

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“ALTERNATIVAS DE ELIMINACIÓN DEL IÓN Fe^{3+} EN UN
EFLUENTE MINERO”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

ANGEL GIULIANO CASTRO ANGULO

LIMA – PERÚ

2010

DEDICATORIA

A Dios

Gracias por darme la vida, por poner en mi camino a personas maravillosas y por las bendiciones y regalos que recibo día a día.

A mi esposa Amelia

Por ser mi compañera, mi amiga, mi confidente. Gracias por el apoyo constante y los consejos que siempre tuviste en los momentos difíciles.

A mis padres Juana y Julio

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.

A mis hermanos Javier, Andy y Paty.

Porque siempre he contado con ellos para todo, gracias a la confianza que siempre nos hemos tenido; por el apoyo y amistad.

A mis suegros Aquiles y Amelia

Por sus buenos consejos y apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de manera especial y sincera a mi asesor, el Ingeniero Mario Garayar Avalos, por su dedicación, apoyo, paciencia y sobre todo por esa gran amistad que me brindó y me brinda, por escucharme y aconsejarme siempre.

A mis dilectos colegas y compañeros de trabajo por el apoyo incondicional, en las tantas veces que intercambiábamos ideas, opiniones; Pablo Valladares Hernández, Rafael Yancán Mayo y Adrian Jaime Asencios, un agradecimiento eterno.

RESUMEN

El presente informe, propone alternativas para la remoción de iones Fe^{2+} y Fe^{3+} presentes en el drenaje minero provenientes de una mina de oro, plata y zinc. El drenaje minero es originado cuando grandes cantidades de roca son excavadas en tajo abierto o en vetas en minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua produciendo la oxidación de minerales sulfurosos, lo cual da por resultado la producción de acidez, sulfatos y la disolución de metales.

Los drenajes de mina independientemente de la fuente que les da origen se pueden subdividir en dos grandes grupos: drenajes alcalinos o aguas residuales con bajo potencial de solubilización y drenajes ácidos o aguas con alto potencial de solubilización.

Los principales componentes que intervienen en la generación ácida son: los minerales sulfurosos, las bacterias y la temperatura, el agua y humedad de la atmósfera, un oxidante como el oxígeno.

En el caso presentado se utiliza un sistema de tratamiento compuesto por una neutralización por cal y posterior precipitación de los sólidos en suspensión por floculantes, más no se controló el Fe disuelto en el agua, por lo cual se busca alternativas para implementar un sistema que permita reducir la cantidad de ión Fe presente en el agua.

Los métodos a utilizar deben de ser de bajo costo, de fácil operación por personas no técnicas, utilizar insumos fáciles de obtener y no generar residuos que presenten un problema medioambiental. Existen dos tipos principales de sistemas de tratamiento del drenaje ácido de mina: los sistemas activos que requieren operación y mantenimiento continuo que consiste en la adición de sustancias alcalinas para conseguir la precipitación de los metales; y los sistemas pasivos que se basan en el tratamiento natural y pretenden funcionar sin mantenimientos mayores, entre los cuales destacan los humedales aerobios y anaerobios.

El presente trabajo plantea la posibilidad de utilizar un sistema de tratamiento pasivo por medio de un humedal aerobio el cual es el tratamiento más adecuado para el tipo de efluente que se desea tratar.

3. DESARROLLO DEL TEMA	43
3.1. Análisis de las aguas de mina	44
3.2. Planteamiento de la solución	46
3.2.1. Selección del sistema de tratamiento	46
3.2.2. Diseño básico del sistema de tratamiento	48
3.2.2.1.1. Dimensionamiento del humedal aerobio	52
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
5. BIBLIOGRAFÍA	58
6. APÉNDICE	61

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

Los drenajes ácidos de mina son aguas con una alta acidez y una alta carga de metales en disolución (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.). Estos drenajes ácidos de mina son el resultado de la reacción del agua tanto superficial como subterránea con minerales sulfurados.

La agencia de protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) en el documento técnico Predicción del Drenaje Ácido Minero estima que los drenajes ácidos de mina han afectado entre 8000 y 16000 km de riberas de ríos con metales como el cadmio, cobre, cinc y arsénico. Este documento también hace referencia a un informe [7] donde se describe que en el este de Estados Unidos existen más de 7000 km de cursos de aguas superficiales afectados por drenajes ácidos de carbón, cuyo tratamiento es muy costoso y de gran dificultad. Según varios autores los drenajes ácidos de minas son los causantes de la mayor contaminación ambiental entre los años 40 y 80.

Una de las cuestiones más importantes asociadas con los drenajes ácidos de minas es la degradación de la calidad del agua debido a la extrema acidificación de la misma y los problemas derivados de esta. Entre los problemas se pueden destacar la contaminación de las aguas haciéndola inadecuada para el consumo humano y otros usos, daños ecológicos alterando o eliminando comunidades biológicas existentes en los cursos del agua, deterioro del paisaje.

El proceso de formación de la pirita es la principal responsable de la formación de aguas ácidas [9]; esta oxidación se ve favorecida en áreas mineras debido a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros a través de las labores mineras de acceso, así como al incremento de la superficie de contacto entre las partículas. Dichos autores consideran que los factores que más afectan a la generación ácida son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución espacial de la pirita.

Tradicionalmente los efluentes mineros se han tratado mediante sistemas de tratamiento activo basados en la precipitación de hidróxidos, esta precipitación se realiza en un proceso de tres pasos: primero la oxidación para convertir Fe^{2+} en Fe^{+3} , segundo la dosis con álcalis para elevar el pH y producir la formación de hidróxidos y tercero la sedimentación, pero estos métodos tienen un coste elevado por lo que no pueden ser mantenidos por un periodo prolongado una vez finalizada la vida de la mina. Se debe tener en cuenta que el problema de las aguas ácidas puede perdurar varios cientos de años [7]. En la última década se han investigado diversos métodos de tratamiento pasivo y se ha comprobado que dan buenos rendimientos en la neutralización de pH y la eliminación de metales pesados. Además requieren poco mantenimiento y su bajo coste puede ser asumido durante largos periodos de tiempo (20 a 40 años) una vez clausurada la instalación minera [16].

En Estados Unidos desde hace algunos años muchos investigadores y organismos oficiales vienen desarrollando con buenos resultados el empleo de sistemas de tratamiento pasivo para drenajes ácidos de mina. Entre 1984 y 1993 la oficina de minas de estados unidos estudio 13 humedales destinados al tratamiento de drenajes ácidos de minas de carbón, alcanzándose eliminaciones superiores al 85% de los metales. En 1985 junto con la Autoridad del Valle de Tennessee construyeron 14 humedales para tratar drenajes ácidos procedentes de plantas mineras de carbón, consiguiendo incrementar el pH de 3,1 a 6,7 y una reducción para el hierro de 69 a 0,9 mg/L.

En Canadá también se vienen aplicando sistemas pasivos de tratamiento de drenajes ácidos. Entre 1990 y 1993 se construyeron dos humedales anaerobios experimentales para tratar las aguas ácidas de las minas de cobre Bell Copper. En los dos sistemas se incremento el pH desde 6 hasta 6-8 y se lograron reducciones del 40% y del 80% de cobre.

En Europa también se está experimentando con estos sistemas. Así en el Reino Unido existen más de 14 humedales operando con sistemas de producción de alcalinidad, procesos aerobios, anaerobios, o una combinación de estos. Están

dedicados al tratamiento de aguas ácidas de carbón, donde se ha llegado a eliminar más de 50% del hierro.

En el norte de Australia a inicios de los 90 se estudian las mejoras en la calidad en los drenajes ácidos provenientes de minas de oro, uranio y polimetálicas, con humedales construidos por diferentes empresas mineras donde se ha demostrado la viabilidad de la aplicación de estos sistemas.

En el Perú en un reporte presentado por el ministerio de Energía y Minas hasta Junio del 2005 existían 611 minas inactivas en el país las cuales al encontrarse abandonadas constituyen pasivos mineros que generan drenaje ácido lo cual agrava el problema mucho más [8]. Durante años en nuestro país se ha realizado la remoción de metales pesados por medio de métodos fisicoquímicos, actualmente existen algunos intentos de implementar sistemas biológicos aunque con ciertas deficiencias.

Los métodos de tratamiento pasivo se basan en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales, el objetivo principal de estos sistemas de tratamiento es la supresión de la acidez y la precipitación de los metales. Para ello actúan cambiando las condiciones de PH del drenaje de forma que se favorezca la formación de especies insolubles que precipiten y retengan la carga contaminante.

Entre los métodos pasivos que más se han utilizado destacan los humedales aerobios, los humedales anaerobios o balsas orgánicas, los drenajes anóxicos calizos. En la práctica estos métodos se utilizan solos o combinados, dependiendo del tipo de drenaje y de los requerimientos de tratamiento.

Una empresa minera se dedica a la exploración, desarrollo y explotación de yacimientos mineros de oro plata y zinc, así como a la producción de concentrados de mineral. Las unidades mineras se encuentran en los Andes centrales cuyo clima se caracteriza por ser frío y seco y la topología del lugar está constituida por cumbres elevadas y escarpadas y colinas de mediana altura con superficies onduladas. Actualmente el drenaje minero recibe un tratamiento de neutralización con cal que precipita parte del hierro presente quedando el resto de hierro disuelto en agua, el cual se debe eliminar.

1.2 **Objetivo de estudio**

Plantear una alternativa tecnológica económica para la eliminación del ión Fe^{3+} de un efluente minero que supera los límites máximos permisibles.

1.3 **Alcance del estudio**

Presentar alternativas viables para el tratamiento de un efluente minero la cual incluye el diseño básico de un sistema de tratamiento pasivo consistente en un humedal aerobio.

Para un caudal de agua de $2076 \text{ m}^3/\text{día}$ se propone un humedal aerobio de área $0,57 \text{ ha}$ y tiempo de retención $8,89 \text{ h}$.

2. DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TÉCNICAS

2.1 Drenaje Ácido

2.1.1 Generalidades

Los drenajes ácidos de mina son aguas que presentan acidez y una alta carga de metales en disolución. Estos drenajes ácidos de minas son el resultado de la reacción del agua tanto superficial como subterránea con minerales sulfurados, el ácido es generado en las instalaciones mineras cuando los sulfuros metálicos minerales son oxidados. Los sulfuros minerales están presentes en el interior de las rocas asociados con diferentes metales. Los procesos de extracción asociados a la actividad minera incrementan el grado de estas reacciones químicas debido a la movilización de grandes volúmenes de materiales, y al incrementar el área de exposición de las rocas al aire y al agua. Anteriormente a la minería, la oxidación de estos minerales y la formación de ácido sulfúrico correspondían a procesos de oxidación de los metales en forma natural lo cual es un proceso muy lento que no representa mayor peligro para el medio ambiente.

No todos los minerales sulfurosos son igualmente reactivos, ni la acidez se produce en igual proporción. Además no todos los minerales sulfurosos o rocas con contenidos de de sulfuro son potencialmente generadoras de ácido. La tendencia de una muestra particular de roca a generar acidez neta es una función del balance entre los minerales sulfurosos productores potenciales de ácido y los minerales alcalinos consumidores potenciales de ácido.

El proceso mediante el cual se consume ácido se llama neutralización. Teóricamente, cada vez que la capacidad consumidora de ácido de una roca (potencial de neutralización) excede al potencial de generación de ácido, se consumirá toda la acidez y el agua que drene de la roca se encontrara en el nivel de pH neutro o cerca a él. El drenaje ácido generado por la oxidación de sulfuros puede neutralizarse por contacto con minerales consumidores de ácido. Como

resultado de ello, el agua que drena de la roca puede tener un pH neutro y una acidez insignificante, a pesar de la continua oxidación de sulfuros.

A lo largo del tiempo la química del agua de drenaje cambiará, desde ligeramente alcalino hasta casi neutro y finalmente ácido con concentraciones crecientes de metales.

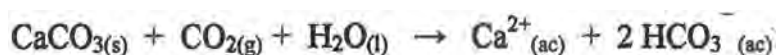
Los daños producidos por los drenajes ácidos de mina varían desde problemas de alteraciones subletales para algunos individuos de los ecosistemas afectados en los casos de polución muy débil hasta la desaparición de la fauna fluvial, así como la pérdida de sus recursos hídricos al tornarse el agua inservible para el consumo humano, agrícola o industrial.

2.1.2 Clasificación de los drenajes de mina

Para determinar el tipo de drenaje es necesario hacer un estudio detallado de las condiciones físicas del medio, el clima del lugar y una caracterización de los efluentes de mina, para ello se realizan muestreos de agua y sedimentos para su análisis en laboratorio y determinar las concentraciones metálicas presentes, también se recurre a la medición in-situ de parámetros como: pH, contenido de oxígeno, temperatura, Fe, acidez/alcalinidad, turbidez y otros. Independientemente de la fuente que da origen a los drenajes de mina, estos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Drenajes alcalinos.
- Drenajes ácidos.

Las aguas alcalinas en las explotaciones mineras se producen cuando las filtraciones desde superficie o desde acuíferos subyacentes circulan a través de materiales calizos o dolomíticos. La disolución del carbonato cálcico tiene lugar debido a la presencia de anhídrido carbónico en el agua y da lugar a la siguiente reacción:



El contenido en ion bicarbonato en las aguas es el que marca la alcalinidad de estas.

Un drenaje es ácido cuando los minerales ácidos exceden a los alcalinos, pueden contener elevadas concentraciones de SO_4^{2-} , Fe, Mn, Al y otros iones, donde la presencia de Fe, Al y Mn disueltos pueden generar iones H^+ por hidrólisis y bajar el pH.

En drenajes ácidos el anión principal es el SO_4^{2-} y los cationes mayoritarios son Fe, Mn y Al. En cambio en drenajes alcalinos el HCO_3^- es más significativo que el SO_4^{2-} y los contenidos de Ca, Mg y Na son más elevados que los de Fe y Al.

2.1.3 Proceso de formación de aguas ácidas

2.1.3.1 Reacciones químicas y biológicas en la generación ácida

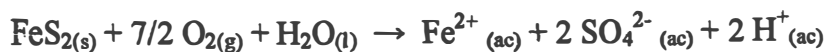
La generación ácida así como su consumo (por neutralización), es el resultado de un gran número de reacciones químicas interrelacionadas. Los elementos fundamentales que intervienen en la generación ácida son:

- Minerales sulfurosos
- Bacterias y temperatura
- Agua o humedad de la atmósfera
- Un oxidante, particularmente oxígeno proveniente del aire o de procedencia química

La total exclusión de la humedad o del oxidante detendrá la generación ácida. En la mayoría de los casos, la actividad bacteriana juega un papel

importante en la aceleración de la velocidad de generación ácida, la inhibición de éstas disminuirá la velocidad de formación de efluentes ácidos.

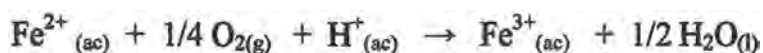
Nordstrom y Alpers [9], Skousen et.al [12] y la EPA (Agencia de protección ambiental de Estados Unidos) [3], explican las reacciones que se producen en la generación ácida a partir de la oxidación de la pirita (FeS_2), por ser uno de los sulfuros minerales más comunes que acompañan a las menas de interés económico. Estas reacciones son:



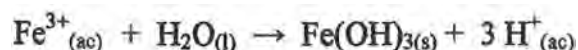
En la primera reacción debido a la oxidación del sulfuro mineral se forma hierro (ión ferroso), sulfato e hidrogeno.

Los compuestos disueltos Fe^{2+} , SO_4^{2-} e H^+ representan un incremento en el total de sólidos disueltos y de la acidez del agua, a menos que sea neutralizado el incremento de la acidez estará asociado con una disminución del pH.

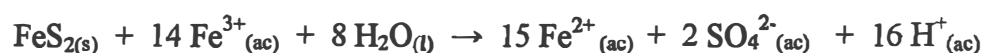
Si el ambiente circundante es suficientemente oxidante, muchos de los iones ferrosos se oxidarán a iones férricos.



A valores de pH entre 3,5 a 4,5 el ión férrico es catalizado por la bacteria Metallogenium y a pH por debajo de 3.5 la reacción se catalizada por la bacteria Thiobacillus ferrooxians. Por lo general a pH entre 2,3 a 3,5 el ión férrico por hidrólisis precipita como hidróxido $\text{Fe}(\text{OH})_3$ lo que provoca un descenso del pH.



Algunos cationes férricos que no precipitan en la solución, pueden seguir oxidando adicionalmente a la pirita y formar nuevamente los iones ferrosos, sulfato e hidrógeno.



Cuando la acidez producida es baja en relación a la capacidad neutralizante del medio, las bacterias no pueden desarrollarse y la producción de lixiviados ácidos no es muy elevada, sin embargo si las condiciones que se alcanzan son ácidas se produce un incremento en la población de las bacterias que catalizan estos procesos, lo que ocasiona que cada vez se produzca más acidez y el proceso se retroalimenta generando aguas con valores de pH muy bajo y enormes concentraciones de metales.

2.1.3.2 Etapas de formación del drenaje ácido minero

EL desarrollo del drenaje ácido de mina es un proceso que depende del tiempo y comprende tanto reacciones químicas de oxidación como fenómenos físicos relacionados. En algunos asientos mineros, el drenaje ácido se detecta desde el inicio de las operaciones. En otros han pasado de 10 a 40 años antes de que se observe drenaje ácido. En estos sitios las reacciones de oxidación de sulfuros y generación de ácido probablemente estuvieron ocurriendo durante el intervalo de retardación previo a la etapa de medición del agua de drenaje, pero en una baja proporción y con neutralización de los productos de oxidación.

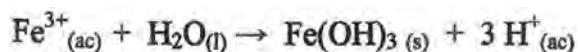
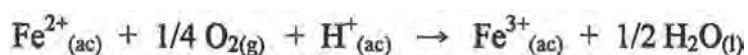
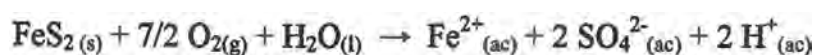
Generalmente se observa como un proceso de tres etapas, definidas por el pH del agua en el microambiente de minerales sulfurados. Con frecuencia las siguientes descripciones son usadas para comprender la naturaleza del drenaje ácido de mina durante el tiempo.

Etapa I. Los minerales sulfurosos se oxidan liberando hierro ferroso que bajo condiciones neutras se oxida químicamente y se transforma en hierro férrico que precipita mediante hidrólisis como hidróxido y aporta acidez al medio, disminuyendo por tanto el Fe^{3+} en solución. Mientras se produce la oxidación de los minerales sulfurosos, existe suficiente alcalinidad disponible como para neutralizar parcialmente la acidez que se ha producido lentamente.

Este es fundamentalmente un periodo de oxidación que se caracteriza por ser lento tanto en la oxidación química como en la biológica, donde el oxígeno es el oxidante principal, al producir sulfato y acidez a partir de la oxidación de los minerales sulfurados. Los minerales carbonatados, como la calcita (CaCO_3) presente en la roca, neutralizan esta acidez y mantienen condiciones que van de neutras a alcalinas ($\text{pH} > 7$) en el agua que fluye sobre la roca. También se podría detectar un contenido elevado de calcio (y magnesio u otros metales, dependiendo de las rocas consumidoras de ácido presentes), como resultado de la disolución de minerales carbonatados, debido al consumo de ácido.

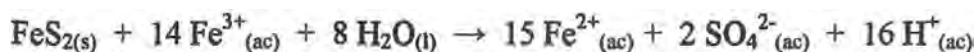
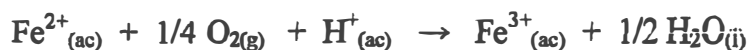
Etapas II. A medida que continúa la generación de ácido, la capacidad neutralizadora del medio disminuye debido a que se agotan o se vuelven inaccesibles los minerales, el pH del agua desciende y predomina la oxidación de la pirita por acción bacteriana. En la reacción se produce el Fe^{2+} que al ser oxidado nuevamente se transforma en Fe^{3+} , y este a su vez en contacto con el agua da lugar a la acidez y al hidróxido férrico, que es insoluble y es el que provoca la coloración amarilla en las aguas.

De lo expuesto anteriormente las reacciones en las etapas I y II son:



Etapas III. Cuando el PH desciende por debajo de 3 en la proximidad de los granos de pirita (aproximadamente 4,5 en el agua), la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* oxida el ion ferroso a férrico que a su vez oxida los sulfuros (pirita) produciendo más ácido. En esta etapa el ion férrico reemplaza al oxígeno como el oxidante principal de los sulfuros y la velocidad de oxidación es más rápida debido al descenso del pH.

Entonces las reacciones en la etapa III son:



No hay estudios científicos definitivos para cuantificar la aceleración de las velocidades de oxidación debido a la oxidación catalizada biológicamente; sin embargo, en la literatura existen informes sobre la observación del aumento de velocidades de 10 a un millón de veces más que aquellas generadas por oxidación química. En esta etapa, el agua de drenaje es generalmente ácida, caracterizada por sulfatos y metales disueltos en concentraciones elevadas. El hierro disuelto se presenta como hierro ferroso y férrico.

En algún momento en el futuro, décadas y posiblemente siglos después del inicio de la generación de estos ácidos, la velocidad disminuirá con la oxidación completa de los sulfuros más reactivos y el pH se incrementará hasta que la roca se torne solo ligeramente reactiva y el pH del agua del drenaje no sea afectado. El tiempo para cada etapa sucesiva puede variar de un periodo de días a un periodo de cientos de años, dependiendo de los factores que controlen la generación de ácido.

2.1.4 Caracterización de aguas de mina

La geoquímica de las aguas de mina es un fenómeno complejo al haber diversos procesos físicos, químicos y biológicos jugando un papel importante en la producción, liberación, movilidad y atenuación de los contaminantes, comprende una serie de procesos, como la oxidación de la piritita; y otros sulfuros; la oxidación e hidrólisis del hierro disuelto y otros metales; la capacidad neutralizadora del mineral; la capacidad neutralizadora de las aguas bicarbonatadas; la disponibilidad de oxígeno; la disponibilidad agua líquida o en forma de vapor; las variaciones climáticas (diarias, estacionales o episodios de tormentas); el calentamiento por conducción y radiación del calor generado en

diversas reacciones exotérmicas (oxidación de la pirita, disolución de sales solubles y la dilución de un ácido concentrado); la temperatura; la acción de catálisis por bacterias.

La caracterización precisa del drenaje ácido es muy importante para efectuar la correcta selección y dimensionamiento de los dispositivos operacionales que configuran el conjunto del tratamiento que se ha de efectuar. Una adecuada caracterización debe incluir la medida precisa y representativa del caudal y al menos de los parámetros químicos siguientes: pH in situ, pH en laboratorio, alcalinidad total, acidez o alcalinidad neta (expresadas todas como CaCO_3); además del contenido de Fe^{2+} , hierro total, Al, Mn, SO_4^{2-} y conductividad [7]. El conjunto de estas medidas se ha de realizar al menos durante un año hidrológico.

La acidez o alcalinidad de un drenaje de mina son parámetros básicos en la selección del tipo de tratamiento, representan la capacidad de estas aguas para neutralizar una base o un ácido. Que una solución presente acidez o alcalinidad está en función de que predomine en ella su acidez total o su alcalinidad total, hablándose entonces con más precisión de acidez o alcalinidad neta.

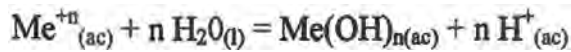
$$\text{acidez/alcalinidad neta} = \text{acidez total} - \text{alcalinidad total} \quad (\text{Ec. 1})$$

2.1.4.1 Acidez de aguas de mina

Por lo general, en aguas naturales existen tres tipos de acidez y puede ser producida por el CO_2 o acidez orgánica (asociado con la disolución de protones orgánicos), por la presencia de iones H^+ libre (acidez protón asociado con el pH), por la presencia de acidez mineral asociado a la disolución de minerales. Las aguas de mina generalmente tienen muy poco contenido de carbón orgánico disuelto, por lo que la acidez orgánica es muy baja.

La acidez total de las aguas de mina es representada por la concentración de iones H^+ libres (los que definen el pH), junto con los iones hidrógeno que se

pueden generar por la oxidación e hidrólisis de los metales que contiene la solución, tales como Fe, Al, Mn, etc, a través de la reacción:



En la práctica lo que se mide en el laboratorio es la acidez neta y la alcalinidad total, deduciéndose la acidez total mediante la ecuación que relaciona la acidez neta con la acidez total y la alcalinidad total. La acidez y la alcalinidad se suelen medir como equivalentes de CaCO_3 después de haber añadido H_2O_2 y calentado la muestra para promover la total oxidación e hidrólisis de todos los metales.

La acidez total teórica puede ser calculada si se conoce el pH y la concentración de cada uno de los metales que generan acidez. La acidez total sería la suma de la acidez atribuible a los iones H^+ (se considera que la concentración de los iones H^+ es $10^{-\text{pH}}$), y a la acidez potencial de los cationes metálicos (Me^{+n}). El cálculo de la acidez teórica estimada se hace mediante la fórmula siguiente [5]:

$$\begin{aligned} \text{Acidez teórica estimada} = & 50(2\text{Fe}^{2+}/56 + 3\text{Fe}^{3+}/56 + 3\text{Al}^{3+}/27 + 2\text{Mn}^{2+}/55 \\ & + 1000 (10^{-\text{pH}})) \end{aligned} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde todas las concentraciones de los metales están en miligramo por litro y 50 es la masa equivalente del CaCO_3 , y así se transforman los miliequivalentes por litro de acidez a miliequivalentes por litro de CaCO_3 .

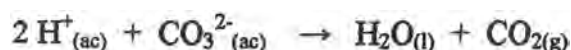
2.1.4.2 Alcalinidad de aguas de mina

La reducción de la concentración de hidrogeniones (H^+) en solución está asociada a la presencia de especies químicas como los iones hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos que tienen la capacidad de reaccionar con los hidrogeniones reduciendo la acidez del medio. La alcalinidad neta es obtenida por la diferencia entre la alcalinidad total y la acidez total.

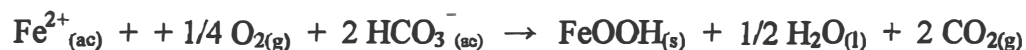
La alcalinidad total de una solución generalmente está representada por los iones hidróxido y bicarbonato y se suelen medir directamente en laboratorio. Que un drenaje presente alcalinidad neta significa que una vez que se ha llevado a cabo la oxidación e hidrólisis de los metales que pueden generar iones hidrógeno libres aún presenta cierta capacidad para neutralizar cierto volumen de un ácido.

Cuando el agua de mina tiene un pH mayor que 4,5 tiene cierta capacidad de neutralizar ácidos o reaccionar con iones hidrógeno (aceptar protones o iones H^+), se dice que es un drenaje alcalino. La determinación de la alcalinidad total es importante en los procesos de control de la corrosión y evaluación de la capacidad tampón del agua.

La principal fuente de alcalinidad en el drenaje de mina la presencia de iones hidróxidos (OH^-) y a la disolución de carbonatos, estos últimos pueden estar en forma de bicarbonatos (HCO_3^-) o carbonatos (CO_3^{2-}), ambos pueden neutralizar el protón ácido de acuerdo a las siguientes reacciones:



Las aguas netamente alcalinas contienen suficiente alcalinidad para neutralizar la acidez general generada por la disolución del Fe^{2+} y Mn . Cuando estos metales se oxidan e hidrolizan se genera acidez que rápidamente es neutralizado por bicarbonato. Para aguas de mina que contienen Fe^{2+} la reacción general de oxidación e hidrólisis es la siguiente:



2.2 Técnicas del tratamiento del drenaje ácido

Generalmente los procesos de tratamientos de drenajes ácidos se basan en la eliminación y el aislamiento de los metales y aniones metálicos de las aguas. Algunos de ellos incluyen las técnicas de precipitación que suelen ser bastantes

efectivas para conseguir la calidad deseada de los efluentes. Cualquier tipo de vertido de efluentes de mina debe garantizar que estos sean estables, que no reaccionarán ni química ni biológicamente con los elementos naturales del entorno y que no producirán daños al medio ambiente.

Por lo general los métodos de tratamiento de aguas ácidas de mina se clasifican en dos grandes grupos:

- Métodos activos
- Métodos pasivos

2.2.1 Tratamiento químico activo de drenajes ácidos

Los sistemas de tratamiento activo comúnmente están basados en la precipitación de hidróxidos, que se realiza en un proceso de tres pasos:

- Oxidación (Para convertir el Fe^{2+} en Fe^{3+})
- Neutralización mediante dosis con álcalis.
- Sedimentación.

Para lograr la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} para su posterior precipitación tradicionalmente se utiliza una cascada de aireación, sin embargo en algunas circunstancias es necesario el uso de reactivos químicos de propiedades oxidantes que son usados para ayudar a completar el proceso de oxidación mejorando así la precipitación de hidróxidos metálicos. Los productos de hipoclorito, peróxido de hidrógeno y permanganato de potasio son usados en casos donde existe drenaje ácido minero y han demostrado una oxidación bastante efectiva. El peróxido de calcio ha demostrado oxigenar el drenaje ácido minero además de neutralizar su acidez.

En la tabla 1 se muestran los productos químicos más utilizados en el proceso de oxidación en el tratamiento del drenaje ácido minero:

Tabla 1: Productos químicos oxidantes

Nombre	Fórmula	Comentarios
Hipoclorito de Calcio	$\text{Ca}(\text{ClO})_2$	Oxidante fuerte
Hipoclorito de Sodio	NaClO	Oxidante fuerte
Peróxido de Calcio	CaO_2	Neutralizador de ácido
Peróxido de Hidrógeno	H_2O_2	Oxidante fuerte
Permanganato de potasio	KMnO_4	Muy efectivo, comúnmente usado

Respecto al proceso de neutralización mediante dosis con álcalis, cada reactivo posee sus propias ventajas e inconvenientes. Se suele utilizar cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) cuando se necesita tratar grandes caudales en condiciones de alta acidez, otros de los químicos usados en el proceso de neutralización es la caliza (CaCO_3) que se caracteriza por ser un producto barato, abundante y poco peligroso pero tiene el inconveniente que se requiere de cantidades muy grandes de este material. En el caso que el espacio disponible para la planta de tratamiento es muy pequeño, se puede usar amoníaco en forma de gas.

En la tabla 2 se muestran los químicos usualmente utilizados para la neutralización de la acidez en el tratamiento del drenaje ácido minero:

Tabla 2: Productos químicos para neutralización de acidez

Nombre	Fórmula	Comentarios
Caliza	CaCO_3	Es más barato que la cal y fácil de manipular
Cal hidratada	Ca(OH)_2	Es hidrófoba, necesita equipo de agitación
Cal Viva	CaO	Muy reactivo
Carbonato Sódico	NaCO_3	Usado en drenajes de pequeños caudales, es costoso
Hidróxido de Sodio	NaOH	Muy soluble, viene como lentejas o perlas cuando es sólido
Amoniaco	NH_3	Es muy soluble
Hidróxido de Potasio	KOH	Similar al hidróxido de sodio
Hidróxido de Magnesio	Mg(OH)_2	Similar a la cal hidratada
Cal de Magna	MgO	Similar a la cal viva
Peróxido de calcio	CaO_2	Usado como neutralizador y oxidante

Aunque efectivos, los tratamientos pasivos son costosos cuando se consideran los costos de equipos, químicos y mantenimiento [12]. Además, los tratamientos químicos deben ser a largo plazo y la responsabilidad posiblemente interminable. Si el problema del drenaje ácido de mina se desarrolla durante o después de la reparación, se debe desarrollar un plan para tratar el problema.

El orden de operar, haciendo una selección de sistemas de tratamiento activos, se debe determinar el pH, sólidos suspendidos totales, acidez/alcalinidad en mg/L de CaCO_3 , concentraciones de Fe y Mn, disponibilidad de energía eléctrica, la distancia desde la adición de los químicos hasta donde el agua entra al lugar de medición, y el volumen del tanque de medición. Después de evaluar estas variables en un periodo de tiempo, se puede considerar la economía de diferentes químicos y alternativas de sistemas de tratamiento activo.

2.2.2 Tratamiento pasivo de drenajes mineros

Las medidas correctoras, para neutralizar los aportes de aguas ácidas de mina, se centran no solo en las plantas de neutralización para corrección de vertidos, si no también en otros métodos como los tratamientos pasivos, aunque la divulgación aún es insuficiente. Estos tratamientos pasivos, cada vez más atractivos consiguen mejorar parámetros químicos que han causado problemas a lo largo de mucho tiempo.

Un sistema de tratamiento pasivo es aquel que se utiliza para tratar el drenaje de mina a través de procesos químicos, biológicos y gravitacionales que ocurren en forma natural, para lo cual se crea un medio ambiente controlado para el tratamiento.

Conceptualmente los sistemas de tratamiento pasivos ofrecen muchas ventajas sobre los sistemas de tratamiento activos convencionales. El uso de aditivos químicos y el consumo de energía son prácticamente eliminados. En un sistema pasivo, los costos de operación, mano de obra y mantenimiento son

considerablemente menores que los de un sistema activo, donde es necesario construir y mantener plantas de tratamiento químico. Además, un sistema pasivo se construye sobre los escenarios de un asiento minero y por lo tanto las preocupaciones ambientales que se asocian a la construcción y operación de una planta de tratamiento por lo general no se dan en este caso.

Los sistemas de tratamiento pasivo utilizan procesos de eliminación de contaminantes que son más lentos que los correspondientes a los utilizados en los sistemas de tratamiento convencional, por lo que, para lograr resultados similares, se requieren mayores tiempos de retención del agua de mina y mayores superficies de tratamiento.

En general, las principales tecnologías pasivas incluyen una combinación de los siguientes componentes: humedales artificiales (aeróbico y anaeróbico), drenajes anóxicos, varias otras tecnologías se han propuesto y usados en sistemas pasivos para el tratamiento del drenaje minero. Cada una de estas tecnologías será la más adecuada dependiendo del tipo particular de problemática del drenaje de mina. Normalmente el sistema de tratamiento se selecciona haciendo un balance del espacio disponible y los costes de construcción frente a la calidad de agua y los costes de posibles tratamientos químicos.

2.2.2.1 Humedales naturales

Los humedales naturales (ver figura 1) son complejos mosaicos de láminas de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático cercano a la superficie, en los que el suelo se mantiene saturado de agua durante un largo periodo de tiempo cada año. En los humedales crecen vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a estas condiciones ambientales, todos alimentados con productos generados en el humedal.

Los humedales comprenden un reservorio genético de gran interés especialmente en avifauna. Estas zonas poseen gran importancia como áreas de descanso, asentamiento, nidificación y reproducción de un gran número de aves migratorias y sedentarias, que sin estos lugares llegarían a desaparecer debido a espacios adecuados para su reproducción.

La productividad de los humedales naturales supera ampliamente a la de los más fértiles campos agrícolas. Estas zonas reciben, capturan y reciclan continuamente nutrientes procedentes de otros puntos tierras arriba. Estos nutrientes permiten el crecimiento de una abundante macro y micro vegetación, que convierten compuestos químicos inorgánicos en materia orgánica.

Otros animales que están próximos al paisaje acuático o ambiente terrestre y se alimentan con plantas y animales propios de los alrededores altamente productivos de los humedales y que a su vez, llegan a ser presas de otros a una mayor distancia, extendiendo así la productibilidad de los humedales, más allá de sus límites naturales.

La vegetación y las bacterias presentes en los humedales naturales, junto a procesos físicos y químicos son capaces de depurar de manera efectiva el agua, eliminando grandes cantidades de contaminantes de origen municipal, industrial o agrícola, como también efluentes de fuentes dispersas de desagües de mina. Los humedales naturales pueden remover hierro, manganeso, y otros metales de drenajes ácidos; ello ha sido así a través de las edades geológicas.

Todas estas bondades de los humedales naturales sólo han sido reconocidas en fechas recientes. De hecho, hasta hace pocos años, los humedales eran considerados sobre todo en países desarrollados como improductivos e insalubres, siendo vistos como un obstáculo para el desarrollo, debido a ello los gobiernos incentivaban las acciones destinadas a su desaparición.



Figura 1. Humedal natural.

2.2.2.2 Humedales artificiales

El término humedales artificiales (ver figura 4) se refiere a un área diseñada y construida por el hombre a través del cual, las aguas residuales pasan a ser tratadas.

El propósito de los humedales artificiales es la simulación de los mecanismos propios de los humedales naturales para la depuración de las aguas, donde se combinan los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren al interactuar el agua con el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera dando lugar a procesos como la sedimentación de los metales contaminantes de los drenajes mineros.

La idea de utilizar humedales construidos como método alternativo a otros tratamientos de aguas contaminadas fue el resultado de observar la mejora que se producía en la calidad de las aguas al atravesar humedales naturales.

En el verano de 1986, efluentes de una mina metálica abandonada en la cuenca del río Colorado (Estados Unidos), fueron vertidos a un humedal natural como experiencia para valorar la capacidad de eliminación de contaminantes del humedal. De esta experiencia se pudo demostrar la capacidad de retención de metales que podían tener los humedales naturales y que existen ciertas especies de plantas que tienen tolerancias muy altas para elevadas concentraciones de metales y bajos pH.

La observación de que el agua que atravesaba los humedales naturales experimentaba una mejora notable en su calidad, llevó a utilizarlos en Estados Unidos y en otros países como un método natural del tratamiento de las aguas. Los humedales de origen natural forman parte del sistema de escorrentía superficial de la zona, por lo que en caso de ser utilizados para la depuración de las aguas, han de observarse las normas limitativas respecto a la calidad del agua vertida.

Dado que la utilización de humedales naturales para el tratamiento de las aguas, resulta cada vez más problemático, al tratarse de espacios normalmente protegidos, en los que, para evitar su deterioro, la hidrología y la carga química deben de ser mantenidos dentro de unos límites estrechos, se pasó a desarrollar humedales artificiales como una alternativa viable para el tratamiento de aguas contaminadas.

Los humedales artificiales presentan sobre los humedales naturales la ventaja de que pueden ser diseñados y manipulados para admitir determinadas porciones de cargas hidráulicas y químicas. Generalmente un humedal construido funciona mejor que un humedal natural de igual área debido a que las principales características de humedal son seleccionadas para que su efectividad en el tratamiento de un determinado tipo de agua sea la óptima.

La vegetación desempeña un papel importante en el tratamiento del drenaje ácido de mina, especialmente en el estímulo de procesos microbianos en el retiro de metal. La selección de plantas es una importante etapa para alcanzar

un tratamiento acertado. Sin embargo poco trabajo existe en la selección apropiada de la especie de planta para los humedales, todo esto puede tener implicaciones importantes para el éxito a largo plazo de un proyecto. Puesto que el drenaje de mina es altamente ácido y contiene altas cantidades de metales, las plantas tienen que ser seleccionadas considerando su capacidad de resistir estas condiciones. Además, la selección de la vegetación se debe hacer basándose en el conocimiento de condiciones locales, y su capacidad de proporcionar las funciones requeridas.

Actualmente algunos organismos y autores recomiendan que una balsa de sedimentación sea el primer elemento de cualquier sistema pasivo debido a su simplicidad y su potencial eliminación de sólidos inertes en suspensión (es decir eliminar o reducir la turbidez del agua a tratar); es evidente que resultara mucho más sencillo retirar el sedimento acumulado de una celda de este tipo que de un humedal propiamente dicho, con lo que además de logra prolongar de forma significativa la vida útil del mismo. Muchas de las aguas susceptibles de ser sometidas a un tratamiento pasivo llevarán en suspensión finas partículas (por ejemplo, de suelo) de naturaleza inerte, como pueden ser las arcillas o el cuarzo, que quedan satisfactoriamente retenidas en una balsa de sedimentación.

Para evitar la escorrentía es de obligado cumplimiento la construcción de canales perimetrales para evitar la entrada de escorrentía al humedal.

Es importante evitar la infiltración del agua contaminada al suelo para lo cual se debe disponer en la base y laterales de la celda una lámina de material artificial impermeable como polietileno de alta densidad (ver figuras 2 y 3), protegida inferiormente o en su parte en contacto con el terreno, generalmente con un geotextil. Para evitar la rotura de la lámina impermeable es recomendable eliminar del fondo de las celdas rocas, raíces y cualquier otro elemento peligroso.



Figura 2. Excavación para la celda de un humedal a escala piloto.

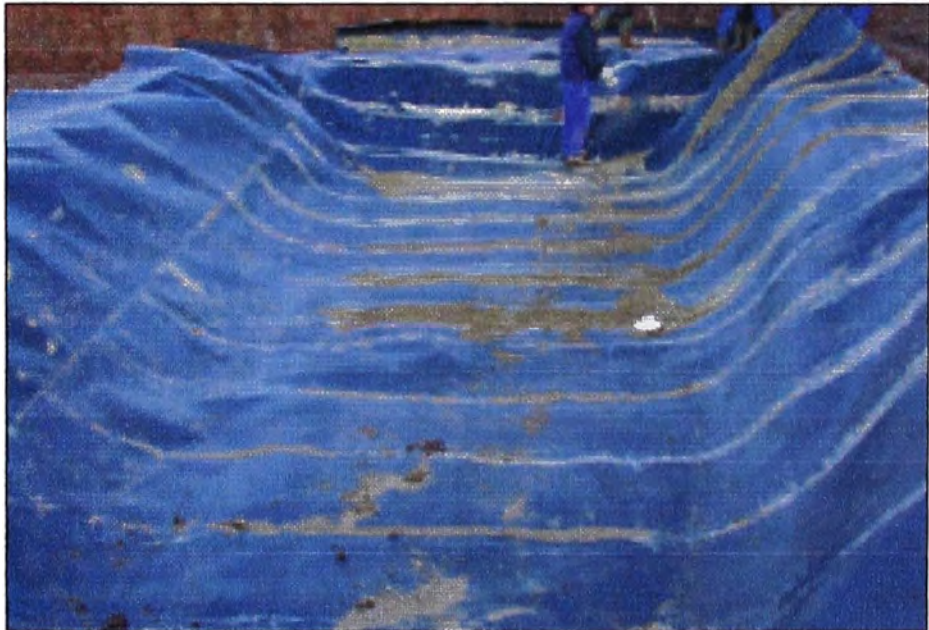


Figura 3. Colocación de material impermeable para la celda de un humedal a escala piloto.

Los humedales, tanto naturales como artificiales, además de cumplir con su función de medios depuradores de las aguas, también permiten su uso con finalidades recreativas, al desarrollarse en ellos un ambiente idóneo para el hábitat de una amplia fauna, que acrecienta el interés de su construcción.



Figura 4. Humedal artificial construido en Gainesville, Florida, Estados Unidos.

2.2.2.3 Humedales aerobios

En los humedales aerobios artificiales (ver figura 6) se pretende reproducir los fenómenos y procesos de los humedales naturales (pantanos, marismas, tuberías, 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 [6]. Estos humedales ocupan una gran superficie y tienen una somera lámina de agua que inunda el sustrato sobre el que se desarrolla la vegetación (ver figura 5). 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.

Estos sistemas favorecen el contacto entre el agua contaminada y el aire atmosférico mediante el empleo de plantas acuáticas, al liberar éstas oxígeno por sus raíces y rizomas; para que la vegetación emergente actúe de este modo el

espesor de la lámina de agua no debe superar los 30 cm (no menos de 10 cm para evitar el crecimiento de hierba común). El sustrato oxigenado del humedal propicia la formación de un hábitat para que se desarrollen ciertas colonias de bacterias que actúen como catalizadores en la reacción de oxidación de los contaminantes presentes en el humedal, transformándolo en el caso del hierro de Fe^{2+} a Fe^{3+} , el cual finalmente precipita en forma de hidróxido. Las especies vegetales aparte de proporcionar condiciones favorables para la sedimentación de metales provocan la circulación más lenta del flujo.

La densidad de las plantas (*Typha*) en un humedal suele ser de 10 plantas/m², para mantener esta población es conveniente fertilizantes en el humedal ya que las aguas de mina no llevan los nutrientes necesarios.

El crecimiento natural de algas en los humedales favorece la bioacumulación de metales pesados, especialmente Fe y Mn que son utilizados, como micronutrientes.

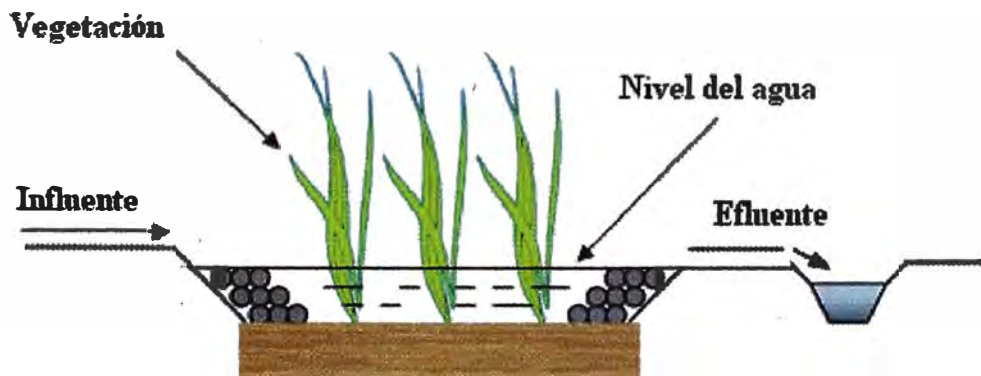
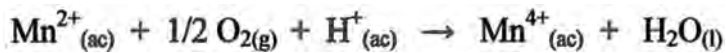
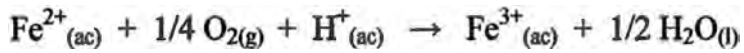


Figura 5. Representación esquemática de un humedal aerobio.

Entre los numerosos procesos que se dan en un humedal aerobio, tenemos: la oxidación de metales, precipitación y coprecipitación, además de la filtración de la materia en suspensión, la adsorción de metales e intercambio iónico en los materiales del sustrato, la bioacumulación de metales en las raíces y partes emergentes de las plantas.

Las bacterias presentes en la columna de agua, sustrato y rizosfera (zona de raíces) pueden catalizar la oxidación de metales, particularmente la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} y en menor medida Mn, según las siguientes reacciones:



En los humedales aerobios las reacciones de oxidación son los mecanismos dominantes en la remoción de metales, que precipitan como óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos debido a la hidrólisis de Fe^{3+} , Al^{3+} y Mn^{4+} principalmente, aunque estas reacciones también generan acidez y se desarrollan a pH bajos.



Figura 6. Humedal aerobio (Pennsylvania, Estados Unidos).

En el diseño se tiene en cuenta el espesor de la lámina de agua, el tiempo de retención en el sistema, la composición del sustrato y el área superficial o superficie de oxidación del humedal (ver figura7); también se consideran los

aportes de agua al sistema (precipitaciones, escorrentías, etc.) y las descargas (infiltración, evapotranspiración, etc.). Además, el tipo de plantas se selecciona en función de las concentraciones y variedad de metales presentes en el influente. En algunos casos la mayor limitación de estos humedales es el requerimiento de grandes superficies de terreno, para lograr el mayor tiempo de retención del agua en el sistema y permitir la adsorción y el intercambio iónico, así como la oxidación y la precipitación de los metales.

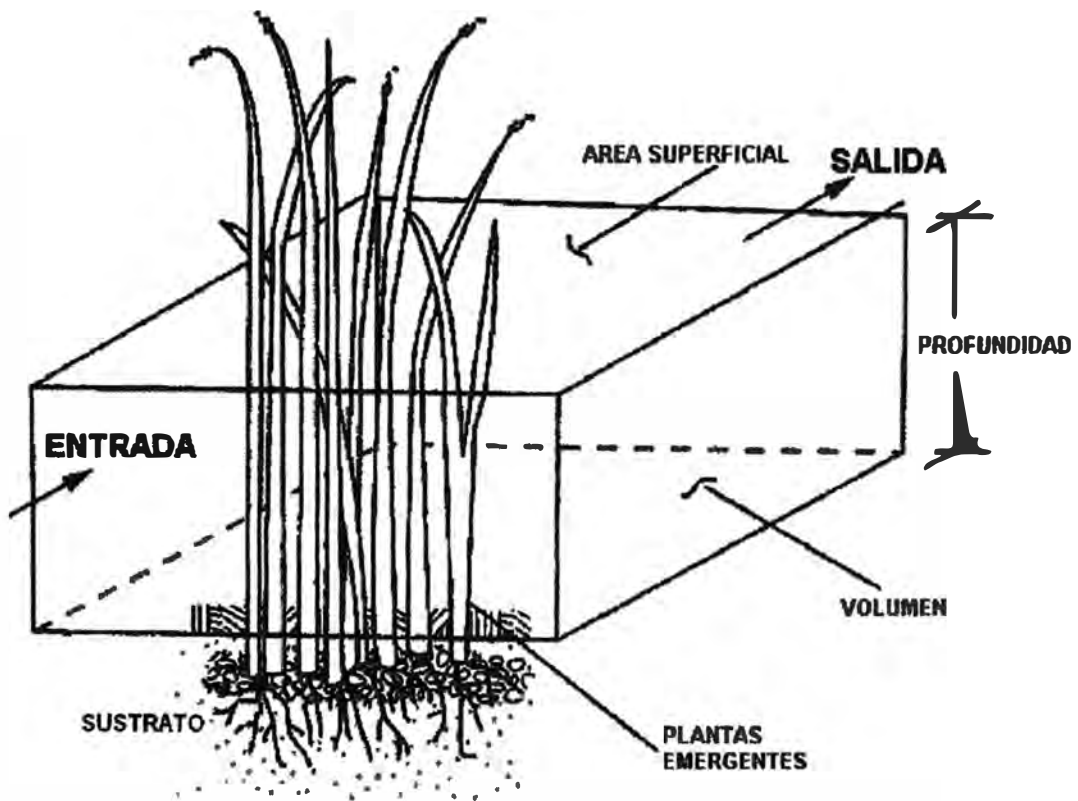


Figura 7. Variables que se consideran en el diseño de un humedal.

2.2.2.4 Humedales anaerobios

En este tipo de humedal (ver figura 9) el agua de mina fluye por gravedad y el incremento del pH hasta niveles cercanos al neutro se debe a la alcalinidad de los bicarbonatos que se generan en el sistema a partir de la reducción anaerobia del sulfato y la disolución de la caliza (CaCO_3), para evitar que se produzcan

procesos aerobios que desencadenen la generación de acidez metálica a través de la hidrólisis de algunos metales se recurre al pre-tratamiento del agua ácida con caliza en condiciones atmosféricas.

Para favorecer las condiciones anóxicas que se requieren para su correcto funcionamiento, la altura de la lámina de agua ha de ser superior a los 30 cm. Esta lámina cubre un sustrato permeable de un espesor de 30-60 cm formado mayoritariamente por material orgánico (70-90% de estiércol, compost, turba, heno, aserrín, etc.), que está entremezclado o bien dispuesto sobre una capa de caliza (ver figura 8). La finalidad del sustrato orgánico es eliminar el oxígeno disuelto, reducir el Fe^{3+} a Fe^{2+} , y generar alcalinidad mediante procesos químicos o con intervención de microorganismos. Sobre el conjunto de este sustrato se desarrolla la vegetación emergente característica de los humedales, la cual ayuda a estabilizar el sustrato además de aportar materia orgánica adicional.

Los elementos principales de un humedal anaerobio son:

- Vegetación emergente de alta productividad para reponer la materia orgánica consumida. Las plantas en el humedal ayudan a precipitar y filtrar elementos en suspensión, transfieren oxígeno a través de sus raíces a la zona anaerobia del sustrato (rizósfera) para oxidar metales tóxicos como el Pb que precipitan dentro del sustrato y evitar su absorción por las plantas, facilitar reacciones microbianas que incluyan nitrificación/denitrificación indispensables para la vida de las plantas.
- Sustrato rico en materia orgánica descompuesta (compost, turba, estiércol, otros) para iniciar y mantener los procesos de reducción de sulfato y eliminar el oxígeno disuelto para el agua. Además, la materia orgánica es una importante fuente de energía para el metabolismo microbiano.
- Altura de agua para mantener las condiciones anaerobias y facilitar el hábitat de las bacterias sulfato reductoras.

- Disponer de un sustrato en el lecho de humedal que aporte alcalinidad al medio (caliza machacada) y ayude a neutralizar el pH.

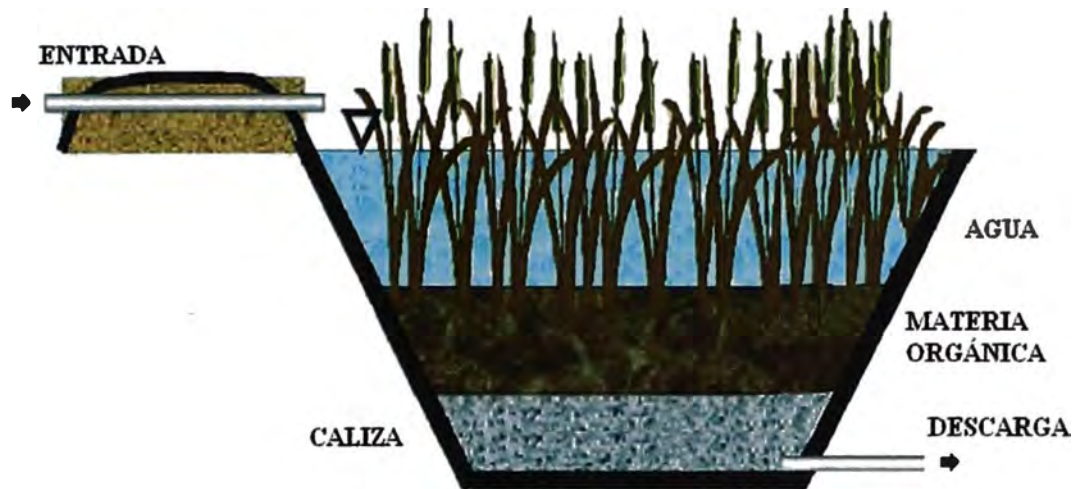


Figura 8. Representación esquemática de un humedal anaerobio.



Figura 9. Humedal anaerobio (Maryland, Estados Unidos).

Estos sistemas operan en permanente inundación, el agua fluye a través del sustrato orgánico. En este se desarrollan bacterias anaerobias sulfato-reductoras (ver figura 10) de las especies *Desulfovibrio* y *Desulfomaculum*, capaces de utilizar su reacción con la materia orgánica del sustrato y el sulfato disuelto en el agua intersticial como fuente de energía para su metabolismo.

Esta reducción bacteriana del sulfato genera ácido sulfhídrico y alcalinidad mediante las siguiente reacción (donde CH_2O es la representación genérica de la materia orgánica) [12], [5].

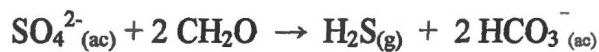
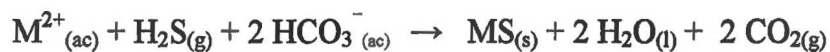
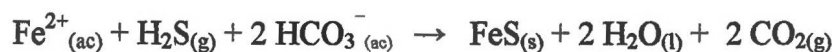


Figura 10. Bacteria anaerobia sulfato reductora.

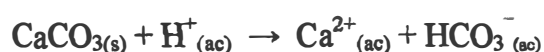
Las bacterias sulfato reductoras afectan directamente las concentraciones de metales disueltos, precipitándolos como sulfuros:



En el caso del hierro la reacción será:



Otra fuente de alcalinidad, también generada en el sustrato, es la disolución de la caliza al reaccionar con la acidez del influente.



El bicarbonato generado por la disolución de la caliza y/o la reducción bacteriana del sulfato neutraliza la acidez protónica del humedal mediante la siguiente reacción:



En menor medida la remoción de metales en humedales anaerobios también se puede producir mediante la bioacumulación por bacterias, algas y plantas. Algunos microorganismos tienen la habilidad de tomar metales y lo incorporan en su estructura celular. En cuanto a las plantas más empleadas destacan la Typha y el Sphagnum, aunque son algo ineficaces en la acumulación de metales si tienen alta tolerancia a vivir en medios ácidos, en el caso del Sphagnum la acumulación de Fe a niveles tóxicos le puede causar la muerte.

2.2.2.5 Drenaje anóxico calizo (ALD)

El drenaje anóxico calizo consiste en una capa de caliza recubierta por diferentes materiales (ver figuras 11 y 12), y añaden alcalinidad al agua de mina. Las condiciones anóxicas permiten que la disolución de la caliza pueda tener lugar sin que ésta se recubra por óxidos e hidróxidos de hierro. La finalidad del ALD es reducir la acidez mineral y generar alcalinidad.



Figura 11. Construcción de un drenaje anóxico calizo.

Los sistemas de drenaje anóxico calizo producen alcalinidad a un costo más bajo que los humedales. Sin embargo, no todas las aguas de mina son adecuadas para un tratamiento con este sistema. Los principales factores químicos que limitan la utilidad del ALD son la presencia de hierro férrico (Fe^{3+}), aluminio (Al) y oxígeno disuelto (OD). Cuando las aguas ácidas que contienen Fe^{3+} ó Al 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 el contrario no se ha determinado hidróxidos de aluminio recubriendo la caliza. La presencia de oxígeno en el agua provocará la oxidación de hierro ferroso a férrico dentro del sistema, y podrá entonces causar encostramiento. Mientras que el funcionamiento a corto plazo del drenaje anóxico calizo que recibe aguas de mina con elevados contenidos de Fe^{3+} , Al ó OD puede ser espectacular por la alta eliminación de metales, su funcionamiento a largo plazo es más cuestionable.

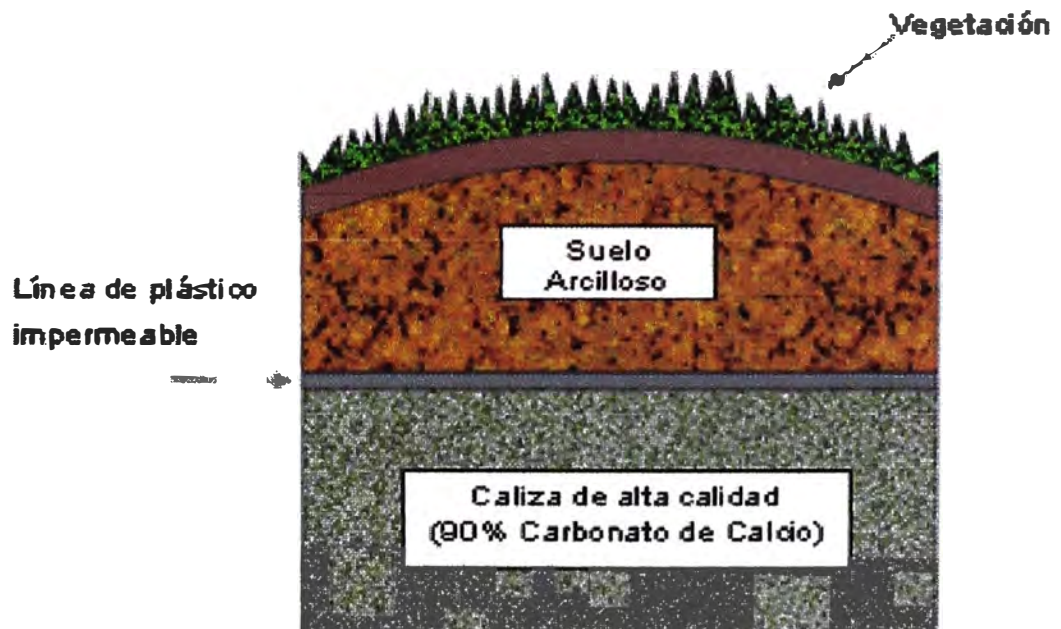


Figura 12. Sección transversal de un drenaje ácido calizo.

Las aguas de mina que contienen concentraciones muy bajas de OD, Fe^{3+} , y Al ($< 1 \text{ mg/L}$) serían las ideales para utilizar el tratamiento con ALD. Cuando

las concentraciones de estos parámetros sobrepasan 1 mg/L, el riesgo de que este sistema falle prematuramente, aumenta.

2.2.3 Metodología de sistemas de tratamiento pasivo

Por lo general, el tratamiento de aguas ácidas de mina se basa en procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales o ciénagas naturales, en donde se promueve la formación de especies insolubles que precipiten y se favorece la neutralización del agua. Para ello se recurre al uso de materia alcalino para neutralizar la acidez, al empleo de plantas (*Typha*) que promueven captura de metales como nutrientes, y de bacterias para catalizar las reacciones y acelerar los procesos que forman precipitados.

En la práctica existe un cierto solapamiento de los rangos de aplicación de cada tratamiento pasivo y generalmente se requiere el empleo combinado de dos o más métodos para tratar un determinado tipo de agua (ver figura 13).

En general los humedales aerobios pueden tratar aguas con alcalinidad neta, los drenajes anóxicos calizos tratan aguas con bajos contenidos de Al, Fe y oxígeno disuelto, y los humedales anaerobios (balsas orgánicas) pueden tratar aguas con acidez neta y elevadas concentraciones de Al, Fe^{3+} y oxígeno disuelto.

Los drenajes de mina tipificados como netamente alcalinos se tratan directamente en un humedal aerobio al no ser necesarios incrementar su alcalinidad. Las aguas netamente ácidas con oxígeno disuelto alto (> 5 mg/L) y contenidos de Fe^{3+} y Al superiores a 1 mg/L se tratan directamente en una balsa orgánica seguido de un humedal aerobio.

Las aguas netamente ácidas con oxígeno disuelto por debajo de 2 mg/L, bajos contenidos de Fe^{3+} y Al (< 1 mg/L) y con cantidades de Fe^{3+} inferiores al 10% total, se tratan en primer lugar con un drenaje anóxico calizo (ALD), seguido a continuación, en función a su acidez, con un humedal aerobio si esta es baja (< 300 mg/L), o con una balsa orgánica si esta supera los 300 mg/L

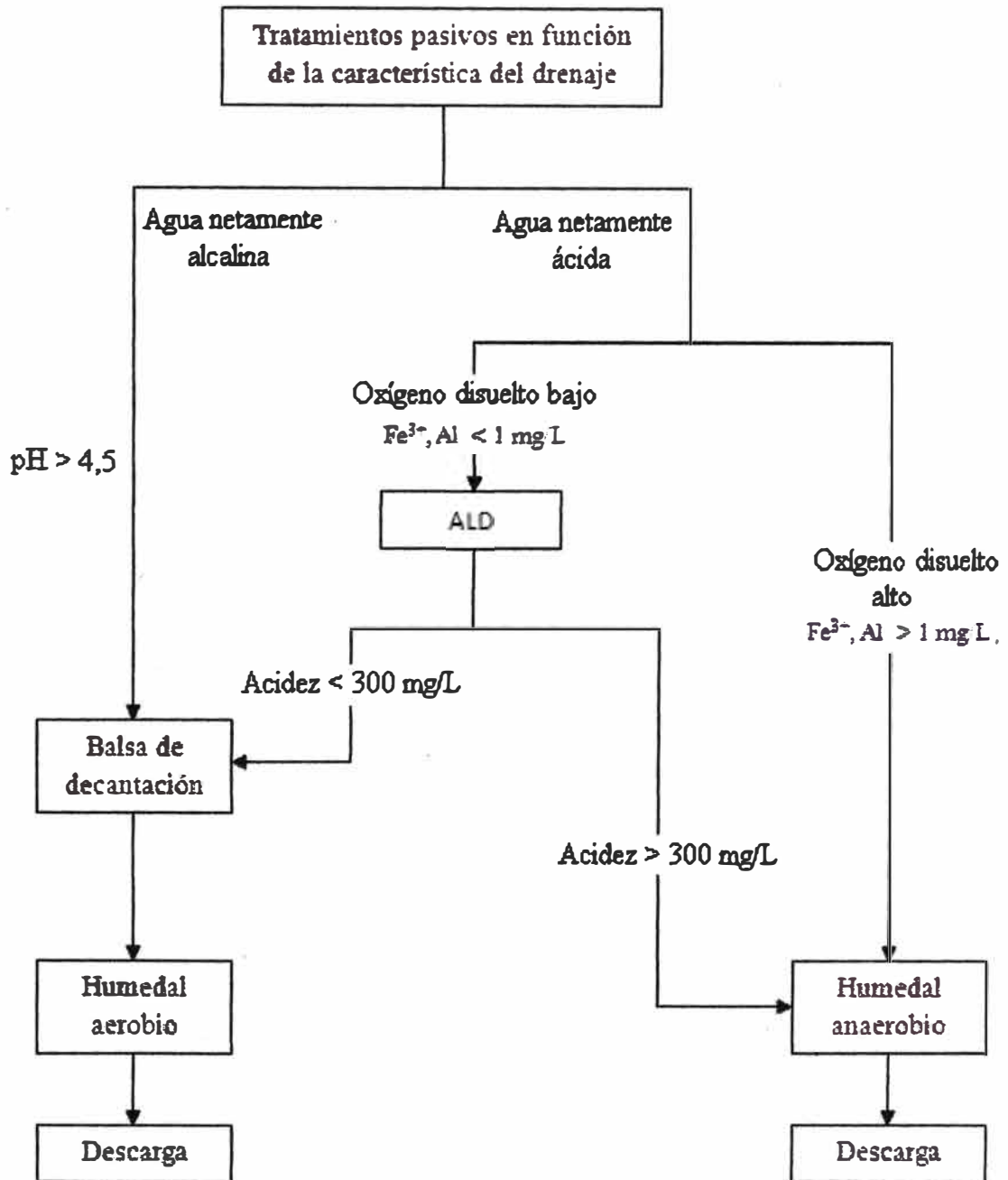


Figura 13: Sistemas de tratamiento pasivo en función de las características del drenaje de mina

2.3 Legislación ambiental

A nivel nacional la protección de los cuerpos de aguas en todos sus estados físicos están normados por:

- ❖ Ley general de aguas, Decreto Ley N° 17752
- ❖ Decreto Supremo N° 007-83-SA (el cual modifica los artículos 81° y 82° del reglamento de los títulos I, II y III de la Ley General De Aguas), que establece los tipos y valores límites con la finalidad de preservar los cuerpos de aguas del país, acorde con la clasificación respectiva (clases I, II, III, IV, V y VI). Se aplica como referencia para los cuerpos receptores.
- ❖ Los tipos de aguas según el artículo 81° de la Ley General De Aguas son:
 - I. Aguas de Abastecimiento doméstico con simple desinfección.
 - II. Aguas de abastecimientos domésticos con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y cloración, aprobados por el Ministerio de Salud.
 - III. Aguas para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales.
 - IV. Aguas de zonas recreativas de contacto primario (baños y similares).
 - V. Aguas de zonas de pesca de mariscos bivalvos..
 - VI. Aguas de zonas de Preservación de Fauna Acuática y pesca Recreativa o comercial

El ministerio de energía y minas, desde 1992 emitió normas legales a fin de proteger las aguas, consideradas como un componente principal del Medio Ambiente y en 1996 aprobó la Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM, Niveles Máximos Permisibles (NMP) de emisión de efluentes líquidos para las actividades Minero Metalúrgicas. De acuerdo a la Ley General del Ambiente se denomina Límites Máximo Permisibles (LMP).

Los LMP tienen por finalidad:

- Establecer las concentraciones máximas de metales pesados u otros parámetros (Cianuro total, pH y sólidos totales en suspensión) en las descargas de efluentes líquidos en la operación minera.
- El incumplimiento de los LMP es sancionable por el ente fiscalizador.

En la siguiente tabla se muestran los Niveles máximo permisibles de emisión para las unidades minero metalúrgicas Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM.

Tabla 3: Niveles máximo permisibles de emisión para las unidades minero metalúrgicas.

Parámetro	Valor en cualquier momento	Valor promedio anual
pH	Mayor que 6 y menor que 9	Mayor que 6 y menor que 9
Fierro (mg/L)	2.0	1.0

3. DESARROLLO DEL TEMA

En la naturaleza, los sulfuros permanecen en el subsuelo en ausencia de oxígeno y sólo una pequeña parte de estos depósitos aflora a la superficie. El drenaje se forma cuando los minerales que contienen azufre, principalmente la pirita (FeS_2), se ponen en contacto con la atmósfera, produciendo su oxidación y formando ácido sulfúrico y hierro disuelto. Algunas veces los minerales tienen la capacidad de neutralizar la acidez debido a su contenido de caliza como ocurre en el caso de estudio, teniéndose un pH cercano al neutro.

En el caso en estudio el drenaje minero se ingresa a una planta de tratamiento en donde mediante la adición de cal y floculantes se logra que parte del hierro precipite como hidróxido, pero el problema es que a pesar del tratamiento, el agua contiene todavía hierro disuelto que hasta el momento no se ha podido eliminar ni disminuir su concentración hasta los límites máximos permisibles estipulados en la legislación.

El agua que se libera de esta planta debe cumplir el límite máximo permisible por la ley general de aguas, clase III DS 007-83-SA la cual se destina para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales, y los niveles máximos permisibles de la Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM.

El muestreo de las aguas se realiza tanto a la entrada de la planta de tratamiento como a la salida, pero la medición del hierro en la entrada no se realiza, este análisis solo se hace a la salida de la planta de tratamiento observándose que la concentración de hierro está por encima del nivel máximo permisible que según la Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM es 2 mg/L, para ello es necesario encontrar un método de tratamiento idóneo para disminuir la concentración de hierro en el agua, lo cual se realizará a partir de un proceso de selección de un serie de alternativas, considerándose la opción más viable.

3.1 Análisis de las aguas de mina

Los análisis a la salida de la planta de tratamiento se reportan en las siguientes tablas:

Tabla 4: Análisis de las aguas de mina para el primer trimestre del 2009

PARÁMETROS	MESES			LMP	NMP VCM
	Ene-09	Feb-09	Mar-09	LGA III	
Caudal (m ³ /día)	363,7	1671,8	2076,1		
pH	6,09	7,08	8,12		6 - 9
Temperatura °C	9,6	9,8	8,6		
Sólidos Suspendidos (mg/L)	28	23	17,2		50
Plomo Total (mg/L)	0,06	<0,02	0,66	0,1	0,4
Cobre Total (mg/L)	<0,02	0,04	0,03	0,5	1,0
Zinc Total (mg/L)	2,31	1,52	1,11	25	3,0
Hierro Total (mg/L)	10,60	7,90	8,21		2,0
Arsénico Total (mg/L)	0,018	0,009	0,015	0,2	1,0
OD (mg/L)	5,64	4,99	4,89	3	
Cadmio Total (mg/L)	0,012	0,011	0,011	0,05	

Tabla 5: Análisis de las aguas de mina para el segundo trimestre del 2009

PARÁMETROS	MESES			LMP	NMP VCM
	Abr-09	May-09	Jun-09	LGA III	
Caudal (m ³ /día)	1338,3	1193,1	5072		
pH	7,05	7,1	7,35	5 - 9	6 - 9
Temperatura °C	9,4	8,2	11,80		
Sólidos Suspendidos (mg/L)	23,57	64	26,00		50
Plomo Total (mg/L)	11,35	0,36	0,02	0,1	0,4
Cobre Total (mg/L)	0,20	<0,02	<0,02	0,5	1,0
Zinc Total (mg/L)	13,46	1,87	1,40	25	3,0
Hierro Total (mg/L)	18,94	9,96	17,93		2,0
Arsénico Total (mg/L)	0,3480	0,0092	0,0131	0,2	1,0
OD (mg/L)	4,9	4,96	4,07	3	
Cadmio Total (mg/L)	0,065	0,009	<0,003	0,05	

Tabla 6: Análisis de las aguas de mina para el tercer trimestre del 2009

PARÁMETROS	MESES			LMP	NMP VCM
	Jul-09	Ago-09	Sep-09	LGA III	
Caudal (m ³ /día)	1497,6	1281	1065		
pH	7,27	6,92	7,30	5 - 9	6 - 9
Temperatura °C	13,05	12,6	131,00		
Sólidos Suspendidos (mg/L)	48	47	27,00		50
Plomo Total (mg/L)	<0,02	0,062	0,208	0,1	0,4
Cobre Total (mg/L)	<0,02	0,100	0,330	0,5	1,0
Zinc Total (mg/L)	1,50	6,826	22,970	25	3,0
Hierro Total (mg/L)	16,62	18,150	22,280		2,0
Arsénico Total (mg/L)	0,0075	0,022	<0,003	0,2	1,0
OD (mg/L)	3,76	3,50	3,67	3	
Cadmio Total (mg/L)	<0,003	0,0275	0,1120	0,05	

LMP LGA III: Límite máximo permisible de la Ley General de Aguas clase III DS 007-83-SA

NMP VCM: Nivel máximo permisible, valor en cualquier momento según la Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM

Los análisis a la entrada de la planta de tratamiento reportan lo siguiente:

Tabla 7: Análisis de las aguas de mina a la entrada de la planta de tratamiento

	Ene-09	Feb-09	Mar-09	Abr-09	May-09	Jun-09	Jul-09	Ago-09	Sep-09
pH	5,06	7,4	7,37	5,03	7,7	7,21	7,99	7,24	7,91
OD mg/L	5,76	4,07	4,04	5,71	4,81	4,03	3,82	3,64	3,78

De los análisis reportados del agua de mina se puede notar que se trata de un agua alcalina debido a que su pH es casi neutro, se considera agua alcalina cuando $\text{pH} > 4,5$ [16], siendo el pH más bajo reportado a la entrada de la planta de tratamiento con cal y floculantes de 5,03 en el mes de abril.

No se cuentan con datos de la concentración de Fe a la entrada de la planta de tratamiento con cal y floculantes debido a que actualmente la empresa no realiza dicho análisis.

3.2 Planteamiento de la solución

3.2.1 Selección del sistema de tratamiento

Los sistemas pasivos pueden ser implementados como una solución para el drenaje minero a un costo menor que los tratamientos activos.

Los sistemas pasivos pueden proveer un tratamiento que mejorará enormemente la calidad de las corrientes de salida, o disminuirá considerablemente los costos de un tratamiento activo. En relación con los tratamientos activos químicos los sistemas pasivos requieren un mayor tiempo de retención y un espacio mucho más grande, pero disminuirán marcadamente los costos a largo plazo. Además las sustancias propuestas por los tratamientos pasivos no conllevan peligro alguno para el medio ambiente a diferencia de las sustancias utilizadas en los procesos activos.

Al analizar las variables críticas anteriormente expuestas para los tratamientos activos, el panorama no es muy auspicioso, ya que el hecho de tener que utilizar eventualmente energía eléctrica, hace pensar que los costos serán excesivos, y con lo que se volvería a incurrir en peligros, esta vez asociados con la manipulación de la electricidad, además que se necesitaría de un terreno no muy alejado ya que se debe tener un acceso periódico al lugar donde se instale el tratamiento para llevar los diferentes insumos necesarios.

Dadas sus exigencias de costos y mantenimiento constante, los tratamientos activos o puramente químicos, no serían los más aconsejables.

En cuanto a la opinión pública, el uso de tratamientos pasivos es mucho más aceptado que los productos químicos, ya que se producen reacciones

naturales sin el inconveniente de que se produzcan problemas mayores por una mala dosificación. En adición, desde el punto de vista paisajístico, los sistemas pasivos son muchos más agradables a la vista que un sistema de tratamiento activo.

Con lo anterior se pueden descartar los tratamientos activos en función de su costo y peligros siendo los sistemas de tratamiento pasivos las mejores alternativas a considerar.

A continuación se hace la selección del sistema de tratamiento pasivo idóneo, en función de las características del agua de mina, teniendo como alternativas la posibilidad de usar un drenaje anóxico calizo (ALD), un humedal anaerobio o finalmente un humedal aerobio:

- Drenaje anóxico calizo (ALD): Se recomienda usar ALD en aguas con bajo contenido de oxígeno disuelto (OD debajo de 2 mg/L), en el caso en estudio el contenido de oxígeno disuelto más bajo reportado es 3,5 mg/L en el mes de Agosto del 2009 superando al mínimo recomendado para el ALD, debido a lo cual este método no sería el más idóneo de utilizar.
- Humedal anaerobio: Este sistema de tratamiento es más adecuado para aguas netamente ácidas, al ser el agua del caso en estudio alcalina este sistema no sería conveniente.
- Humedal aerobio: Los humedales aerobios son recomendados para el tratamiento de aguas de mina netamente alcalinas, al tener las aguas en estudio esta característica este será el método seleccionado para el tratamiento del drenaje minero.

Después de la selección de un sistema pasivo consistente en un humedal aerobio, es conveniente conocer cuáles son sus ventajas y desventajas.

Ventajas

- Simplicidad en la operación.
- Su costo de construcción, operación y mantenimiento es menor.
- El aporte de oxígeno es espontáneo.
- Bajo impacto ambiental sonoro.
- Crean zonas aptas para potenciar la vida salvaje.
- Baja producción de residuos durante la operación del sistema.

Desventajas

- No pueden ser alimentados directamente con aguas residuales que presenten altas cargas de sólidos suspendidos. Requieren pretratamientos, al menos para eliminar un exceso de sólidos suspendidos que podría reducir la vida útil del humedal.
- Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema.
- No pueden ser construidos en lugares donde el terreno tiene un alto costo, debido a que se necesitan grandes áreas para este sistema de tratamiento.
- Los humedales aerobios no son aptos para tratar aguas netamente ácidas.

3.2.2 Diseño básico del sistema de tratamiento

La alternativa seleccionada para el tratamiento del drenaje minero como se expuso anteriormente será un humedal aerobio (ver figura 14), para el diseño de dicho sistema será necesario tener en cuenta una serie de fases que se muestran a continuación:

- Definición de los objetivos de tratamiento: Antes de desarrollar las posibilidades de tratamiento es importante fijar los objetivos finales de calidad que se pretenden, en función de parámetros como el pH, concentración de determinados iones y de los contaminantes objetos de

estudio. Estos objetivos se establecen generalmente en función de la legislación de aguas vigente. En el caso de estudio el objetivo es disminuir la concentración de hierro por debajo de 2 mg/L, valor exigido por la legislación peruana.

- **Caracterización del agua a tratar:** El objetivo es en este caso tener un conocimiento profundo sobre el caudal medio de la solución a tratar, así como de la composición química de la misma, al menos con respecto de a los principales elementos que se pretende eliminar. En el presente caso se cuenta con los flujos y análisis del agua a lo largo de los tres primeros trimestres del año 2009 (ver tablas 4, 5 y 6).
- **Dimensionamiento:** Para dimensionar el sistema de tratamiento se aplican los criterios más adecuados en función del tipo de agua y de los objetivos que se hayan definido para el tratamiento, esto suele hacerse considerando criterios de eliminación del contaminante.
- **Selección del tiempo de retención del agua en el sistema:** Es un factor crítico ya que tiempos de retención demasiados cortos pueden inhibir la degradación de algunos contaminantes, mientras que tiempo de retención demasiados largos pueden dar lugar a un estancamiento.
- **Seguimiento y control:** Es conveniente contrastar los resultados obtenidos con las expectativas del tratamiento sobre la que se haya basado el diseño del sistema, para verificar su adecuado funcionamiento y detectar posibles fallos y/o cambios en la composición química del agua a tratar. Para ello deben tomarse muestras de agua en puntos representativos y proceder a su análisis, siempre que sea posible. Como mínimo, deberían situarse puntos de toma de muestra a la entrada y salida del sistema de tratamiento.

Para la depuración de las aguas procedentes del drenaje minero mediante un humedal aerobio, se propone el siguiente esquema en la figura 14.

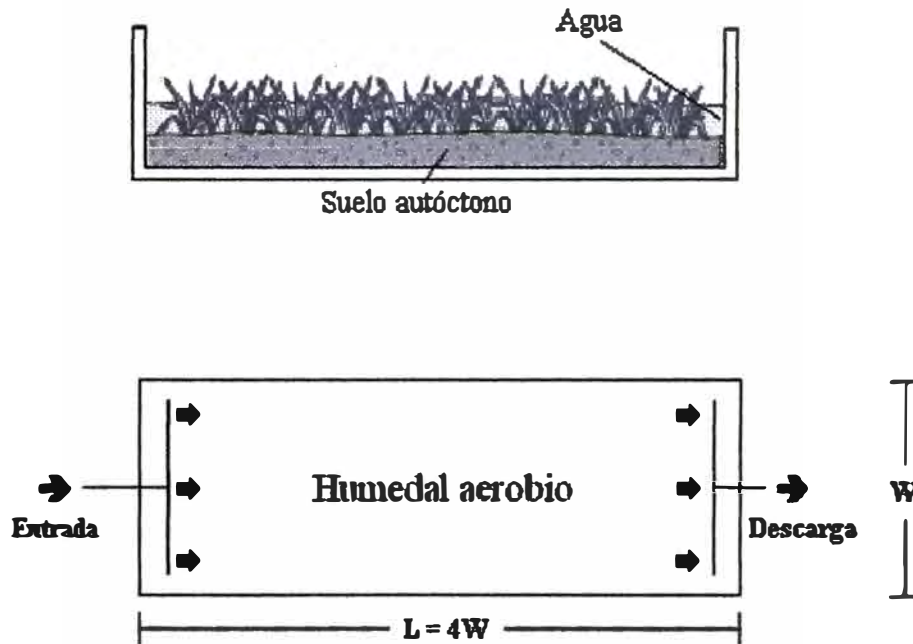


Figura 14: Representación esquemática del sistema pasivo propuesto.

El humedal consiste en una balsa con una relación largo ancho de 4:1 y un metro de profundidad. La base es aproximadamente horizontal recomendándose una pendiente del 1% para asegurar el drenaje [3]. La celda debe tener su base y laterales impermeabilizado para ello se puede usar una lámina de polietileno de alta densidad. Para evitar perforaciones en dicha membrana, se dispondrá entre esta y el terreno una capa de arena cubierta con un geotextil.

El sistema de entrada debe de estar diseñado de tal manera que la distribución en el afluente sea adecuada y el agua fluya uniformemente a lo largo de la zona de entrada (evitando que se concentre el flujo en una zona única). El quipo característico que se utiliza para la distribución del afluente consta de una tubería de entrada y una tubería perforada. Los hoyos del tubo deben ser espaciados uniformemente siendo del mismo tamaño y forma. Se recomienda que

los primeros 50 cm de la entrada estén llenos con grava (60 a 100 mm) para reducir la obstrucción (ver figura 15).

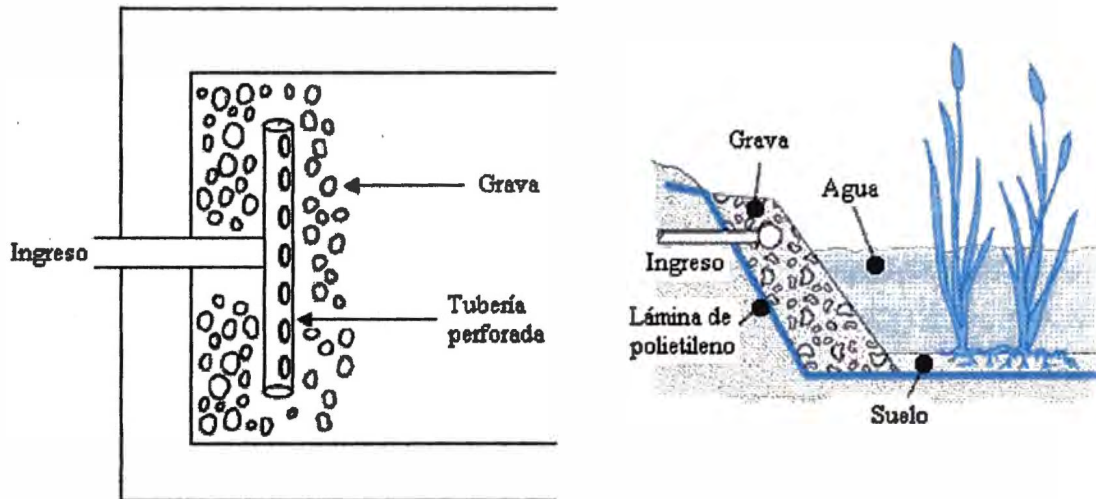


Figura 15 . Diagrama de una entrada que utiliza tubo de PVC perforado debajo de una cama de grava

La estructura de salida consistirá en una caja de concreto con una tubería instalada de forma vertical, para regular el nivel de agua en el humedal(ver figura 16). La tubería vertical va conectada en la parte inferior a una tubería horizontal que se ubica a lo ancho, y al fondo del humedal, tubería que esta perforada de la misma manera que el sistema de entrada (logrando así la salida de agua del humedal).

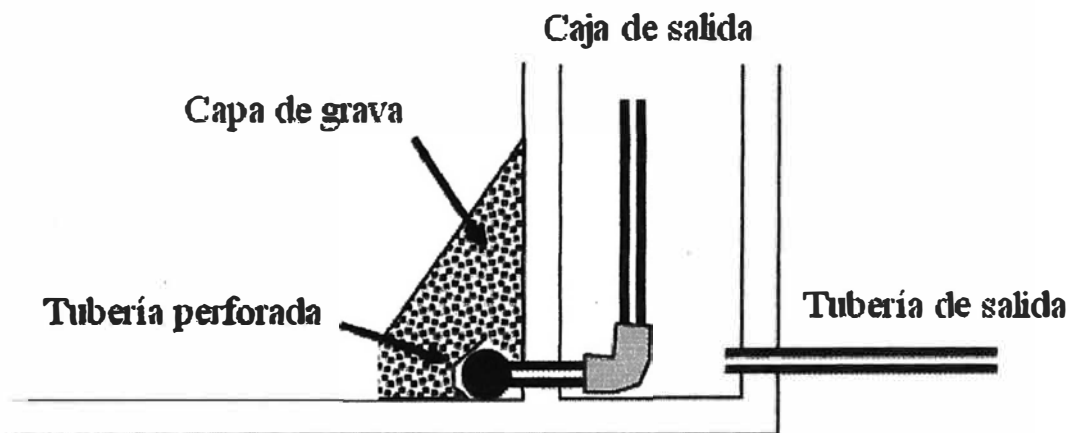


Figura 16 . Estructura de salida

El sustrato para el humedal estará compuesto de suelo autóctono que permita el desarrollo de vegetación, para ello en el momento de la excavación para la construcción del humedal se debe reservar el terreno correspondiente a la cubierta vegetal.

En lo concerniente a la vegetación, las espadañas (*Thypha latifolia*) forman la base en la mayoría de humedales que se construyen. Como acompañantes se ha comprobado que dan buenos resultados otras plantas palustres como los carrizos (*Phragmites* sp.), diversos tipos de juncos (*Juncos* sp., *Scirpus holoschoenus*) y el falso lirio (*Iris pseudocorus*), que también son resistentes a condiciones anómalas de pH y poseen alta capacidad de regeneración [17].

3.2.2.1 Dimensionamiento del humedal aerobio

Para el dimensionado de un humedal aerobio, la principal variable a tener en cuenta es la carga metálica (q) que lleva un agua de mina a tratar, se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$q = Q(\text{L/min}) \times C_m(\text{mg/L}) \times (1 \text{ g}/10^3 \text{ mg})(1440 \text{ min/día}) = 1,44 \times Q \times C_m \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

q : Carga metálica (g/día)

Q : Caudal del agua a tratar (L/min)

C_m : Concentración del metal contaminante (mg/L)

El criterio más utilizado para determinar la superficie mínima de un humedal aerobio se determina en función a la eliminación de hierro por unidad de superficie y día [12], [5], [16].

Eliminación de hierro: 10 a 20 g/m².día

Para el dimensionamiento del humedal aerobio en el caso de estudio se considera para la eliminación de hierro 10 g/m².día. El cálculo del área será mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Área (m}^2\text{)} = q \text{ (g Fe/día)} / 10 \text{ (g/m}^2\text{.día)} \quad (\text{Ec.4})$$

El caudal máximo registrado durante los tres primeros trimestres del año 2009 es de 2076,1 m³/día (ver tablas 4, 5 y 6), para el dimensionamiento del humedal diversos autores [11] recomiendan un factor de seguridad entre el 15 al 25% para evitar una inusual sobrecarga en el flujo, para el presente caso se considera un valor intermedio del 20% sobre el caudal máximo.

$$Q = 1,2 \times 2076 \text{ m}^3/\text{día} = 2491,2 \text{ m}^3/\text{día} \text{ (1730 L/min)}.$$

Para la concentración del hierro se tomará el máximo valor reportado durante los tres primeros trimestres del año 2009, el cual es 22,28 mg/L durante el mes de septiembre.

A continuación se calcula el área del humedal aerobio para el caso en estudio. Primero mediante la ecuación 3 se calcula la carga metálica de Fe, después usando la ecuación 4 se calcula el área del humedal.

Cálculo de la carga de hierro (g/día):

$$q = 1,44 \times Q \times C_m$$

Donde: $Q = 1730 \text{ L/min}$ $C_m = 22,28 \text{ mg/L}$

Reemplazando en la ecuación

$$q = 1,44 \times 1730 \times 22,28 \quad q = 56799,36 \text{ g/día}$$

Cálculo del área del humedal (m²):

$$A = q/10$$

Reemplazando en la ecuación

$$A = 56799,36 / 10 \quad A = 5679,936 \text{ m}^2 = 0,57 \text{ ha}$$

Para calcular el largo y ancho es aceptable relaciones desde 1:1 hasta 3:1 o 4:1 [11]. Para nuestro caso se erigirá la relación largo ancho de 4:1 por ser una de las relaciones más recomendadas por los autores.

Cálculo del largo y del ancho del humedal.

Ancho: W Largo = L

$L = 4W$ (Relación largo ancho de 4:1)

Área = Largo x Ancho

Reemplazando:

$$5679,936 \text{ m}^2 = (4W) \times (W) \quad W = 36,47 \text{ m}$$

De donde se tiene:

$$\text{Ancho} = 37,68 \text{ m} \quad \text{Largo} = 150,73 \text{ m}$$

El tiempo de retención teórico (t) de permanencia o de tratamiento en el humedal [7], se define como:

$$t = (A \cdot h \cdot p) / Q \quad (\text{Ec.5})$$

Donde:

t: Tiempo de retención teórico (días)

A: Área superficial del humedal (m^2)

Q: Caudal medio que pasa a través del humedal ($\text{m}^3/\text{día}$)

h: Altura de la lámina de agua (m)

p: Porosidad del medio

El caudal medio se calcula como la semisuma del caudal de entrada y de salida del humedal, esto se hace para compensar las pérdidas o ganancias de aguas a través de infiltración o precipitación. Es razonable asumir condiciones de flujo estable en diseños preliminares de tal manera que: $Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{salida}}$

La porosidad se refiere al espacio utilizado por el agua para atravesar el humedal. En los humedales aerobios la vegetación y las plantas secas ocupan un espacio, la porosidad es un porcentaje y se expresa en forma decimal. Se recomienda usar para la porosidad valores que se encuentran entre 0,65 y 0,75. Para el caso en estudio se considera $p=0,65$.

En un humedal aerobio recordar que la altura de lámina de agua no debe de ser mayor de 30 cm ni menor de 10 cm, para el diseño del humedal se considera 25 cm (0,25 m) para la altura de la lámina de agua.

Cálculo del tiempo de retención:

$$t = (A \cdot h \cdot p) / Q$$

Reemplazando:

$$t = (5679,936 \times 0,25 \times 0,65) / 2491,2 \quad t = 0,37 \text{ días} = 8,89 \text{ h}$$

Los resultados del dimensionamiento del humedal se muestran en la siguiente tabla:

[Fe] (mg/L)	Q (L/min)	Carga de hierro (g/día)	Área (ha)	Largo (m)	Ancho (m)	Tiempo de retención (h)
22,28	1730	56799,36	0,57	150,7	37,98	8,89

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Las descargas relacionadas con la minería metálica constituyen la principal causa de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas del mundo, liberándose en este proceso principalmente grandes cargas de hierro y otros metales que pueden tener impactos dramáticos en el medio ambiente. Actualmente son numerosas las alternativas de tratamiento que existen para evitar estos daños.
- La selección de un sistema de tratamiento pasivo depende de las características del drenaje minero.
- Según las comparaciones, la mejor alternativa para eliminar el hierro del drenaje minero es mediante un humedal aerobio.
- Los humedales artificiales son una tecnología viable para el tratamiento eficaz de drenajes mineros a largo plazo siendo su principal ventaja su bajo coste de construcción y mantenimiento, por ello pueden llegar a tener un gran futuro en países en vías de desarrollo como el Perú.
- La principal desventaja de un humedal artificial es su alto requerimiento de terrenos en comparación con los tratamientos convencionales, pudiendo limitar su uso en lugares donde los precios de terrenos son muy altos o exista poca disponibilidad de estos.

Recomendaciones

- Ubicar el humedal fuera de llanuras inundables.
- El nivel freático deberá estar a un mínimo de 0,3 – 0,6 m por debajo de la cuota base del humedal.
- El fondo del humedal debe ser nivelado de lado a lado y en la totalidad de su longitud.
- Establecer vegetación arbustiva en torno del humedal y evitar los grandes árboles.

- Evitar en la morfología del humedal ángulos rectos (se crean zonas donde apenas hay flujo).
- Distribuir el influente lo más uniformemente posible a través del ancho del humedal.
- Introducir en el humedal plantas insectívoras o peces para reducir los mosquitos.
- Evitar los humedales con monocultivos por que pueden ser devastados por insectos, por ello es aconsejable utilizar diferentes tipos de plantas para minimizar tales problemas.
- Aunque la siembra de las plantas del humedal se puede hacer por semillas, este método requiere bastante tiempo (por la obtención y desarrollo de la semilla), por lo que lo más aconsejable es plantar a partir del trasplante de rizomas.
- Evitar el uso de herbicidas para no dañar la vegetación emergente.
- Mantener un crecimiento vigoroso de la vegetación no permitiendo el crecimiento de otro tipo de estas.
- Remover periódicamente las plantas muertas para evitar impactos adversos en la calidad del agua.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Costello, C. Acid Mine Drainage: Innovative Treatment Technologies. National Network of Environmental Management Studies. 2003, pp.3.
- [2] EPA. Manual Constructed Wetlands Treatment of municipal Wastewaters. 1999, pp. 124.
- [3] EPA. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial. 2000, EPA 832-F-00-024.
- [4] Guía Ambiental para el manejo de Drenaje Acido de Minas : Ministerio de Energía..y Minas , Perú. 1993, pp. 3.
- [5] Hedin, R., Narin, R. Passive Treatment of coal mine drainage. Bureau of mines, information circular. 1994, IC 9389, PP 27.
- [6] Robert H. Kadlec, Robert L Knight. Treatment Wetlands. CRC Press LLC. U.S.A. 1996. PP, 4, 5, 49, 55.
- [7] López, E., Aduvire, O. y Baretino,D. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectiva de futuro. Boletín Geológico y minero. 2002, 113(1), pp. 4.
- [8] Nina Chambe Neyla. Evaluación de los métodos químicos y biogénico para el tratamiento del drenaje ácido de mina a escala de laboratorio. Universidad Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Unidad de Postgrado.
- [9] Norstrom, K. y Alpers, C. Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the iron Mountain superfund

- site, California. Proc. Natural Academy Science. USA. 1999, Vol 96, pp .3455.
- [10] Rodríguez, C. Humedales construidos, Estado del arte (II). Ingeniería hidráulica y ambiental, 2003, vol XXIV, No 3, pp. 44.
- [11] Reed, S., Crites, R., Middlebrooks, E. Natural Systems for Waste Management and Treatment. Segunda edición, Mc Graw Hill, U.S.A. 1995, PP. 203.
- [12] Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R., Hellier, W and members of the Avoidance and Remediation Working Group. Handbook of Technologies for Avoidance and Remediation of Acid Mine Drainage. The National Mine Land Reclamation Center at West Virginia University. 1998, pp 100.
- [13] The Interstate Technology & Regulatory Council Wetlands Team. Technical and Regulatory Guidance Document for constructed treatment Wetlands, 2003, pp. 77.
- [14] USDA-Natural Resources Conservation Service and the US Environmental Protection Agency-Region III. A Handbook of Constructed Wetlands. Vol I, pp.21.
- [15] USDA-Natural Resources Conservation Service and the US Environmental Protection Agency-Region III. A Handbook of Constructed Wetlands. Vol IV, pp.5.
- [16] Watzlaf, G., Schroeder, K., Kleinmann, R., Kairies, C and Naim , R. The passive treatment of coal mine drainage. U.S. Department of Energy, University of Oklahoma. 2004, pp. 55.

- [17] Younger, P.L., Banward, S.A., Hedin, R.S. Mine Water Hydrology, Pollution, Remedation. Kluwer Academic Publishers. U.S.A. 2002, pp 351.

6. APÉNDICE

GLOSARIO

Adsorción: Proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material.

Agua superficial: Agua que se encuentra circulando o en reposo sobre la superficie de la tierra, forma ríos, lagos, lagunas, pantanos, humedales, y otros similares.

Avifauna: Conjunto de especies de aves que habitan una determinada región.

Bioacumulación: Proceso de acumulación de sustancias químicas en organismos vivos.

Caudal: Cantidad de fluido que avanza en una cantidad de tiempo.

Catálisis: Proceso por el cual se aumenta o disminuye la velocidad de una reacción química.

Coprecipitación: Precipitación simultánea de dos o más sustancias.

Compost: Abono hecho mediante la degradación controlada de materia orgánica vegetal y animal. El proceso es desarrollado por bacterias del suelo que mezcladas con basura y desperdicios degradables, convierten dicha mezcla en fertilizantes orgánicos.

Efluente: Se refiere a la descarga de residuos líquidos, generalmente contaminantes, provenientes desde una industria u otro recinto.

Escorrentía: Conjunto de aguas que se desplaza por la superficie terrestre gracias a la fuerza de gravedad.

Evapotranspiración: Pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.

Floculación: Proceso mediante el cual, con la adición de sustancias floculantes se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación.

Geotextil: Material sintético plano formado por fibras poliméricas (polipropileno, poliéster o poliamidas), similar a una tela, de gran deformabilidad, empleada para

obras de ingeniería en aplicaciones geotécnicas (en contacto con tierra y rocas), cuya función es hacer las funciones de separación ó filtración, drenaje, refuerzo o impermeabilización.

Hábitat: Lugar donde habita una especie o comunidad, y que le proporciona un conjunto de condiciones medio ambientales específicas.

Lixiviado: Líquido producido cuando el agua percola a través de cualquier material permeable.

Nivel freático: Zona bajo la superficie del suelo, correspondiente al nivel superior de saturación del agua subterránea en las rocas permeables.

Pirita: Mineral sulfuroso cuya fórmula química es FeS_2

Percolación: Se refiere a la infiltración a través de finas cavidades (poros), por ejemplo el agua a través de la roca.

Plantas palustres: Plantas que viven en charcos y pantanos.

Rizoma: Tallo subterráneo con varias yemas que crece de forma horizontal emitiendo raíces y brotes herbáceos de sus nudos.

**APRUEBA LOS NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA
EFLUENTES LIQUIDOS PARA LAS ACTIVIDADES MINERO –
METALÚRGICAS**

Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996)

Artículo 1° .- Aprueba los Niveles Máximos Permisibles para Efluentes Líquidos

Aprobar los Niveles Máximos Permisibles para efluentes líquidos minero-metalúrgicos.

Artículo 2° .- Niveles Máximos Permisibles

Los Niveles Máximos Permisibles a los cuales se sujetarán las Unidades Minero-Metalúrgicas están señalados en el Anexo 1. Las Unidades Mineras en Operación y aquéllas que reinician sus operaciones podrán sujetarse a lo señalado en el Anexo 2, siguiendo lo establecido en el Decreto Supremo N° 016 -93-EM. Estos Anexos forman parte de la presente Resolución Ministerial.

Artículo 3°.- Ajuste gradual de los valores contemplados en el Anexo 2 hasta igualar los del Anexo 1

Los valores establecidos en el Anexo 2, se ajustarán gradualmente hasta igualar a los Niveles Máximos Permisibles (Anexo 1), en un período no mayor de 10 años a partir de la entrada en vigencia de la presente Resolución Ministerial.

Artículo 4°.- Resultados analíticos no excederán los niveles contemplados en el Anexo 1 ó 2, según sea el caso

Los resultados analíticos obtenidos para cada parámetro regulado a partir de la muestra recogida del efluente minero-metalúrgico, no excederán en ninguna oportunidad los niveles establecidos en la columna “Valor en cualquier Momento” del Anexo 1 ó 2 según corresponda.

Artículo 5º.- Concentraciones promedio anuales no excederán los niveles contemplados en el Anexo 1 ó 2, según sea el caso

Las concentraciones promedio anuales, para cada parámetro regulado no excederán los niveles establecidos en la columna "Valor Promedio Anual" en el Anexo 1 ó 2 según corresponda.

ANEXO 1
NIVELES MÁXIMOS DE EMISIÓN PARA LAS UNIDADES
MINERO - METALÚRGICAS

PARÁMETRO	VALOR EN CUALQUIER MOMENTO	VALOR PROMEDIO ANUAL
pH	Mayor que 6 y Menor que 9	Mayor que 6 y Menor que 9
Sólidos suspendidos (mg/l)	50	25
Plomo (mg/l)	0.4	0.2
Cobre (mg/l)	1.0	0.3
Zinc (mg/l)	3.0	1.0
Hierro (mg/l)	2.0	1.0
Arsénico (mg/l)	1.0	0.5
Cianuro total (mg/l)	1.0	1.0

ANEXO 2
VALORES MÁXIMOS DE EMISIÓN PARA LAS
UNIDADES MINERAS EN OPERACIÓN O
QUE REINICIAN OPERACIONES

PARÁMETRO	VALOR EN CUALQUIER MOMENTO	VALOR PROMEDIO ANUAL
pH	Mayor que 5.5 y Menor que 10.5	Mayor que 5.5 y Menor que 10.5
Sólidos suspendidos (mg/l)	100	50
Plomo (mg/l)	1	0.5
Cobre (mg/l)	2	1
Zinc (mg/l)	6	3
Hierro (mg/l)	5	2
Arsénico (mg/l)	1	0.5
Cianuro total (mg/l)	2	1