en la zona minera de Santander para tratar un caudal de solución ácida de bocamina aproximado de 12L/seg en los dos casos.

En la Fotografía No 5 con agitación mecánica, el proceso y control de manejo del DAM se realiza mediante la mezcla de Cal (3.6 lb cada hora) en un tanque de 1000 L, adicionando 300g de sulfato de aluminio para este volumen. Posteriormente se inocula la mezcla a el drenaje acido previamente canalizado en lapsos de 2 minutos, cada 30 minutos. Tiempo controlado por un temporizador.

En este caso en particular se están realizando adecuaciones al sistema

**Fotografía 5.** Tratamiento Activo usando dosificación con temporizador utilizando agitación mecánica.



**Fuente:** PEREZ William; PEÑA Javier. Manejo de Drenajes Ácidos de Mina, (DAM) Monografía, Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga 2009.39 pág.

**Fotografía 6** Sistema conformado por una serie de piscinas intercomunicadas donde se realizan los diferentes procesos de mezcla de los compuestos químicos.



**Fuente:** PEREZ William; PEÑA Javier. Manejo de Drenajes Ácidos de Mina, (DAM) Monografía, Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga 2009.39 pag

En el segundo caso (Fotografía 7) la mezcla se realiza manualmente, se hace una dosificación continua por chorro directo sobre la solución a tratar, se adiciona en el primer tanque un bulto de cal (20kl) en un volumen de 1000 ml, en el segundo tanque un volumen de 1000 ml con 300g de Soda Caustica, esta mezcla se dosifica en un tiempo aproximado de cuatro horas a la solución, operación continua, posteriormente se realiza sedimentación en los tanques. (Fotografía 8) Con este método no se asegura un contacto inmediato entre la mezcla y todo el cuerpo de solución a tratar. (Fotografía 8).

**Fotografía No. 7** Dosificación de reactivos químicos

**DOSIFICADOR de Soda Caustica**

**Agitación y dosificación manual**

**DOSIFICADOR (CaCO<sub>3</sub>)**

**Fuente:** Suministrado por Jazmín Jiménez

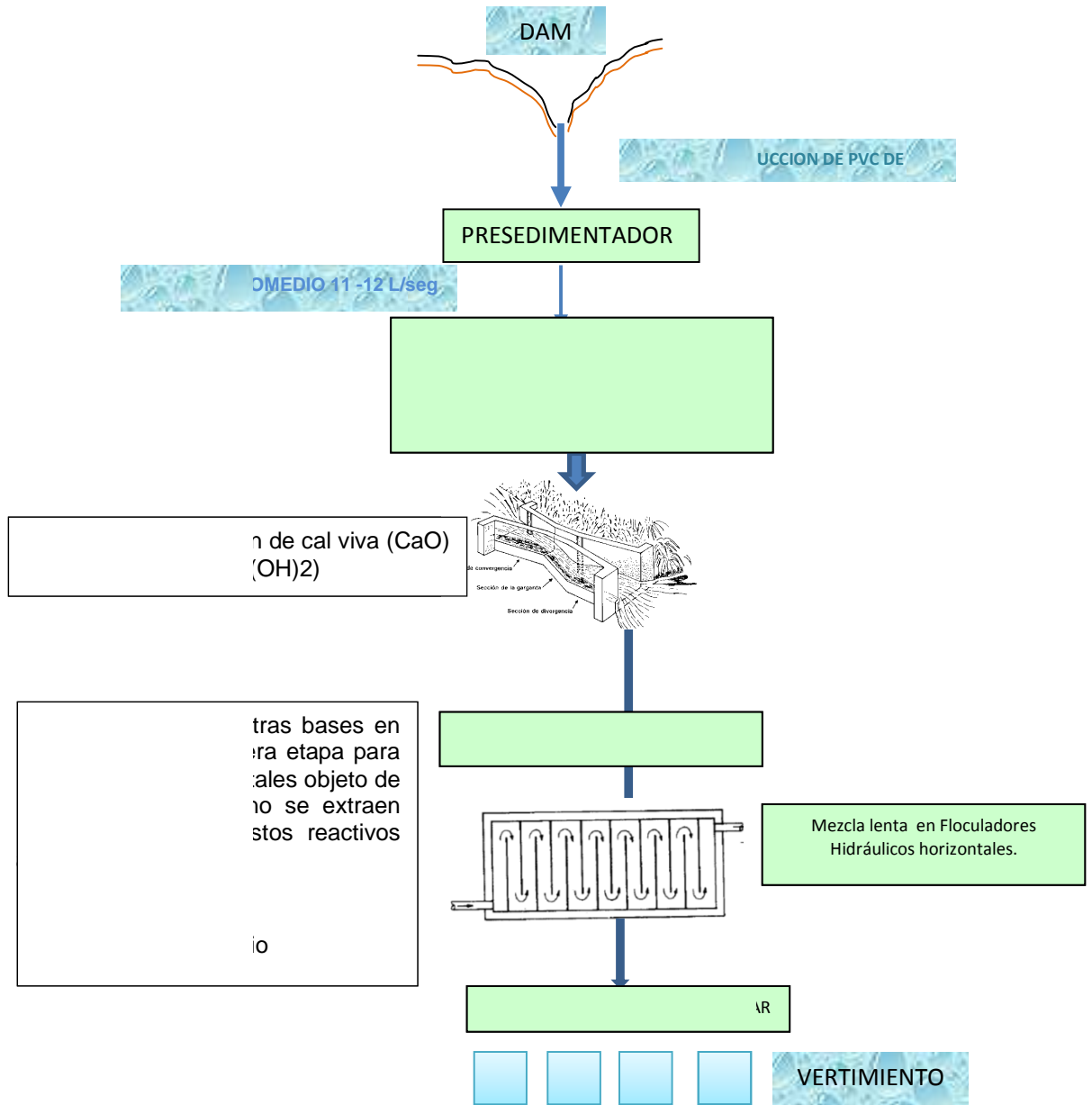
**Fotografía No. 8** Sedimentación



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Jiménez

Para realizar un aporte de mejoramiento al sistema activo que actualmente se está implementando en la zona, se presenta el siguiente esquema de tratamiento.

**Figura No. 1** Planta De Tratamiento De Soluciones Acidas De Bocaminas



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Jiménez

Teniendo en cuenta que en la zona se están uniendo las soluciones acidas de bocaminas, con los lodos provenientes de la perforación diamantina, surge la necesidad de que sea efectiva la etapa de coagulación, esto solo se logra mediante una mezcla rápida entre el coagulante utilizado y todo el volumen de solución. Para hacer que el coagulante se difunda lo más rápida y uniformemente posible, se debe garantizar que se genere una gran turbulencia, para esto se propone utilizar un Retro mezclador Hidráulico, aprovechando la gran turbulencia generada por la canaleta Parshal, adicionalmente proporciona menores costos, eliminando el uso de electricidad en una agitación mecánica.

Como aglomerante se está utilizando en este momento el Sulfato de Aluminio sólido. Para la coagulación el tiempo de mezcla debe ser menor a un segundo y el gradiente de velocidad muy alto entre  $1000 - 2000 \text{ seg}^{-1}$ . Es muy importante resaltar que la cantidad de Sulfato de Aluminio debe ser la cantidad exacta que corresponde a la DOSIS IDEAL, punto de inflexión de la curva TURBIDEZ vs DOSIS obtenida en el ensayo llamado PRUEBA DE JARRAS (Fotografía 9).

**Fotografía 9** Turbulencia generada por un Retro mezclador Hidráulico.



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Jiménez

## FLOCULACION

En esta etapa se necesitan conseguir FLOC de excelente calidad, pesados, que precipiten fácilmente, el tiempo de mezcla debe ser de 15-30 min y el gradiente de Velocidad bajo entre  $70-200 \text{ seg}^{-1}$ , para realizar esta mezcla lenta se propone utilizar floculadores que manejan la hidráulica y pueden fabricarse a partir de los tanques que actualmente se están utilizando, realizando modificaciones que optimizan el proceso. (Fotografía 10)

**Fotografía 10** Floculadores Hidráulicos Horizontales.



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Jiménez

## SEDIMENTACION

Se realiza mediante Sedimentación acelerada, básicamente es una estructura en concreto con láminas inclinadas de asbesto cemento lo cual genera la multiplicación de la sedimentación de las partículas. Básicamente se pueden adecuar los últimos 4 tanques con la estructura para conseguir el flujo laminar.

**Fotografía No. 11** Sistema de Sedimentación tipo laminar



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Jiménez

#### **4.2 SISTEMAS PASIVOS PARA TRATAMIENTO DE LOS DRENAJES ACIDOS. FITOREMEDIACION.**

Los métodos de tratamiento pasivo se basan en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales (wetlands), en donde se modifican favorablemente ciertas características de las aguas contaminadas, consiguiendo la eliminación de metales y la neutralización del pH. Entre los métodos pasivos que más se han utilizado destacan los humedales aerobios, los humedales anaerobios o balsas orgánicas, los drenajes anóxicos calizos (ALD, Anoxic Limestone Drains), los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems) y las barreras reactivas permeables cuando son aguas subterráneas (PRB, Permeable Reactive Barriers). En la práctica estos métodos se emplean solos o combinados, dependiendo del tipo de drenaje ácido y de los requerimientos de tratamiento.

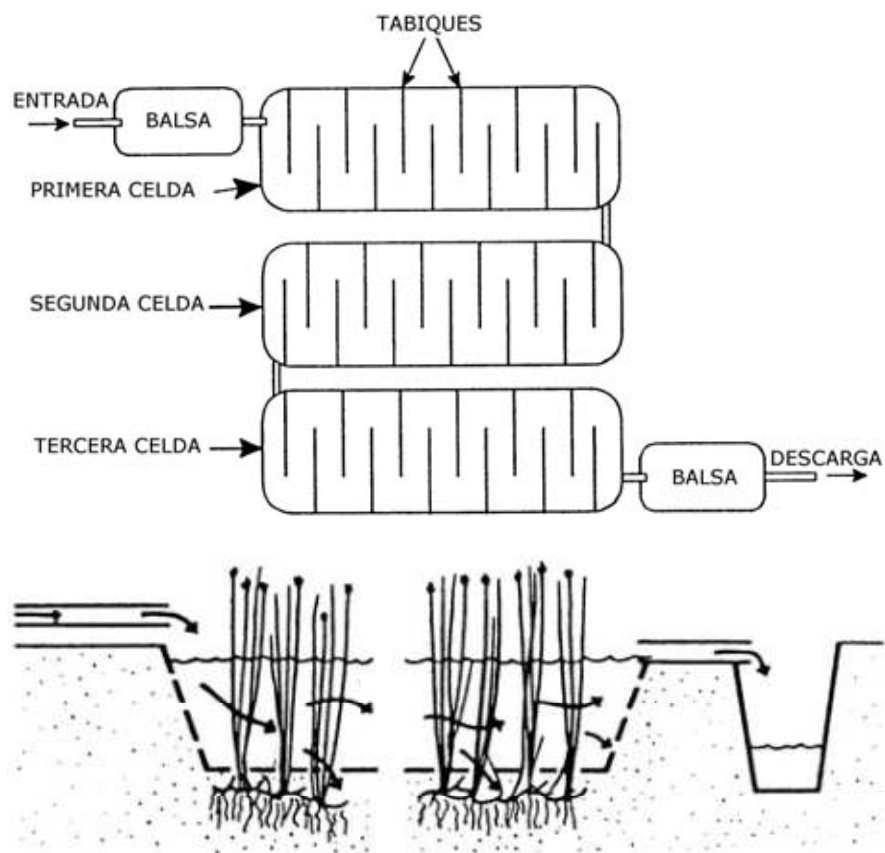
La reducción directa del sulfato a sulfuro de hidrógeno es producida por bacterias especializadas, estrictamente anaeróbicas, específicamente por dos géneros de bacteria anaeróbica: *Desulfovibrio* (cinco especies) y *Desulfotomaculum* (tres especies). Estas bacterias son organismos heterotróficos y tienen un metabolismo respiratorio en el que los sulfatos, sulfitos y otros componentes reducibles de azufre sirven como aceptores finales de electrones, con la consiguiente producción de sulfuro de hidrógeno. Los substratos orgánicos de estas bacterias generalmente son ácidos de cadena corta, tales como el ácido láctico y el pirúvico. En la naturaleza, estos substratos se obtienen a través de actividades de fermentación de las bacterias anaeróbicas sobre substratos orgánicos más complejos (tales como la putrefacción de vegetación en tierras húmedas).

La actividad de estas bacterias reductoras de sulfatos es importante no sólo debido a la producción de sulfuro de hidrógeno, sino también debido a la subsecuente interacción y precipitación de los metales y al aumento de alcalinidad. El sulfuro de hidrógeno reacciona fácilmente, por ejemplo, con cobre solubilizado a valores bajos de pH, para formar el mineral sulfuroso insoluble. De manera similar, la precipitación del zinc es posible siempre que existan condiciones adecuadas.

En los humedales aerobios artificiales se pretende reproducir los fenómenos y procesos de los humedales naturales (pantanos, marismas, turberas, etc.), creando un ambiente propicio para el desarrollo de ciertas plantas (*Tipha*, *Equisetum*, carrizo, juncos, etc.), comunidades de organismos (algas, protozoos y bacterias) y musgos (*Sphagnum*), los cuales participan en la depuración del agua. Estos humedales ocupan una gran superficie y tienen una somera lámina de agua que inunda el substrato sobre el que se desarrolla la vegetación. El lento fluir del agua en el humedal permite alcanzar el tiempo de retención necesario para que tengan lugar los lentos procesos depuradores del agua.

Un sistema aerobio suele consistir en una o varias celdas conectadas por las que circula el agua lentamente por gravedad, estableciéndose un flujo horizontal superficial (Fig. 2). Para favorecer la oxigenación del agua y mejorar la eficiencia en el tratamiento se diseñan sistemas que incluyan cascadas, lechos serpenteantes y balsas de grandes superficies con poca profundidad.

**Figura No. 2** Disposición de las celdas en un Humedal aerobio y circulación del agua.



**Fuente:** Tomado de Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina y perspectivas de futuro. E.Lopez Pamo, O.Advuvire y D. baretino. Boletín Geológico y Minero, 113 (1): 3-21 ISSN: 0366-0176

Para proponer un sistema pasivo para el tratamiento de las soluciones ácidas en California, se tienen en cuenta varios aspectos, el primero de estos es determinar una especie, que tenga características de fitoremediación y se adapte a las condiciones climatológicas de la zona.

En la zona de California, realizando una observación de campo se tiene en cuenta el crecimiento natural de la especie *Lemna* actuando como un fango de biorremediación a la salida de la bocamina, la caracterización química se presenta en el Anexo No. 1. Este fenómeno permite plantear esta opción como alternativa en el tratamiento de las soluciones acidas de bocaminas. Fotografía 12.

**Fotografía 12** *Lemna minor* extendida al frente de la bocamina



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Rocío Jiménez Jaimes

#### **4.2.1. Lemna Minor**

La *Lemna minor* es una planta angiosperma (plantas con flores), monocotiledónea, perteneciente a la familia *Lemnaceae*. Su cuerpo vegetativo corresponde a una

forma *taloide*, es decir, en la que no se diferencian el tallo y las hojas. Consiste en una estructura plana y verde y una sola raíz delgada de color blanco.

Su tamaño es muy reducido, alcanzando de 2 a 4 mm de longitud y 2 mm de ancho. La lenteja de agua es una planta monoica, con flores unisexuales. Las flores masculinas están constituidas por un solo estambre y las flores femeninas consisten en un pistilo formado por un solo carpelo.

El periantio está ausente. Las flores nacen de una hendidura ubicada en el borde de la hoja, dentro de una bráctea denominada espata, muy común en las especies del orden arales. El fruto contiene de 1 a 4 semillas<sup>10</sup>.

La forma más común de reproducción es la asexual por gemación. En los bordes basales se desarrolla una yema pequeña que origina una planta nueva que se separa de la planta progenitora<sup>11</sup>. Sin embargo, es común encontrar las plantas agregadas formando grupos de 2 a 4 individuos.

La planta puede desarrollarse en un rango amplio de temperaturas, que varía entre 5° y 30°C, con un crecimiento óptimo entre los 15° y 18°C. El rango de temperatura de California está entre 12 y 18°C significa que se adapta a las condiciones climáticas de Texas y California. Se adapta bien a cualquier condición de iluminación. Crece rápidamente en partes calmadas y ricas en nutrientes, con altos niveles de nitrógeno y fosfatos. Con frecuencia el hierro es un elemento limitante para su adecuado desarrollo. Pueden además tolerar un rango de pH amplio, siendo el óptimo entre 4,5 y 7,5<sup>12</sup>

---

<sup>10</sup> Armstrong 2003, Instituto Gallach, 1984

<sup>11</sup> Op,cit

<sup>12</sup> Rook 2002

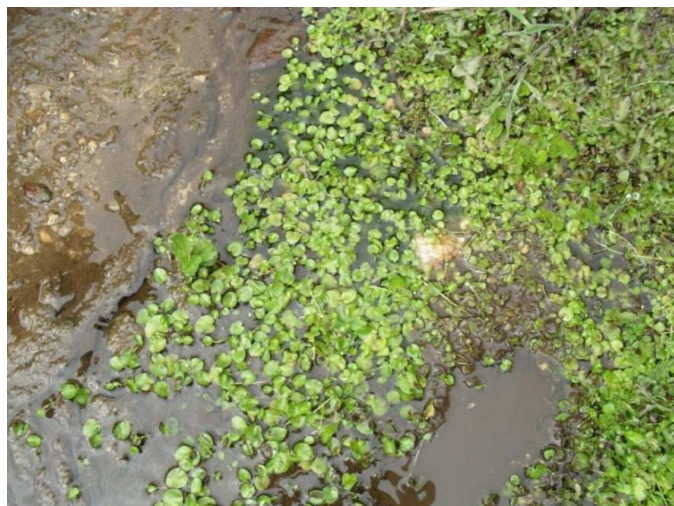
Al ser el hierro un elemento limitante en el desarrollo de la Lemna se propone en el diseño del sistema una celda anterior para retirar el hierro y colocar la lemna en el sistema de tratamiento para retirar principalmente Cu y otros metales pesados presentes en la solución acida.

**Fotografía 13** Lemna Minor. Enciclopedia Google



**Fuente:** Internet Wikipedia

**Fotografía 14** Lemna Minor. California, Santander



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Rocío Jiménez

Sí las plantas acuáticas se manejan bajo las condiciones de pH, temperatura mencionadas anteriormente, su poder de proliferación, capacidad de absorción de nutrientes y bioacumulación de contaminantes del agua las convierten en una herramienta útil en el tratamiento de aguas residuales<sup>13</sup> investigó el potencial de la lenteja de agua para acumular cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y selenio. Los resultados demostraron que, en condiciones experimentales de laboratorio, la planta resultó ser un buen acumulador de Cd, Se y Cu, un acumulador moderado de Cr y pobre acumulador de Ni y Pb. Las concentraciones más altas de cada elemento acumulada en los tejidos de la lenteja de agua fueron de 13,3 g Cd / kg, 4,27 g Se / kg, 3,36 g, Cu / kg, 2,87 g Cr / kg, 1,79 g Ni / kg y 0,63 g Pb / kg. Se concluye en el estudio que la lenteja de agua tiene un buen potencial para la remoción de cadmio, selenio y cobre de aguas residuales contaminadas con estos elementos, ya que puede acumular concentraciones altas de ellos. Su rápido crecimiento la hace una planta apropiada para actividades de fitorremediación.

Finalmente, de acuerdo a lo expuesto en el párrafo anterior sobre la buena capacidad de la lemna para acumular concentraciones de Cu y otros metales, se presenta como opción para ser utilizada en el tratamiento de las soluciones ácidas en Vetas y California.

#### **4.3 FACTORES QUE SE DEBEN TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO DEL TRATAMIENTO:**

1. Caracterización del residuo a tratar y de la zona de actuación
2. Selección del tiempo de retención de la solución en el sistema
3. Definición de la secuencia de tratamiento y selección de los sistemas
4. Dimensionamiento
5. Seguimiento y Control
6. Planteamiento y planificación

---

<sup>13</sup> Zayed 1998

7. Riesgo de inundación
8. El Clima
9. Factores hidrológicos
10. Diseño del sistema pasivo construido
11. Evaluación y selección del lugar de ubicación
12. Topografía
13. Permeabilidad del Terreno

#### **4.4. ETAPAS DEL PROCESO PROPUESTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS DE MINAS**

Antes de proponer un diseño, el primer factor a tratar es la caracterización físico química del agua de la mina.

##### **PRIMERA ETAPA - PRESEDIMENTACIÓN**

Se realiza una presedimentación, con este sistema se elimina una parte de las partículas sólidas y la turbidez, en los tanques de quietamiento. Se efectúa un almacenamiento de la solución para realizar un control en el caudal de entrada de acuerdo al diseño de la planta de tratamiento.

El sistema de tratamiento pasivo tiene en cuenta dos propuestas: En la primera, colocar un tanque de flujo ascendente con lecho usando lutita calcárea para tratar las soluciones acidas, aplicado a caudales bajos provenientes de las bocaminas de las antiguas labores mineras y la segunda propuesta tiene en cuenta la aplicación de una cascada de aireación como opción, cuando el drenaje proviene de los desmontes o relevés en la etapa de cierre de las minas, este material es un mineral con contenidos de cianuro, el cual debe ser evacuado, gracias a los resaltes que generan la aireación de la solución.

A continuación se presentan las dos opciones, propuestas aplicadas según sea el caso que corresponda:

**SEGUNDA ETAPA – TANQUE DE FLUJO ASCENDENTE CON LECHO DE LUTITA CALCÁREA. (DRENAJES DE MINA PROVENIENTE DE BOCAMINAS DE ANTIGUAS LABORES MINERAS). Figura No. 4**

Se propone el uso de la lutita<sup>14</sup> calcárea, es una mezcla de minerales, entre los que se encuentran la calcita, el cuarzo, la moscovita, la albita y la montmorillonita. En esta roca, la calcita es el agente que combate la acidez del drenaje, mientras que los otros minerales permiten al hierro y otros contaminantes, como el arsénico, precipitarse o convertirse en sólidos fáciles de remover.<sup>[7]</sup> El flujo ascendente garantiza un mayor contacto de la solución con el lecho.

**SEGUNDA ETAPA –CASCADA DE AIREACIÓN (DRENAJES ACIDOS PROVENIENTE DE LOS RELAVES O DESMONTES CON CONTENIDOS DE CIANURO EN LA ETAPA DE CIERRE DE LAS MINAS). Figura No. 5**

Se propone como pretratamiento teniendo en cuenta la pendiente del terreno en California se puede determinar un diseño con cascadas con una longitud total de 30 metros (el mínimo disponible para maximizar el tiempo de contacto del agua con los gases atmosféricos, según estudios anteriores con un buen diseño se puede disolver al menos 50 mg/l de  $Fe^{+2}$  para lo cual es importante que el ancho

---

<sup>14</sup> La lutita calcárea es una mezcla de minerales, entre los que se encuentran la calcita, el cuarzo, la moscovita, la albita y la montmorillonita. En esta roca, la calcita es el agente que combate la acidez del drenaje, mientras que los otros minerales permiten al hierro y otros contaminantes, como el arsénico, precipitarse o convertirse en sólidos fáciles de remover.

del escalón sea de 2 cm por cada l/s a tratar. La caída entre pasos debe ser de varios centímetros

**Fotografía No. 15** Cascada de aireación propuesta



**Fuente:** Tratamiento de aguas ácidas. Universidad mayor de San Andrés. Química Industrial. La paz Bolivia.

### **TERCERA ETAPA –SEDIMENTADOR**

Antes de pasar la solución a la siguiente etapa se entrega a un tanque sedimentador, para recoger los precipitados de hierro formados en la etapa de aireación en la literatura proponen una celda de  $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ . Se debe tener en cuenta que las dimensiones que se presentan dependen de un diseño implementado para un caso en particular, en este documento se propone, un sistema para el tratamiento únicamente, no se pretende realizar el diseño, el cual depende de parámetros tales como: caudal, pendiente de la zona, área entre otros.

## **CUARTA ETAPA – FITOREMEDIACIÓN**

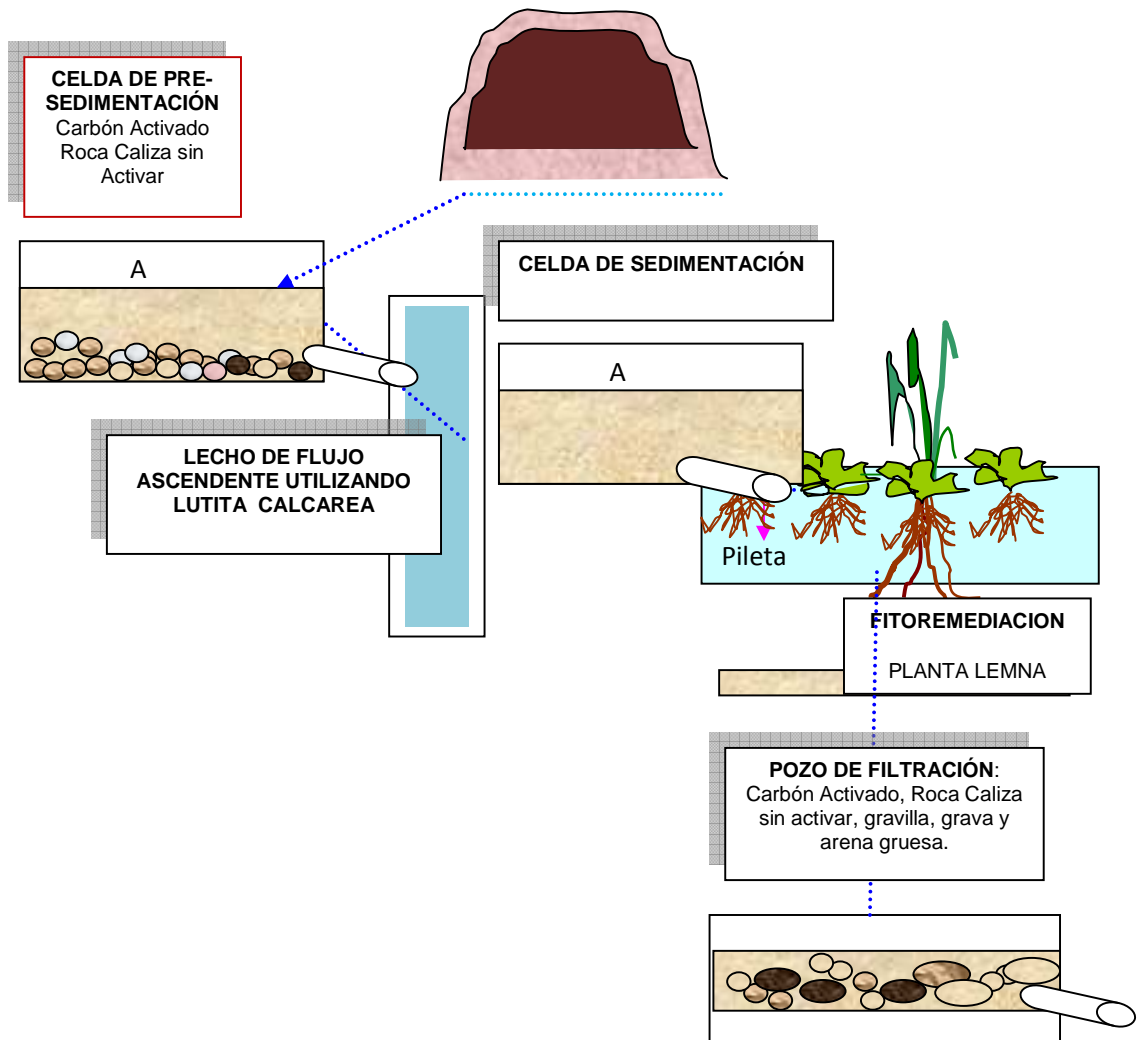
Desde la anterior balsa de almacenamiento la solución penetra mediante una tubería perforada en el interior del humedal construido, es un depósito de 4m de ancho por 12 de largo, con paredes de 45° de inclinación ambas celdas tienen su base con suelo autóctono y una fracción de grava silíceo, el conjunto presenta una porosidad de 33% y un espesor de 50 cm el sustrato es de cualquier material, adecuado para el crecimiento de las plantas, un tubo subterráneo de 15 m conduce la solución hasta esta, la salida es por rebose, quedando en operación con un efluente de 10 a 15 cm, la solución debe circular a baja velocidad, se pueden colocar diversos tipos de juncos junto a la lemnaminor,

En esta etapa se retira el Cu presente en la solución quedando atrapado principalmente en la raíz y en el rizoma. La absorción de metales en los tejidos de las plantas es muy notable, siendo capaces de acumular varias veces su concentración inicial, siendo retenidos los metales principalmente en su parte radicular, en el caso del mercurio el metal se concentra preferentemente en la flor

## **QUINTA ETAPA – FILTRACION**

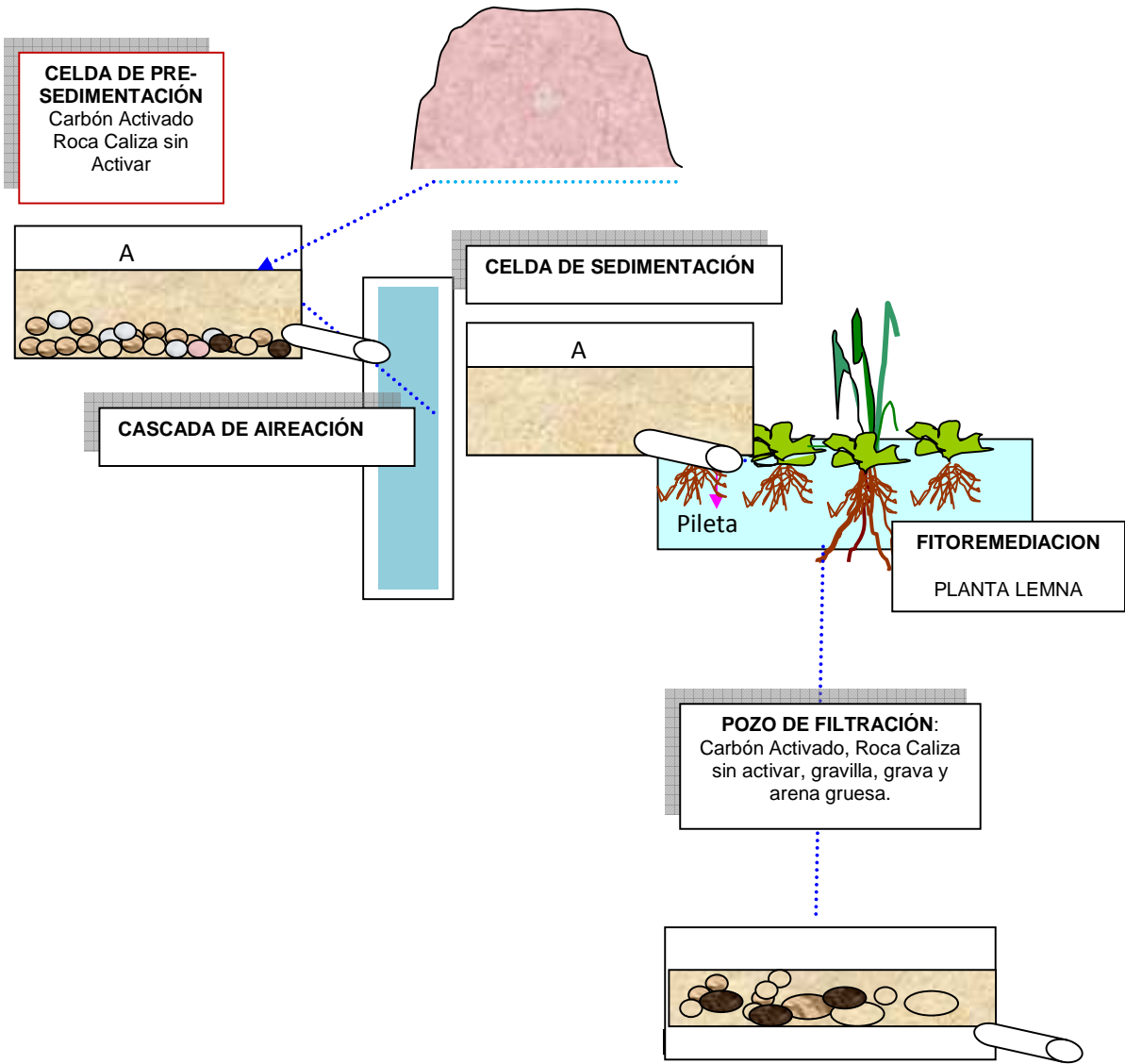
Se eliminan las partículas que no alcanzaron a separarse. Consiste en permear por gravedad el agua a través de un lecho filtrante compuesto de arena sílica-cuarzosa, grava sílica y roca caliza sin activar, reteniéndose los sólidos que por su baja densidad o su geometría irregular no fueron separados del agua clarificada, obteniéndose valores de turbidez menores a la salida de esta etapa.

**Figura No. 3** PLANTA PILOTO PROPUESTA PARA TRATAR LAS SOLUCIONES ACIDAS PROVENIENTES DE LAS BOCAMINAS



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Rocío Jiménez Jaimes

**Figura No. 4** PLANTA PILOTO PROPUESTA PARA TRATAR LAS SOLUCIONES ACIDAS PROVENIENTES DE DESMONTES O RELAVERAS



**Fuente:** Suministrado por Jazmín Rocío Jiménez Jaimes

## 5. RECOMENDACIONES

- En el Distrito minero auroargentífero de Vetas-California existen varias bocaminas generando drenajes, cada una en particular debe ser analizada por separado, para plantear una solución que incluya dentro de la evaluación el tratamiento a aplicar y de qué forma se realiza la canalización del drenaje.
- Uno de los factores que contribuyen a alcanzar el éxito de cualquier sistema de tratamiento consiste en, identificar, recolectar y controlar el flujo de toda agua contaminada. El diseño del sistema para recolectar toda la filtración y el drenaje, debe minimizar el volumen destinado al proceso de tratamiento. Ello significa que toda corriente "limpia" será separada de la contaminada, y no incluida en el flujo que va a la planta de tratamiento.
- Los principales factores químicos que limitan la utilidad de la roca caliza es la presencia de hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), aluminio (Al) y oxígeno disuelto (DO). Cuando las aguas ácidas que contienen  $\text{Fe}^{3+}$  entran en contacto con caliza, se forman partículas de hidróxidos sin que sea necesario el oxígeno. El hidróxido férrico puede recubrir la caliza, limitando su futura disolución por esta razón se recomienda en la propuesta la utilización de lutita calcárea.
- La planta lemna se recomienda porque se encuentra creciendo en las afueras de una bocamina, lo que indica que soporta el clima de esta región. Pero se debe tener especial cuidado para que no llegue a lagos donde se pueda proliferar y causar un daño al crecer sin control. Por eso la planta de tratamiento en lo posible debe hacerse a una buena distancia del río (más de 30 metros) efectuando un control al respecto.

## 6. CONCLUSIONES

- La principal ventaja de los métodos pasivos para tratar los drenajes ácidos es el bajo costo de construcción y mantenimiento, así como su simplicidad de operación, teniendo en cuenta que una vez se genera el drenaje ácido este permanece en el tiempo.
- Desde la etapa exploratoria debe iniciarse el estudio sobre el potencial de composición de un drenaje ácido de acuerdo al resultado de la exploración se determina cuales minerales se pueden encontrar en el Drenaje Ácido, sin necesidad de realizar un barrido de todos los elementos.
- En relación a la planificación del cierre de las minas los objetivos para lograr un adecuado tratamiento de las aguas ácidas se basa principalmente en realizar un buen análisis sobre potencial de Drenaje Ácido
- La canaleta Parshal proporciona el medio de turbulencia ideal para generar una mezcla inmediata entre el coagulante y la solución a tratar, mejorando la eficiencia del tratamiento de los Drenajes Ácidos actualmente aplicados en el Distrito Minero Auroargentífero Vetas-California.
- El sistema propuesto utilizando una cascada de aireación de la solución, es aplicable cuando se tratan drenajes ácidos que han sido lixiviados de desmontes mineros contaminados con cianuro, porque al pasar la solución por los resaltes se provoca una dispersión del ácido cianhídrico.
- De acuerdo al nuevo panorama nacional sobre la posibilidad de que Colombia se convierta en un país minero, es importante dedicar esfuerzos a la investigación para profundizar en el tratamiento de drenajes ácidos utilizando métodos pasivos. Porque el drenaje ácido se puede generar en todas las etapas de desarrollo de un Proyecto Minero.

## BIBLIOGRAFIA

CARRASCO CRUZ Estanislao, 2006, Mitigación de drenaje ácido en minas subterráneas aplicando fangos artificiales. Caso: Mina Orcopampa. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 9, N° 17, 69-74 (2006) UNMSM ISSN: 1561-0888 (impreso) / 1628-8097 (electrónico)

LOPEZ; Pamo, E. Aduvire O y Baretino D, 2002, Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: Estado actual y perspectivas de futuro. Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, Madrid. RTSI de Minas Universidad Politécnica de Madrid. Ríos Rosas. Madrid.

PERU MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS. Normas Técnicas para diseño ambiental.(Guías).fuente:DGAAM.<http://www.minem.gob.pe/publicacion.php?idSector=4&idPublicacion=50>

PEREZ William; PEÑA Javier. Manejo de Drenajes Ácidos de Mina, (DAM) Monografía, Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga 2009.39 pag

PTACEK,C, Transport of metals from mine tailings impoundments an release to surface waters, department of Earth Sciences, University of Waterloo, Ontario, Canadá. Ver también la pag. web Del department of mining and Northern Development memorial university, new Foundland, <<http://www.mun.ca/geog/research/mining.php>

SACHER William, El modelo Minero canadiense: Saqueo e impunidad institucionalizados. The Canadian mineable patter: Institutionalized plundering and impunity,pag.50-58.

YOUNGER paul L (1997) Correccion de aguas ácidas de mina aplicación de métodos activos y pasivos en Europa, Professor of Hidrogeochemical Engineering, School of Civil Engineering, and Geosciences, Devonshire Building, University of Newcastle upon Tine, UK:

## ANEXOS

### Anexo No. 1 RESULTADO DE LA SOLUCIÓN DONDE SE ENCONTRO LA PLANTA LEMNA PROPUESTA PARA REALIZAR LA FITOREMEDIACION EN EL SISTEMA PASIVO

#### REPORTE DE RESULTADOS

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 24 de Febrero de 2011	No. 011269
Solicitante: <b>SOCIEDAD MINERA CALVISTA SAS</b>	Tipo de muestra: Agua
Dirección: Finca el Pórtico Vereda Centro California Santander	Identificación: <b>Muestra Fitoremediación</b>
Teléfono: 3102063250	Descripción: Muestra de Agua
Lugar de muestreo: <b>CALIFORNIA</b>	Responsable de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de muestreo: 27 de Enero de 2011 3:00 p.m.	Procedimiento de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de recepción: 28 de Enero de 2011	Tamaño de la muestra: 300 mL
Fecha de análisis: 28 de Enero - 22 de Febrero de 2011	Envase o empaque: Plástico
Análisis solicitado: Físicoquímico	Lote: //
Condiciones de la muestra: //	

#### ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADOS	VALORES DE REFERENCIA (Res. 1594/84)
pH	St Mth. 4500 H <sup>+</sup> B	<b>7,75 unid. de pH</b>	5,0-9,0
CONDUCTIVIDAD	St. Mth. 2510 B	<b>100 µs/cm</b>	—
OXÍGENO DISUELTO	St. Mth.4500 O C	<b>6,72 mg O<sub>2</sub>/L</b>	6.0 - 6.5
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	St. Mth. 2540 D	<b>230 mg/L</b>	—
COBRE	St Mth. 3500 Cu B	<b>&lt; 0,02 mg Cu/L</b>	1,0
HIERRO	St Mth. 3500 Fe B	<b>8,7 mg Fe/L</b>	—
PLOMO	St Mth. 3500 Pb B	<b>&lt; 0,04 mg Pb/L</b>	0,05
ZINC	St Mth. 3500 Zn B	<b>0,15 mg Zn/L</b>	15
MERCURIO	Perkin Elmer 309-A4	<b>&lt; 0,4 µg Hg/L</b>	2

OBSERVACIONES: //

St Mth: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. AWWA, WEF, APHA 21th.

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

**MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA**  
DIRECTOR TÉCNICO  
QUÍMICO PQ 1426

Código: R - 051	Versión: 0.1	Fecha: 22/05/09	Página: 1 de 1
-----------------	--------------	-----------------	----------------

**Anexo No. 2 RESULTADO DE ANÁLISIS QUIMICO DE LAS SOLUCIONES DE LAS AGUAS ACIDAS DE BOCAMINAS**

**REPORTE DE RESULTADOS**

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 14 de Enero de 2011	<b>No. 010482</b>
Solicitante: <b>SOCIEDAD MINERA CALVISTA SAS</b>	Tipo de muestra: Agua
Dirección: //	Identificación: <b>BC018 LICENCIA 100-68</b>
Teléfono: //	Descripción: Residual Industrial
Lugar de muestreo: <b>CALIFORNIA</b>	Responsable de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de muestreo: 8 de Enero de 2011 10:20 a.m.	Procedimiento de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de recepción: 7 de Enero de 2011	Tamaño de la muestra: 500 mL
Fecha de análisis: 7 - 13 de Enero de 2011	Envase o empaque: Plástico
Análisis solicitado: Fisisoquímico	Lote: //
Condiciones de la muestra: //	

**ANÁLISIS FISISOQUÍMICO**

ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADOS	VALORES DE REFERENCIA (Res. 1594/84)
pH	St Mth. 4500 H <sup>+</sup> B	3,25 unid. de pH	5,0-9,0
TURBIEDAD	St Mth. 2130 B	5,89 NTU	---
CADMIO	St Mth. 3500 Cd B	< 0,01 mg/L Cd	0,01
COBRE	St Mth. 3500 Cu B	0,39 mg/L Cu	1,0
HIERRO	St Mth. 3500 Fe B	1,91 mg/L Fe	---
PLOMO	St Mth. 3500 Pb B	< 0,04 mg/L Pb	0,05
ZINC	St Mth. 3500 Zn B	0,12 mg/L Zn	15,0

**OBSERVACIONES: //**

St Mth: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. AWWA, WEF, APHA 21th.

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

**MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA**  
DIRECTOR TÉCNICO  
QUÍMICO PQ 1426

Código:	R - 051	Versión:	0.1	Fecha:	22/05/09	Página:	1 de 1
---------	---------	----------	-----	--------	----------	---------	--------

## REPORTE DE RESULTADOS

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 14 de Enero de 2011	No. 010487
Solicitante: <b>SOCIEDAD MINERA CALVISTA SAS</b>	Tipo de muestra: Agua
Dirección: //	Identificación: <b>BC 16 LICENCIA 100-68</b>
Teléfono: //	Descripción: Residual Industrial
Lugar de muestreo: <b>CALIFORNIA</b>	Responsable de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de muestreo: 6 de Enero de 2011 9:30 a.m.	Procedimiento de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de recepción: 7 de Enero de 2011	Tamaño de la muestra: 500 mL
Fecha de análisis: 7 - 13 de Enero de 2011	Envase o empaque: Plástico
Análisis solicitado: Físicoquímico	Lote: //
Condiciones de la muestra: //	

### ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADOS	VALORES DE REFERENCIA (Res. 1594/84)
pH	St Mth. 4500 H* B	3,44 unid. de pH	5,0-9,0
TURBIEDAD	St Mth. 2130 B	3,76 NTU	---
CADMIO	St Mth. 3500 Cd B	0,057 mg/L Cd	0,01
COBRE	St Mth. 3500 Cu B	5,92 mg/L Cu	1,0
HIERRO	St Mth. 3500 Fe B	1,11 mg/L Fe	---
PLOMO	St Mth. 3500 Pb B	< 0,04 mg/L Pb	0,05
ZINC	St Mth. 3500 Zn B	0,19 mg/L Zn	15,0

**OBSERVACIONES: //**

St Mth: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. AWWA, WEF, APHA 21th.

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

**MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA**  
DIRECTOR TÉCNICO  
QUÍMICO PQ 1426

Código:	R - 051	Versión:	0.1	Fecha:	22/05/09	Página:	1 de 1
---------	---------	----------	-----	--------	----------	---------	--------

## REPORTE DE RESULTADOS

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 14 de Enero de 2011	No. 010485
Solicitante: <b>SOCIEDAD MINERA CALVISTA SAS</b>	Tipo de muestra: Agua
Dirección: //	Identificación: BC 136 LICENCIA 14031
Teléfono: //	Descripción: Residual Industrial
Lugar de muestreo: CALIFORNIA	Responsable de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de muestreo: 6 de Enero de 2011 1:22 p.m.	Procedimiento de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de recepción: 7 de Enero de 2011	Tamaño de la muestra: 500 mL
Fecha de análisis: 7 - 13 de Enero de 2011	Envase o empaque: Plástico
Análisis solicitado: Físicoquímico	Lote: //
Condiciones de la muestra: //	

### ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADOS	VALORES DE REFERENCIA (Res. 1594/84)
pH	St Mth. 4500 H <sup>+</sup> B	6,44 unid. de pH	5,0-9,0
TURBIEDAD	St Mth. 2130 B	33,0 NTU	---
CADMIO	St Mth. 3500 Cd B	0,039 mg/L Cd	0,01
COBRE	St Mth. 3500 Cu B	0,31 mg/L Cu	1,0
HIERRO	St Mth. 3500 Fe B	0,17 mg/L Fe	---
PLOMO	St Mth. 3500 Pb B	< 0,04 mg/L Pb	0,05
ZINC	St Mth. 3500 Zn B	0,45 mg/L Zn	15,0

**OBSERVACIONES: //**

St Mth: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. AWWA, WEF, APHA 21th.

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

**MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA**  
DIRECTOR TÉCNICO  
QUÍMICO PQ 1426

Código:	R - 051	Versión:	0.1	Fecha:	22/05/09	Página:	1 de 1
---------	---------	----------	-----	--------	----------	---------	--------

## REPORTE DE RESULTADOS

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 17 de Enero de 2011	<b>No. 010510</b>
Solicitante: <b>SOCIEDAD MINERA CALVISTA SAS</b>	Tipo de muestra: Agua
Dirección: //	Identificación: <b>BC 015 LICENCIA 100-68</b>
Teléfono: //	Descripción: Residual Industrial
Lugar de muestreo: <b>CALIFORNIA</b>	Responsable de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de muestreo: 09 de Enero de 2011 11:25 a.m.	Procedimiento de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de recepción: 11 de Enero de 2011	Tamaño de la muestra: 500 mL
Fecha de análisis: 11 - 15 de Enero de 2011	Envase o empaque: Plástico
Análisis solicitado: Físicoquímico	Lote: //
Condiciones de la muestra: //	

### ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADOS	VALORES DE REFERENCIA (Res. 1594/84)
pH	St Mth. 4500 H <sup>+</sup> B	<b>4,10</b> unid. de pH	5,0-9,0
TURBIEDAD	St Mth. 2130 B	<b>0,22</b> NTU	---
CADMIO	St Mth. 3500 Cd B	<b>0,016</b> mg/L Cd	0,01
COBRE	St Mth. 3500 Cu B	<b>1,20</b> mg/L Cu	1,0
HIERRO	St Mth. 3500 Fe B	<0,10 mg/L Fe	---
PLOMO	St Mth. 3500 Pb B	< 0,04 mg/L Pb	0,05
ZINC	St Mth. 3500 Zn B	<b>0,31</b> mg/L Zn	15,0

**N.D:** No Detectable

**OBSERVACIONES:** //

St Mth: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. AWWA, WEF, APHA 21th.

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

**MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA**  
DIRECTOR TÉCNICO  
QUÍMICO PQ 1426

Código:	R - 051	Versión:	0.1	Fecha:	22/05/09	Página:	1 de 1
---------	---------	----------	-----	--------	----------	---------	--------

## REPORTE DE RESULTADOS

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 14 de Enero de 2011	No. 010484
Solicitante: <b>SOCIEDAD MINERA CALVISTA SAS</b>	Tipo de muestra: Agua
Dirección: //	Identificación: BC 155 LICENCIA 14031
Teléfono: //	Descripción: Residual Industrial
Lugar de muestreo: CALIFORNIA	Responsable de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de muestreo: 6 de Enero de 2011 1:07 p.m.	Procedimiento de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de recepción: 7 de Enero de 2011	Tamaño de la muestra: 500 mL
Fecha de análisis: 7 - 13 de Enero de 2011	Envase o empaque: Plástico
Análisis solicitado: Físicoquímico	Lote: //
Condiciones de la muestra: //	

### ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADOS	VALORES DE REFERENCIA (Res. 1594/84)
pH	St Mth. 4500 H <sup>+</sup> B	<b>2,60 unid. de pH</b>	5,0-9,0
TURBIEDAD	St Mth. 2130 B	<b>126 NTU</b>	---
CADMIO	St Mth. 3500 Cd B	<b>0,066 mg/L Cd</b>	0,01
COBRE	St Mth. 3500 Cu B	<b>14,2 mg/L Cu</b>	1,0
HIERRO	St Mth. 3500 Fe B	<b>28,1 mg/L Fe</b>	---
PLOMO	St Mth. 3500 Pb B	<b>&lt; 0,04 mg/L Pb</b>	0,05
ZINC	St Mth. 3500 Zn B	<b>1,71 mg/L Zn</b>	15,0

**OBSERVACIONES: //**

St Mth: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. AWWA, WEF, APHA 21th.

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

**MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA**  
DIRECTOR TÉCNICO  
QUÍMICO PQ 1426

Código:	R - 051	Versión:	0.1	Fecha:	22/05/09	Página:	1 de 1
---------	---------	----------	-----	--------	----------	---------	--------

## REPORTE DE RESULTADOS

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 14 de Enero de 2011	<b>No. 010486</b>
Solicitante: <b>SOCIEDAD MINERA CALVISTA SAS</b>	Tipo de muestra: Agua
Dirección: //	Identificación: <b>BC 023 LICENCIA 100-68</b>
Teléfono: //	Descripción: Residual Industrial
Lugar de muestreo: <b>CALIFORNIA</b>	Responsable de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de muestreo: 6 de Enero de 2011 9:30 a.m.	Procedimiento de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de recepción: 7 de Enero de 2011	Tamaño de la muestra: 500 mL
Fecha de análisis: 7 - 13 de Enero de 2011	Envase o empaque: Plástico
Análisis solicitado: Físicoquímico	Lote: //
Condiciones de la muestra: //	

### ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADOS	VALORES DE REFERENCIA (Res. 1594/84)
pH	St Mth. 4500 H <sup>+</sup> B	2,69 unid. de pH	5,0-9,0
TURBIEDAD	St Mth. 2130 B	164 NTU	---
CADMIO	St Mth. 3500 Cd B	0,035 mg/L Cd	0,01
COBRE	St Mth. 3500 Cu B	11,5 mg/L Cu	1,0
HIERRO	St Mth. 3500 Fe B	8,80 mg/L Fe	---
PLOMO	St Mth. 3500 Pb B	< 0,04 mg/L Pb	0,05
ZINC	St Mth. 3500 Zn B	0,35 mg/L Zn	15,0

**OBSERVACIONES: //**

St Mth: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. AWWA, WEF, APHA 21th.

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

**MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA**  
DIRECTOR TÉCNICO  
QUÍMICO PQ 1426

Código:	R - 051	Versión:	0.1	Fecha:	22/05/09	Página:	1 de 1
---------	---------	----------	-----	--------	----------	---------	--------

## REPORTE DE RESULTADOS

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 14 de Enero de 2011	No. 010483
Solicitante: <b>SOCIEDAD MINERA CALVISTA SAS</b>	Tipo de muestra: Agua
Dirección: //	Identificación: BC 26 LICENCIA 100-68
Teléfono: //	Descripción: Residual Industrial
Lugar de muestreo: <b>CALIFORNIA</b>	Responsable de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de muestreo: 6 de Enero de 2011 11:57 a.m.	Procedimiento de muestreo: SOLICITANTE
Fecha de recepción: 7 de Enero de 2011	Tamaño de la muestra: 500 mL
Fecha de análisis: 7 - 13 de Enero de 2011	Envase o empaque: Plástico
Análisis solicitado: Físicoquímico	Lote: //
Condiciones de la muestra: //	

### ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADOS	VALORES DE REFERENCIA (Res. 1594/84)
pH	St Mth. 4500 H <sup>+</sup> B	3,15 unid. de pH	5,0-9,0
TURBIEDAD	St Mth. 2130 B	0,23 NTU	---
CADMIO	St Mth. 3500 Cd B	< 0,01 mg/L Cd	0,01
COBRE	St Mth. 3500 Cu B	7,66 mg/L Cu	1,0
HIERRO	St Mth. 3500 Fe B	0,70 mg/L Fe	---
PLOMO	St Mth. 3500 Pb B	< 0,04 mg/L Pb	0,05
ZINC	St Mth. 3500 Zn B	0,35 mg/L Zn	15,0

**OBSERVACIONES: //**

St Mth: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. AWWA, WEF, APHA 21th.

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

**MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA**  
DIRECTOR TÉCNICO  
QUÍMICO PQ 1426

Código:	R - 051	Versión:	0.1	Fecha:	22/05/09	Página:	1 de 1
---------	---------	----------	-----	--------	----------	---------	--------