

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**  
**“TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ÁCIDA POR**  
**TECNOLOGÍA DE LODOS DE ALTA DENSIDAD EN LA MINA**  
**BARRICK – PIERINA”**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

**TORRICO GARCÉS JOSÉ LUIS**

**ASESOR**

**ING° JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA**

**CALLAO – 2022**

**PERÚ**

## PRÓLOGO DEL JURADO

El presente Trabajo de Suficiencia Profesional fue expuesto por el Bachiller **TORRICO GARCÉS JOSÉ LUIS** ante el Jurado de Exposición del Informe de Trabajo de Suficiencia Profesional conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

ING° CALDERÓN CRUZ JULIO CÉSAR	Presidente
ING° GUTIÉRREZ CUBA CÉSAR	Secretario
ING° CABRERA ARISTA CÉSAR	Vocal
ING° MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO	Asesor

Tal como está asentado en el Libro de actas N° 02 Folio N° 42 y Acta N° 235 de fecha diciembre 06 de 2022, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación por Trabajo de Suficiencia Profesional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 245-2018-CU del 30 de octubre de 2018

# ÍNDICE

<b>I. ASPECTOS GENERALES</b>	<b>3</b>
<b>II. RESEÑA DE LA EMPRESA</b>	<b>4</b>
<b>III. OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
3.1 Objetivo general	5
3.2 Objetivos específicos	5
<b>IV. RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>V. FUNDAMENTO TEÓRICO</b>	<b>7</b>
5.1 Aguas ácidas	7
5.1.1 Generación de aguas ácidas	7
5.1.2 Caracterización de drenajes ácidos de mina	9
5.1.3 Control del drenaje ácido de minas	11
5.2 Remoción de metales pesados con cal	12
5.2.1 Bases del tratamiento con cal	12
5.2.2 Procesos de tratamiento con cal	15
<b>VI. ACTIVIDADES REALIZADAS EN LA EMPRESA</b>	<b>25</b>
6.1 Actividades cotidianas	25
6.1.1 Diagrama de bloques del proceso de tecnología de lodos de alta densidad	25
6.1.2 Descripción del proceso de tecnología de lodos de alta densidad	26
6.1.3 Diagrama de flujo de procesos	37
6.1.4 Monitoreo de parámetros	38
6.2 Actividades realizadas en beneficio de la empresa	39
<b>VII. DISCUSIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>40</b>
<b>VIII. CONCLUSIONES</b>	<b>44</b>

<b>IX. RECOMENDACIONES</b>	<b>45</b>
<b>X. REFERENCIAS BIBIOGRÁFICAS</b>	<b>46</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>47</b>

## **I. ASPECTOS GENERALES**

En la actualidad la actividad minera, es una de las actividades de mayor importancia en nuestro país, debido a los altos costos de los metales y a las grandes reservas con las que contamos; en esta actividad el tratamiento de aguas ácidas de mina cumple un papel muy importante debido a que se deben de cumplir los estándares de calidad de agua normados por el gobierno peruano.

La generación del drenaje ácido de mina (DAM) es un problema común en los yacimientos auríferos peruanos que requiere especial atención. Este perjudica severamente la vida acuática de los ríos y la ecología de su entorno. En áreas donde existe mineralización sulfurosa no protegida, el principal problema de la calidad de agua por la actividad minera es generalmente debido a los efectos del drenaje ácido de mina no controlado. Una vez generado el drenaje ácido de mina es difícil y costoso su control, los efectos son a largo plazo, aún a perpetuidad, y afectarán, tanto al uso de aguas superficiales, debido a sus propiedades tóxicas sobre la fauna acuática como a las fuentes de aguas subterráneas debido a la migración de los lixiviados tóxicos.

Para poder tratar las aguas ácidas Barrick ha construido una planta de tratamiento de drenaje ácido de mina (ARD 450), esto para producir agua que se encuentren en los límites máximos permisibles estipulados en el Decreto Supremo N° 010–2010–MINAM.

## **II. RESEÑA DE LA EMPRESA**

Barrick Gold Corporation es la empresa minera líder en la industria del oro. Su sede principal está ubicada en la ciudad de Toronto, Canadá. Posee minas operativas y varios proyectos en diferentes etapas de exploración y desarrollo en todo el mundo. La visión de Barrick es ser la mejor compañía de oro en el mundo, encontrando, desarrollando y produciendo reservas de calidad de una manera rentable y socialmente responsable.

La Unidad Minera Pierina se encuentra ubicada en el lado oriental de la Cordillera Negra en la Sierra Norte del Perú. La mina se ubica a unos 10 Km al noroeste de la ciudad de Huaraz, en la jurisdicción de los distritos de Jangas e Independencia, provincia de Huaraz, Región Ancash, a una altitud que fluctúa entre 3 700 msnm y 4 300 msnm

La operación se inicia en la mina donde se aplica el sistema de explotación a tajo abierto utilizando una voladura convencional, carguío con cargadores y transporte con camiones con el objetivo de extraer el mineral valioso. La roca de desmonte es llevada por camiones hacia el botadero de desmonte. El oro y plata es recuperado a través de un método tradicional de lixiviación en pilas mediante una solución de cianuro de sodio.

Tanto el tajo como el depósito de desmonte contienen material que tiene potencial de generación de drenaje ácido, producidos por la oxidación de la pirita y de los otros minerales con contenido de sulfuros.

Minera Barrick Misquichilca S.A. viene implementando un nuevo sistema de Tratamiento de Drenajes Ácidos como parte del cierre progresivo de la Unidad Minera Pierina, en el cual se tratarán todas las aguas de contacto de la zona del tajo antes de su vertimiento a la quebrada Pucaurán. Este nuevo sistema contempla la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Acidas ARD 450 de 450 m<sup>3</sup>/h y un sistema de Tratamiento de Osmosis Inversa.

### **III. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Describir el proceso de Tratamiento de agua residual acida mediante la tecnología de lodos de alta densidad de la mina Barrick.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- 1)** Caracterizar el agua residual acido de la mina Barrick Misquchilca Pierina
- 2)** Descripción de las etapas del proceso de tratamiento del agua residual
- 3)** Determinar el grado de reducción de metales pesados con el Tratamiento de Agua Ácida con la tecnología de Lodos de Alta Densidad (HDS).

#### **IV. RESUMEN**

El presente informe describe las etapas del tratamiento de aguas ácidas de mina por la tecnología de lodos de alta densidad (HDS), las cuales son: Alimentación de agua ácida, primera etapa de precipitación-Clarificación, segunda etapa de precipitación-Clarificación, Ajuste de pH, Ósmosis Inversa y Manejo de lodos.

La alimentación de agua ácida es la etapa inicial en el tratamiento de las aguas ácidas de mina donde por medio de bombas se impulsa el agua ácida con pH entre 2 y 3,5 desde las pozas de recolección hasta la planta de tratamiento.

Luego pasa a la primera etapa de precipitación-clarificación la cual está constituida por dos reactores, un tanque de contacto de lechada de cal-agua ácida, un tanque de floculación y un reactor clarificador. Es en esta etapa donde por medio de la adición de lechada de cal se regula el pH entre 6 y 7 para la precipitación de metales como Cu, Fe, Zn y Al

La siguiente etapa de precipitación-clarificación la cual está constituida igualmente que la primera por dos reactores, un tanque de contacto de lechada de cal-agua ácida, un tanque de floculación y un reactor clarificador. Es en esta etapa donde por medio de la adición de lechada de cal se regula el pH del agua resultante del primer clarificador entre 10,3 y 10,8 para la precipitación de metales como Mn y Cd

La etapa de ajuste de pH en la cual por medio ácido sulfúrico se logra adecuar el pH entre un rango de 6,5 a 9 para vertimiento a las quebradas.

La planta de ósmosis inversa trata un porcentaje del agua producto de la planta de tratamiento ARD, esto para disminuir la cantidad de sólidos disueltos (TDS) y poder entregar un agua de calidad que cumpla con la Categoría III de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua.

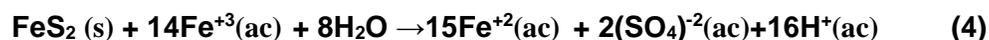
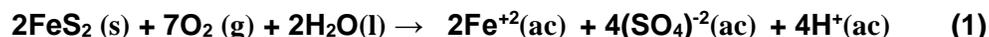
## V. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 5.1 Aguas ácidas

#### 5.1.1 Generación de aguas ácidas

Nordstrom y Alpers (1999) describen el proceso de oxidación de la pirita como el principal responsable de la formación de aguas ácidas; 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 y por los poros existentes en las pilas de estériles y residuos – así como al incremento de la superficie de contacto de las partículas. Dichos autores consideran que los factores que más afectan a la generación del drenaje ácido de mina son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución espacial de la pirita.

Las reacciones que intervienen en la oxidación de la pirita pueden ser representadas por las siguientes cuatro ecuaciones (Skousen et al., 1998; Nordstrom y Alpers, 1999; Mills, 1999; USEPA, 1996 y 2000; entre otros).



En la reacción de oxidación de la pirita (1) se produce  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $(\text{SO}_4)^{-2}$  e  $\text{H}^+$ , esta reacción provoca un incremento en el total de sólidos disueltos y un aumento de la acidez, que irá asociado a una disminución del pH, a menos que sea neutralizada la acidez generada. Si el ambiente circundante es lo suficientemente oxidante, entonces muchos iones ferrosos se oxidarán a iones férricos (etapa 2). Por lo general, por encima de un pH alrededor de 3, el ión férrico formado precipita mediante hidrólisis como hidróxido (3), disminuyendo por tanto el  $\text{Fe}^{3+}$  en solución, mientras que el pH baja simultáneamente. Por último, algunos cationes férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) que se mantienen en solución, pueden seguir oxidando adicionalmente a la pirita y formar  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $(\text{SO}_4)^{-2}$  e  $\text{H}^+$  (4)

Cinéticamente, la oxidación de la pirita (1) en un principio es un proceso lento, que acaba con el hierro liberado precipitado como hidróxido (3) al ser todavía relativamente alto el pH. Progresivamente la capacidad neutralizadora del medio va disminuyendo, y al alcanzar el pH el valor de 3,5 deja de formarse el hidróxido y la actividad del  $\text{Fe}^{3+}$  en solución se incrementa. A este pH, además, las bacterias catalizan y aceleran la oxidación de  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  (2) en varios órdenes de magnitud. Es entonces cuando la reacción (4) de oxidación de la pirita por el  $\text{Fe}^{3+}$  empieza a tener lugar, siendo la causa de la rápida oxidación de la pirita a pH ácido.

La geoquímica de las aguas ácidas 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. En el trabajo de Nordstrom y Alpers (1999) se presenta una relación exhaustiva de procesos específicos que han estudiado y comprobaron que contribuyen en su conjunto en la geoquímica de las aguas ácidas de mina, estos procesos son los siguientes:

- 1) La oxidación de la pirita
- 2) La oxidación de otros sulfuros
- 3) La oxidación e hidrólisis del hierro disuelto y otros metales
- 4) La capacidad neutralizadora de la ganga mineral y roca encajante
- 5) La capacidad neutralizadora de las aguas bicarbonatadas
- 6) La disponibilidad de oxígeno
- 7) La disponibilidad de agua líquida o en forma vapor
- 8) La localización y forma de zonas permeables en relación con las vías de flujo
- 9) Las variaciones climáticas (diarias, estacionales o episodios de tormentas)
- 10) La formación de eflorescencias y su redisolución
- 11) El calentamiento por conducción y radiación de calor generado en diversas reacciones exotérmicas (oxidación de la pirita, disolución de sales solubles y la dilución de un ácido concentrado)
- 12) La temperatura
- 13) La acción de catálisis de las bacterias
- 14) La adsorción microbiana de metalesL

- 15) La precipitación y disolución de minerales durante el transporte
- 16) Adsorción y desorción de metales durante el transporte
- 17) Foto reducción del hierro
- 18) La formación de complejos orgánicos
- 19) Los procesos micro ambientales sobre superficies o en torno a organismos.

La importancia que tiene el problema de la formación de aguas ácidas ha llevado a desarrollar y establecer una serie de ensayos capaces de determinar el potencial generador de acidez de los residuos mineros. La USEPA (1994) en un documento técnico sobre predicción de drenajes ácidos de mina hace un análisis de cada uno de los tipos de ensayos empleados en la predicción del potencial generador de ácido: estáticos, cinéticos y modelos matemáticos. Los ensayos estáticos predicen la calidad de los drenajes ácidos de mina mediante la comparación entre la capacidad de neutralización y el potencial de generación ácida. Los ensayos cinéticos se basan en reproducir en laboratorio los procesos y las condiciones de los lugares de mina que pueden generar acidez, dando información sobre el rango de producción ácida; estos ensayos conducen a confirmar los resultados de los ensayos estáticos, requieren de mayor tiempo y son más costosos que éstos. Por último, el modelamiento matemático permite predecir la calidad de las aguas y la generación de los drenajes ácidos de mina, mediante la simulación para largos períodos de tiempo de todas las variables y condiciones que afectan a la formación de drenajes ácidos de mina.

#### **5.1.2 Caracterización de drenajes ácidos de mina**

La caracterización precisa del drenaje ácido de mina es muy importante para efectuar la correcta selección y dimensionamiento de los dispositivos operacionales que configuran el conjunto del tratamiento pasivo. Una adecuada caracterización debe incluir la medida precisa y representativa del caudal, y de al menos los parámetros químicos siguientes: pH in situ, pH en laboratorio, alcalinidad total, acidez o alcalinidad neta (expresadas todas como  $\text{CaCO}_3$ ); además de contenidos de  $\text{Fe}^{2+}$ , Fe total, Al, Mn,  $\text{SO}_4^{=}$  y conductividad (Hyman y Watzlaf, 1995). Estos autores consideran deseable analizar también el Ca, Mg, Na, Cl, K, Br y Zn, lo que

permite en la mayoría de los casos efectuar un correcto balance iónico. El conjunto de estas medidas se ha de registrar al menos durante un año hidrológico.

La “acidez” y la “alcalinidad” de un drenaje ácido de mina son parámetros básicos en la selección del tipo de tratamiento pasivo; representan la capacidad de esas 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 soluciones con acidez o alcalinidad neta.

$$\text{Acidez/alcalinidad neta} = \text{acidez total} - \text{alcalinidad total} \quad (5)$$

La acidez total representa la concentración de iones hidrógeno 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, Zn, 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 (5). La acidez y la alcalinidad se suelen medir como equivalentes de  $\text{CaCO}_3$ . La acidez medida en el laboratorio generalmente representa la acidez neta, porque se suele efectuar la valoración con  $\text{CaCO}_3$  después de haber añadido  $\text{H}_2\text{O}_2$  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 cationes que generan acidez. La acidez total sería la suma de la acidez atribuible a los iones  $\text{H}^+$  y la potencial de los cationes metálicos ( $\text{Me}^{+n}$ ) El cálculo se hace mediante la fórmula siguiente considerando que la reacción transcurre equivalente a equivalente:

$$\text{Acidez total equivalente CaCO}_3 \text{ (mg/L)} = \sum \text{Me}^{+n} \text{ (mg/L)} * (50.045/\text{Pa}_{\text{Me}})^*n \quad (7)$$

**Donde:**

PaMe: Peso atómico del metal y 50,045 es un factor de conversión resultado de dividir el PmCaCO<sub>3</sub> por su valencia.

En el caso del pH se tiene que la concentración de iones H<sup>+</sup> es igual a 10<sup>-pH</sup>. Hay que tener en cuenta que la acidez total así calculada no considera el efecto de los iones complejos, frecuentes a pH neutros, y que no producen acidez. Al estar contabilizados los cationes de estos complejos en un análisis químico convencional se puede presentar diferencias entre la acidez total teórica y la deducida usando la ecuación (5)

La alcalinidad total de una solución generalmente está representada por los iones hidróxido y bicarbonato, y se suele medir directamente en laboratorio.

Que un drenaje ácido de mina 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.

### **5.2.3 Control del drenaje ácido de minas**

Los métodos para el control del drenaje ácido de mina se pueden clasificar de 3 maneras:

**a) Métodos preventivos.-** El objeto de los métodos preventivos es detener o reducir drásticamente la velocidad de la generación de ácido. Esto se puede realizar, impidiendo el contacto de los sulfuros con el agua o el aire, o ambos, eliminando las bacterias responsables de la catálisis de las reacciones o controlando otros factores que influyan sobre las reacciones, tal como el pH, por adición de álcali al sistema.

Dentro de esta categoría se encuentran los siguientes métodos:

- 1) Remoción de sulfuros/aislamiento.
- 2) Exclusión de oxígeno por recubrimiento con agua.
- 3) Cubiertas de agua en estructuras de contención,
- 4) Disposición en lagos naturales.

- 5) Disposición de relaves en el mar.
- 6) Cubiertas de agua soportadas biológicamente.
- 7) Exclusión de oxígeno por cubiertas secas y selladas.
- 8) Cubiertas orgánicas.
- 9) Aditivos alcalinos.
- 10) Bactericidas.

**b) Métodos de contención.**- Ayudan a prevenir o reducir la migración de drenajes ácidos de mina al ambiente. Se utilizan fundamentalmente para remover los iones metálicos que migran al ambiente.

Se pueden señalar los siguientes métodos:

- 1) Desviación del agua superficial.
- 2) Interceptación de aguas subterráneas.
- 3) Reducción de infiltración.

**c) Métodos de remediación.**- Constituyen el tercer nivel de control y su objeto es recolectar y tratar el drenaje contaminado.

Los métodos pueden ser:

- 1) Sistemas activos, los cuales requieren operaciones continuas como una planta de tratamiento químico.
- 2) Sistemas pasivos, los cuales funcionan sin un ajustado control.

Los tratamientos químicos ofrecen un método seguro de corto término, pero no sirven para minas redundantes. En estos casos, los sistemas de tratamiento pasivo son considerados como una alternativa.

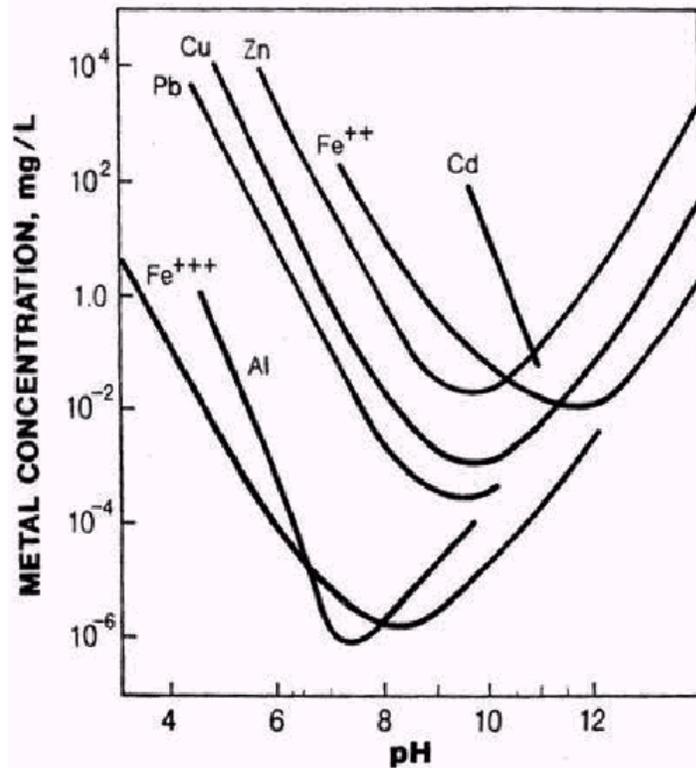
## **5.2 Remoción de metales pesados con cal**

### **5.2.1 Bases del tratamiento con cal**

El principio de la neutralización con cal se basa en la insolubilidad de los metales pesados en condiciones alcalinas. A un pH controlado alrededor de 9.5 precipitan metales como hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu). Otros tales como el níquel (Ni) y el Cadmio (Cd) requieren un pH mayor, en el rango de 10.5 a 11 para precipitar los hidróxidos (**Ver Figura 1, Ver pag. N° 13**) La principal diferencia entre los

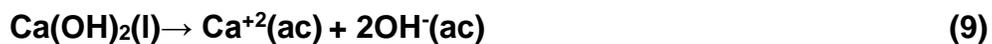
procesos de tratamiento con cal es el método empleado para separar los sólidos y los lodos que se forman. El efluente químico resultante es muy similar para todos los procesos de tratamiento con cal.

**Figura N° 1**  
**Hidrólisis de metales**

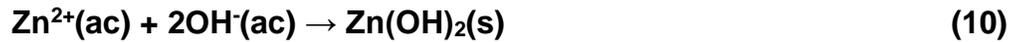


Aubé & Zinck (2003)

La disolución de la cal es el primer paso del proceso de neutralización. La cal debe ser hidratada y es normalmente alimentada al proceso como una pasta. La cal hidratada diluida entonces incrementará el pH. Las dos siguientes ecuaciones ilustran esas reacciones:



El incremento del pH entonces promueve la generación de iones hidroxilo (OH)<sup>-</sup> los cuales precipitan los metales. La siguiente reacción muestra la reacción de precipitación del Zn por ejemplo.



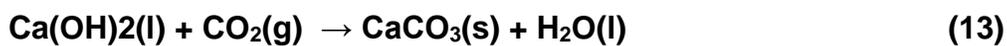
Entre los metales que precipitan como la reacción (3) se encuentra el hierro ferroso. Desafortunadamente, los hidróxidos ferrosos no son tan estables como los hidróxidos férricos cuando el lodo es expuesto a aguas ácidas o precipitación natural. Por esta razón, a menudo se aplica aireación para oxidar el hierro a la forma más estable, mediante la siguiente ecuación:



Un producto común de la neutralización con cal es el yeso. La precipitación del yeso ocurre cuando el DAM es a menudo rico en sulfatos y el calcio adicionado de la cal promueve un buen producto de solubilidad sobre la saturación. La reacción que ocurre es la siguiente:



Otro producto común de la neutralización con cal es el carbonato de calcio. El carbono inorgánico de esta reacción puede provenir del mismo DAM o ser resultado del dióxido de carbono del aire, el cual es disuelto durante la aireación. Este dióxido de carbono se convierte a bicarbonato y luego parcialmente a carbonato debido al pH alto. La fracción de carbonato precipitará con altos contenidos de calcio del lodo en forma de calcita (carbonato de calcio). Esta calcita puede jugar un rol importante en la estabilidad de producto final de lodos debido a que este promueve el potencial de neutralización al lodo. Este es también un indicador de la eficiencia del proceso con cal; un proceso de neutralización más eficiente producirá menos calcita.



### 5.2.2 Procesos de tratamiento con cal

Existen distintos procesos de tratamiento con cal desde los más simples hasta los más complejos y recientes. Los métodos más antiguos a menudo usan cal de manera menos eficiente y no tienen un buen control del sistema de tratamiento. Los procesos más recientes requieren gran inversión de capital, pero son considerablemente más eficientes en el uso de cal y la producción de residuos.

El tratamiento de efluentes ácidos consiste, básicamente, en la elevación del pH para neutralizar el ácido libre y precipitar los metales disueltos; los precipitados obtenidos son coloidales y normalmente no densifican más allá de 1% en sólidos.

Los metales precipitados obtenidos durante todo el proceso son desechos típicamente identificados como "lodos". Este lodo debe ser dispuesto en un ambiente de manera aceptable. Como los costos de disposición de lodos pueden ser muy elevados, usualmente se justifica una mayor inversión de capital debido a los significativos ahorros en costos de operación.

Los distintos procesos de tratamiento del más simple al más complejo son:

- a) Poza de tratamiento.
- b) Tratamiento In Situ (Pittreatment).
- c) Planta de tratamiento convencional.
- d) Proceso de Lodos de alta densidad (HDS).
- e) Proceso de lodos de alta densidad GECO.
- f) Proceso de Neutralización Coagulación Dinámica (NCD).
- g) Proceso de neutralización en etapas (stage-neutralization process).

A continuación, se van a describir estos procesos y para fines del presente informe se adaptará el proceso de Lodos de Alta Densidad (HDS)

- a) **Poza de tratamiento (Pond Treatment).**- Este sistema de tratamiento implica la adición de cal en un arroyo o sistema de mezcla, permitiendo que los precipitados se asienten en una poza. La poza se divide en una sección primaria y secundaria. La poza primaria sirve para acumular el lodo precipitado y rápidamente se puede llenar. Estos a menudo requieren dragado anual de lodos

que luego requiere un área de almacenamiento. La poza secundaria es más grande y requiere un largo tiempo de retención con las condiciones laminares para permitir el "pulido" del efluente.

Los sistemas de poza de tratamiento se eligen a menudo por su simplicidad y bajo costo de capital cuando la tierra está disponible. Pueden ser utilizados para el tratamiento de altas velocidades de flujo y concentraciones incluso importantes de metales, pero requieren un área de superficie muy grande al hacerlo.

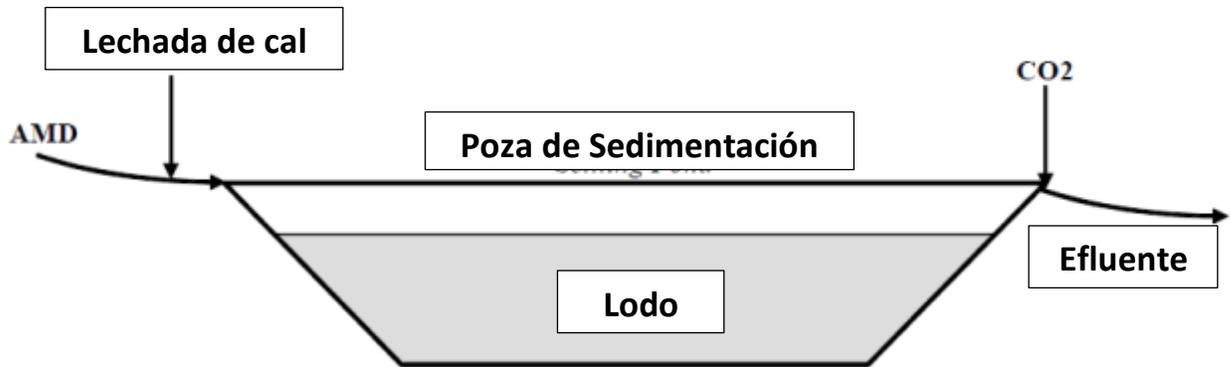
El tratamiento de AMD en una poza no permite mucho control del sistema y por lo tanto puede ser más problemático que otros tipos de sistemas de tratamiento. Por ejemplo, es difícil para oxidar el hierro ferroso cuando está presente debido a la aireación para la oxidación a hierro férrico requiere de mezclado y tiempo de contacto adecuado. Si el aire se burbujea en un estanque, el lodo no puede conformarse.

Otra dificultad es que el caudal no se controla en el tratamiento en una poza. Sistemas de tratamiento de poza se diseñan típicamente para usar depresiones naturales a lo largo de la trayectoria de flujo del drenaje del sitio de tratamiento.

Probablemente, la mayor desventaja de los sistemas de tratamiento en poza es la baja eficiencia de la cal. Un sistema que utiliza además en la corriente sin ninguna mezcla mecánica puede tener la eficiencia de menos de 50% en disolución de cal. Mediante el uso de un sistema agitador y control de pH, aumenta la eficiencia de la cal de manera significativa.

- b) Tratamiento In Situ (Pit Treatment).**- El tratamiento de AMD in situ es similar al de la poza de tratamiento, pero por lo general requiere de bombeo dentro y/o fuera de la fosa. Al igual que con el tratamiento en poza, mezcla mecánica aumentará significativamente la eficiencia de cal. El tratamiento de AMD in situ puede hacer uso de un tratamiento por lotes o tratamiento continuo.

**Figura N° 2**  
**Poza de tratamiento**



A. Mezei; M. Canizares

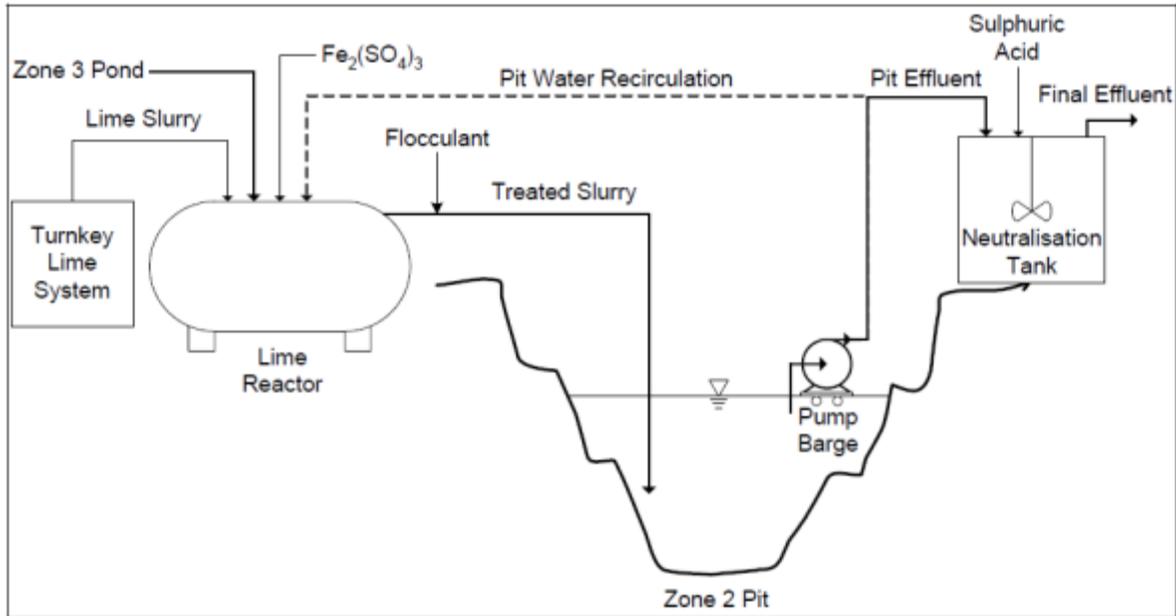
El tratamiento por lotes se hace permitiendo que el agua contaminada en el pozo a un nivel justo por debajo de la que permitirá la filtración fuera de él. En este punto, el agua pozo se pone en contacto con un álcali (cal o sosa cáustica, por ejemplo). Una vez que se alcanza el pH de destino, permite que el lodo se conforme en la parte inferior. El sobrenadante claro se bombea hacia fuera y se neutraliza con ácido sulfúrico o dióxido de carbono si es necesario. Una vez que el nivel de fosa se reduce a apenas sobre el lecho de lodo, se vuelve a iniciar el procedimiento.

En la División de Falconbridge Raglan (SMRQ – Société Minière Raglan du Québec), una mina de Ni en el norte de Québec, un proceso de tratamiento continuo se aplica (Aube y Arseneault, 2003) El tratamiento empieza con el bombeo del drenaje a un tanque, donde el pH se controla mediante la adición de cal hidratada a un pH de aproximadamente 11 (**Figura N° 3, Ver pag. N° 18**) Este drenaje es esencialmente neutral, pero contiene Ni en concentraciones más altas que la permitida para la descarga. Para una mejor separación sólido / líquido, sulfato férrico y un floculante puede ser añadido para la coagulación y floculación, respectivamente.

La suspensión tratada se descarga aguas abajo en un extremo de la fosa para promover la sedimentación de las partículas frescas. Un sobrenadante

claro se bombea desde el extremo opuesto de la fosa. El efluente se neutraliza a pH 9,2 usando ácido sulfúrico antes de la liberación (Aubé y Arseneault, 2003)

**Figura N° 3**  
**Tratamiento IN SITU**



Aubé Bernard & Zinck Janice

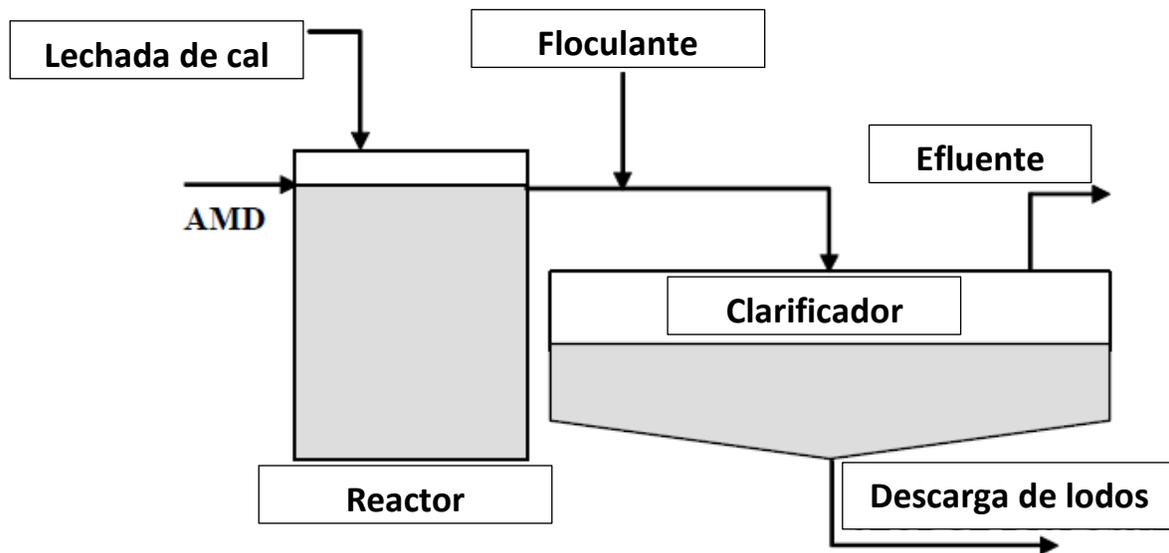
Una de las claves de este sistema es que el agua tratada desde el pozo se bombea utilizando una barcaza flotante. Esto asegura que sólo el agua de la superficie limpia se bombea hacia fuera, independientemente del nivel en el pozo. Como la velocidad de bombeo en y fuera de la fosa varía, el nivel en la fosa también varía.

Algunos de los mismos inconvenientes existen para el tratamiento en poza como para el tratamiento in situ, incluida la posibilidad de re-suspensión en fuertes vientos.

- c) **Planta de tratamiento convencional.**- La planta de tratamiento convencional es una planta donde la AMD se neutraliza en un tanque de mezcla con la adición controlada de cal para alcanzar un punto de ajuste de pH deseado (**Figura N° 4, Ver pag. N° 19**). La suspensión se pone en contacto con un floculante y se alimenta a un clarificador para la separación sólido / líquido. El lodo se recoge

desde el fondo del clarificador y/o bien puede ser bombeada a un área de almacenamiento o se filtra a presión para aumentar su densidad antes del transporte. El rebose del clarificador normalmente puede ser liberado directamente, pero a menudo un sistema de filtración de arena o estanque de pulido se utiliza para reducir los sólidos suspendidos residuales.

**Figura N° 4**  
**Planta de tratamiento convencional**



A. Mezei; M. Canizares

Este proceso tiene una mejor eficiencia de la cal que los procesos de tratamiento de poza o in situ, aunque todavía no es tan eficiente como los procesos de HDS donde se recicla lodos. El hecho de que la alimentación es bombeada a la planta y que el proceso puede ser bien instrumentado, significa que este tipo de tratamiento está bien controlado. Si se producen sorpresas, la alimentación puede ser detenida y se evita la liberación de efluentes no conformes.

La planta de tratamiento convencional rara vez se ha utilizado en los últimos años porque la recirculación de lodos en una planta HDS es un pequeño paso adicional y proporciona ventajas significativas.

La más importante es que el lodo formado por una planta de tratamiento convencional es de menos de 5% de sólidos, mientras que un proceso de HDS a menudo va a crear un lodo de más de 20% de sólidos.

Un lodo de tan baja densidad requiere de bombeo y de almacenamiento significativo, particularmente si las concentraciones de metal en el AMD son altas. Las altas concentraciones de metal resultan en alta formación de sólidos y en el aumento de la producción de lodos.

**d) Proceso de lodos de alta densidad (HDS).**- El proceso de lodos de alta densidad (HDS) es el estándar en la industria de tratamiento de AMD hoy. En lugar de ponerse en contacto con la cal directamente a la AMD como en los procesos descritos anteriormente, este sistema de contactos recicla los lodos con la lechada de cal para la neutralización. Para ello, el lodo de la parte inferior del clarificador se bombea a un tanque de contacto cal/lodo.

Esto fuerza el contacto entre los sólidos y promueve la coagulación de partículas de cal en los precipitados reciclados. Esta mezcla entonces rebosa hacia los tanques reactores.

La suspensión neutralizada alimenta el reactor, donde se realizan las reacciones de precipitación. La aireación se añade a menudo a este reactor para oxidar el hierro ferroso a férrico. La suspensión luego rebosa a un tanque Floculador para ponerse en contacto con las partículas de floculante y debidamente aglomerar todos los precipitados y promover la sedimentación eficiente en el clarificador. De acuerdo con la planta de tratamiento convencional, el rebose del clarificador puede ser descargado o pulido antes de la descarga.

La clave de este proceso radica en la mezcla de cal y lodos antes de la neutralización. El hecho de que el hidróxido de calcio y partículas recicladas se combinan hace que las reacciones de precipitación se produzcan

principalmente en la superficie de las partículas existentes, lo que aumenta su tamaño y densidad.

Los precipitados de este proceso son por lo tanto diferentes de los de los procesos mencionados anteriormente en una escala micro física.

El proceso de HDS como se muestra en la contiene un tanque de mezclado rápido y un tanque de Floculador. Este proceso se aplica en numerosos sitios de las minas en todo el mundo. Una variante del proceso de HDS (Aube, 1999) es aplicado en Noranda Inc., División de Steele Heath. El Proceso de Heath Steele es idéntico en concepto y proporciona las mismas ventajas físicas y químicas como el proceso de HDS, pero sin dos de los cuatro reactores.

Este es el proceso en el que está basado el Tratamiento de Drenaje Ácido de Roca de la Minera Barrick Misquichilca Unidad Minera Pierina.

- e) Procesos de lodo de alta densidad GECO.-** En 1995, una nueva planta de tratamiento fue construida y optimizada en el Noranda Inc., División Geco que no aplica cualquiera de los métodos de neutralización tradicionales. El Proceso de Geco no tiene tanque de contacto lodo/cal, en contraste con otros procesos HDS (Aube y Payant, 1997) El lodo del clarificador se recicla al primer reactor (R#1), donde se pone en contacto directamente con el AMD. Este reactor tiene un tiempo de retención de al menos 30 minutos para permitir la disolución parcial de los lodos y la precipitación de los metales en AMD. El pH se controla en el tanque de mezcla rápida por adición de cal directa. El Reactor 2 (R#2) tiene un tiempo de retención de 40 minutos para las reacciones de precipitación y oxidación del hierro ferroso a hierro férrico. Después de la adición de floculante, la suspensión se alimenta a un clarificador para la separación sólido/líquido.

Los lodos de la planta de Gecohan llegaron a más de 30% de sólidos en el primer año de operación. En una encuesta de las cualidades de lodo, el lodo en la muestra de esta planta fue el único que tiene un precipitado de hierro cristalino (Aube y Zinck, 1999). El hierro precipita a partir de todas las demás muestras de lodos, ya sea de alta densidad o no, resultaron ser completamente

amorfo. Los lodos de Geco también mostraron el potencial de neutralización más bajo.

Esto puede parecer una desventaja para la estabilidad de los lodos a largo plazo, pero también significa que el proceso es más cal – eficiente.

Un alto potencial neutralizante indica la presencia de cal sin reaccionar o formación de carbonato de calcio en exceso en el sistema. Poniéndose en contacto con el lodo directamente a la AMD en el proceso Geco, la cal sin reaccionar se consume y los carbonatos se disuelven. También, a pesar del bajo potencial de neutralización de los lodos Geco, se encontró que un precipitado muy estable.

El Proceso de Geco forma una densidad muy alta de lodos similar a la del Procedimiento HDS. El reciclaje de lodos en R N° 1 aumenta el pH a neutro por carbonatos de disolución, hidróxidos de magnesio, y cualquier cal residual en el lodo. Como el aumento de pH es debido a la disolución parcial de los lodos, las reacciones se producen en la superficie de los precipitados existentes. La química de la solución del R N° 1 también ha demostrado que todos los metales pesados presentes en el AMD precipitan casi hasta su finalización (más de 95% precipitado) en este primer paso. Puesto que todas las reacciones están ocurriendo sobre las partículas, tienden a crecer con cada contacto posterior con el AMD, aumentando así su densidad y tamaño. Es este fenómeno que resulta en la formación de lodos que contienen más de 20% de sólidos, porque las partículas más densas pueden compactar de manera más eficiente.

Una de las ventajas del proceso de Geco sobre el proceso de HDS es el hecho de que no tiene una mezcla de depósito de cal/lodo.

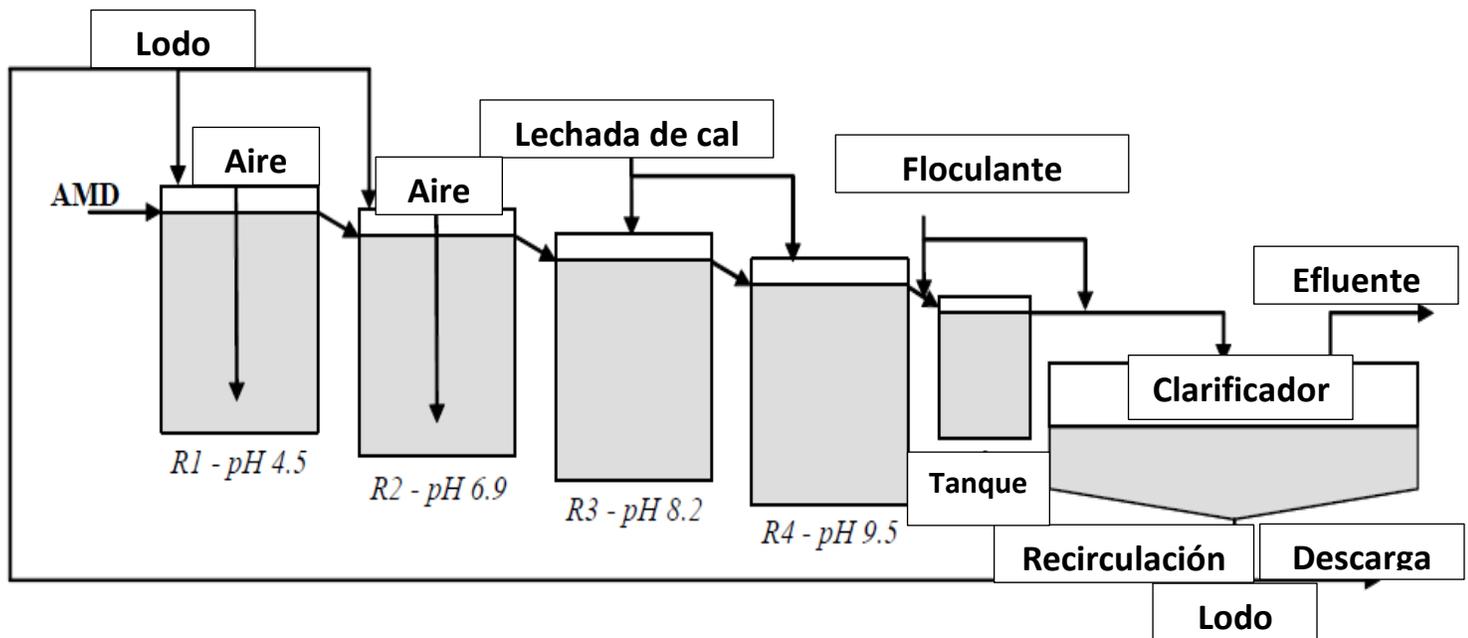
Este tanque utilizado en el Proceso de HDS requiere considerable mantenimiento, porque es una mezcla viscosa con un alto potencial de incrustamiento.

Como el lodo se pone en contacto directamente a la AMD en el Proceso de Geco, esto elimina la necesidad de un reactor de este tipo de alto mantenimiento.

Al igual que con el proceso de HDS, el Proceso de Geco no necesita tener un tanque de mezcla rápida y un tanque Floculador.

Como se mencionó anteriormente, la aireación también no siempre es necesaria el proceso se muestra sin aire en la **Figura N° 5**

**Figura N° 5**  
**Proceso de neutralización en etapa**



Desde su puesta en servicio en 1995, el Proceso de Geco ha aplicado con éxito en otras minas, a pesar de que no fue nombrado como tal. La planta de tratamiento de agua de la mina de Wheal Jane encargó en octubre de 2000 se aplicara el Proceso Geco HDS (Hallet et al., 2003), aunque ellos lo llaman el "Proceso Unipure". El proceso también se duplicó en la mina de Boliden Kristineberg (Kuyucak et al., 2001)

- f) **Proceso neutralización coagulación dinámica.**- El proceso NCD emplea un coagulante sólido externo para densificar los precipitados coloidales obtenidos en la neutralización; el mecanismo de adsorción es fundamentalmente electrostático y depende de la carga superficial de los coloides y de las partículas.

Pueden actuar como partículas colectoras el relave, escoria granulada, caliza fina, sílice, magnetita, dependiendo de su carga superficial, disponibilidad, costo y capacidad para adsorber los precipitados coloidales.

Este proceso de coagulación es rápido, generalmente toma menos de 1 minuto, y la velocidad de sedimentación se incrementa notablemente dependiendo de la densidad y tamaño de la partícula colectoras. Como consecuencia de ello el tiempo de tratamiento se reduce al tiempo estrictamente requerido para la neutralización, es decir en el orden de 5 minutos.

**g) Proceso de neutralización en etapas.**- El proceso por etapas de neutralización (SN) aplica los principios de cristalización para mejorar la cristalinidad de lodos y reducir el volumen de lodos (Demopoulos, 1995). Este proceso ha sido patentado en los Estados Unidos y Canadá (Demopoulos et al., 1997; Zinck et al., 2001). El proceso de neutralización por etapas implica la neutralización y una serie de medidas para controlar el nivel de sobresaturación durante la precipitación de metal. El proceso utiliza el reciclado de lodos en los dos primeros reactores para neutralizar parcialmente la AMD. La velocidad de adición de lodo debe ser controlada para alcanzar un pH deseado, como se ilustra en la **Figura 5 (Ver pag. Nº 23)** En el tercero y cuarto reactor la cal se utiliza para llevar la suspensión hasta el pH deseado. A continuación se añade un floculante para aglomerar los precipitados y mejorar la sedimentación. El diseño del proceso para la neutralización por etapas es específico. El número de reactores requeridos y el pH objetivo en cada reactor se basa en el tipo de metal y la concentración en el agua de la mina que va a tratarse, así como el grado de densidad de lodos deseado.

Este proceso aún no se ha aplicado a escala completa. Aunque se espera excelentes propiedades de lodo y bajo consumo de cal, los costos de capital serían más altos que otros procesos como cuatro reactores de tamaño completo son típicamente necesarios para aplicar correctamente el proceso de SN.

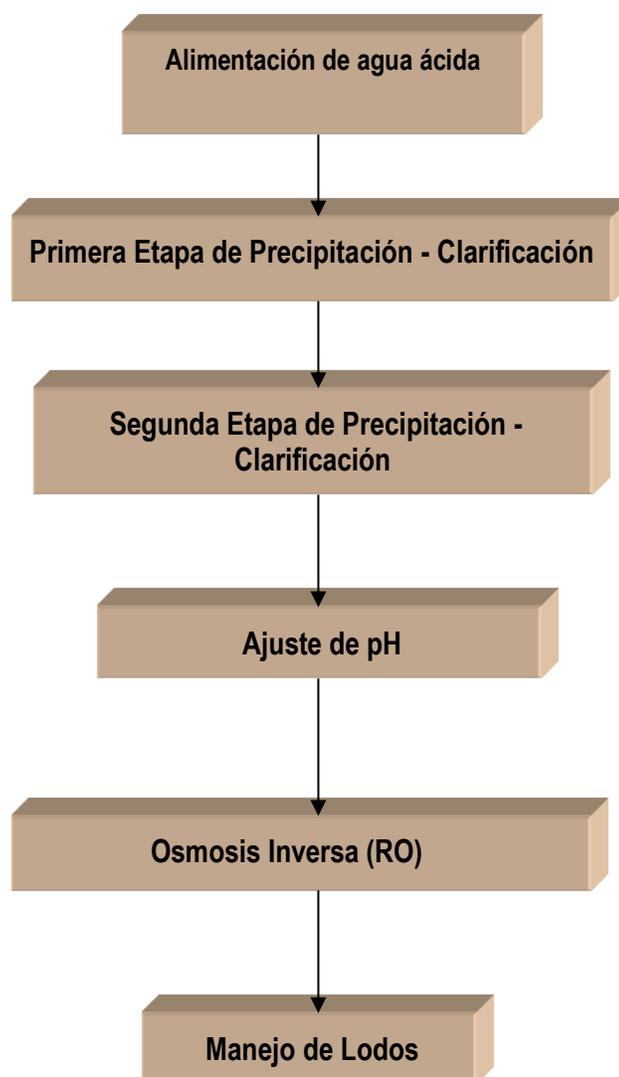
## VI. ACTIVIDADES REALIZADAS EN LA EMPRESA

### 6.1 Actividades cotidianas

#### 6.1.1 Diagrama de bloques del proceso de tecnología de lodos de alta densidad

En la **Figura N° 6.1** se muestra el Diagrama de bloques del Proceso

**Figura N° 6**  
Diagrama de bloques del proceso ARD



### 6.1.2 Descripción del proceso de tecnología de lodos de alta densidad

a) **Alimentación del Agua Residual.**- El agua ácida es alimentada por gravedad con un caudal nominal de 450 m<sup>3</sup>/h desde las pozas ARD ubicadas en el nivel 3 730 del tajo hacia el tanque reactor N° 1 de la Planta ARD

El agua ácida ingresa a la Planta de Tratamiento con un pH entre 2,5 y 3,5; temperatura 15°C con la siguiente composición:

**Tabla N° 1**  
**Composición del agua ácida**

PARÁMETRO	UNIDAD	AGUA ÁCIDA
Conductividad (Laboratorio)	uS/cm	2315
<b>pH (Laboratorio)</b>	<b>Unidades pH</b>	<b>3.14</b>
<b>Sólidos Totales Suspendedos</b>	<b>mg/L</b>	<b>2</b>
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	1594
Cianuro Libre	mg/L	< 0,001
<b>Cianuro Total</b>	<b>mg/L</b>	<b>&lt; 0,001</b>
Cianuro Wad	mg/L	< 0,001
Sulfuros	mg/L	< 0,001
Nitratos, (como N)	mg/L	0,075
Sulfatos, SO <sub>4</sub> – 2	mg/L	15,71
Aluminio (Al)	mg/L	22,31
Antimonio (Sb)	mg/L	< 0,0001
<b>Arsénico (As)</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,0064</b>
Bario (Ba)	mg/L	0,0384
Berilio (Be)	mg/L	0,0045
Bismuto (Bi)	mg/L	< 0,00001
Boro (B)	mg/L	< 0,0007
<b>Cadmio (Cd)</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,10296</b>
Calcio (Ca)	mg/L	144,5
Cobalto (Co)	mg/L	0,14527
<b>Cobre (Cu)</b>	<b>mg/L</b>	<b>1,909</b>
<b>Cromo (Cr)</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,004</b>
Estaño (Sn)	mg/L	< 0,0001
Estroncio (Sr)	mg/L	0,43

Fosforo (P)	mg/L	0,083
Hierro (Fe)	mg/L	34,17
Litio (Li)	mg/L	0,019
Magnesio (Mg)	mg/L	8,793
Manganeso (Mn)	mg/L	18,58
<b>Mercurio (Hg)</b>	<b>mg/L</b>	<b>&lt; 0,00005</b>
Molibdeno (Mo)	mg/L	< 0,0001
Níquel (Ni)	mg/L	0,0339
Plata (Ag)	mg/L	< 0,00001
<b>Plomo (Pb)</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,0172</b>
Potasio (K)	mg/L	8,28
Selenio (Se)	mg/L	0,00692
Silicio (Si)	mg/L	4,21
Sodio (Na)	mg/L	72,11
Talio (Tl)	mg/L	< 0,0001
Titanio (Ti)	mg/L	< 0,001
Uranio (U)	mg/L	0,00821
Vanadio (V)	mg/L	< 0,0001
<b>Zinc (Zn)</b>	<b>mg/L</b>	<b>4,437</b>

Planta ARD – 450

**b) Primera Etapa de Precipitación – Clarificación.-** El sistema se divide en dos etapas de operación.

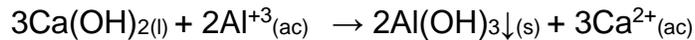
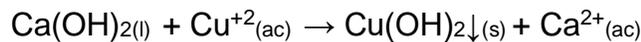
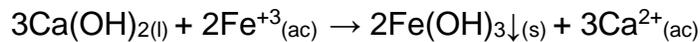
**1) Etapa de Precipitación.-** En el Reactor N° 1 se inicia el proceso químico donde, mediante la adición de lechada de cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) proveniente del tanque de contacto N° 1, se controla el pH entre 6,5 y 7,0 produciéndose la oxidación de los metales presentes en la solución y la precipitación de algunos metales; seguidamente, la solución se transfiere por gravedad hacia el tanque reactor N° 2, en este segundo tanque se terminan de oxidar y precipitar los metales, manteniendo el rango de pH anteriormente mencionado, a valores de pH mayores puede existir una redisolución de especies que se busca precipitar.

El tiempo de residencia de estos tanques es de 1 hora aproximadamente. En esta primera etapa se deberá oxidar y precipitar principalmente Fierro, Zinc, Aluminio y Cobre.

Los tanques reactores contarán con un sistema de agitación mecánica y con deflectores laterales para impedir la formación de vórtices, también tendrán en el fondo un cono de esparcimiento de aire, el cual entregará el oxígeno necesario para la oxidación de los metales.

La solución que sale del tanque reactor N° 2 contiene precipitados de metales y otros sólidos en suspensión los cuales serán separados en el clarificador reactor N° 1

#### Reacciones:



**2) Etapa de Clarificación.-** El clarificador reactor N° 1 es alimentado desde un tanque desaireador que recibe el flujo proveniente desde el tanque reactor N° 2 y en el cual se adiciona floculante para favorecer la precipitación. La descarga inferior del clarificador reactor N° 1, correspondiente a los lodos será recirculada por una bomba centrífuga con variador de frecuencia al tanque de contacto N° 1 La bomba tiene la capacidad para recircular una fracción del volumen total (35% aprox.) actuando como núcleos o semillas que ayudarán a la formación de sólidos de mayor tamaño.

Además, existe una segunda bomba que impulsará los lodos de manera discreta o discontinua hacia el tanque de manejo de lodos, desde este tanque los lodos son bombeados hacia una cisterna que los transportará hacia las pozas de disposición de lodos 1 y 2 existentes, como purga de material desde el clarificador reactor N° 1

**Figura N° 7**  
**Reactor N°1**



Planta ARD – 450

El rebose del clarificador reactor N° 1 será descargado por gravedad en el tanque reactor N° 3

**3) Segunda Etapa de Precipitación- Clarificación.-** Esta etapa se puede dividir en dos etapas de operación.

– **Etapa de Precipitación.-** Al igual que en la etapa anterior, el control químico del proceso se realiza a través del control del pH mediante la adición de lechada de cal proveniente del tanque de contacto N° 2, la precipitación de especies en esta segunda etapa es óptima a un valor de pH entre 10,3 y 10,8 La solución se transfiere por gravedad desde el tanque reactor N° 3 hacia el tanque reactor N° 4.

**Figura N° 8**  
**Clarificador reactor N°1**

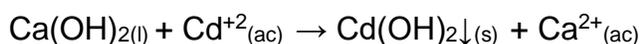
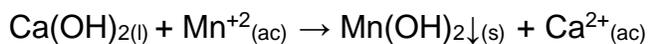


Planta ARD - 450

El tiempo de residencia de estos tanques es de 1 hora aproximadamente. En esta primera etapa se deberá oxidar y precipitar principalmente Cadmio y Manganeso.

La solución que sale del tanque reactor N° 4 contiene precipitados de metales y otros sólidos en suspensión, los cuales serán separados en el clarificador reactor N° 2.

**Reacciones:**



- **Etapas de Clarificación.-** El clarificador reactor N° 2 es alimentado desde un tanque desaireador que recibe el flujo proveniente desde el tanque reactor N° 4 y en el cual se adiciona floculante para favorecer la precipitación. La descarga inferior del clarificador reactor N° 2, correspondiente a los lodos será recirculada por una bomba centrífuga con variador de frecuencia al tanque de contacto N° 2. La bomba tiene la

capacidad para recircular una fracción del volumen total (35% aprox.) actuando como núcleos o semillas que ayudarán a la formación de sólidos de mayor tamaño.

**Figura N° 9**  
**Reactor N°3**



ARD – 450

Además, existe una segunda bomba que impulsará los lodos de manera discreta o discontinua hacia el tanque de manejo de lodos, desde este tanque los lodos son bombeados hacia una cisterna que los transportará hacia las pozas de disposición de lodos 1 y 2 existentes, como purga de material desde el clarificador reactor N° 2

Una fracción del rebose del clarificador reactor N° 2 (agua tratada) será enviada al tanque de agua tratada para ser usada en la preparación de reactivos o como agua de servicio, la otra fracción será transferida por gravedad hacia la planta de ajuste de pH.

**Figura N° 10**  
**Clarificador reactor N° 2**



ARD – 450

- 4) Regulación del pH.-** El agua tratada producto de la Planta ARD tiene un pH mayor a 8.5, el cual es el límite máximo requerido para alimentar la planta RO o para descargar a la quebrada. Por lo tanto, se ha instalado una planta de ajuste de pH que utiliza ácido sulfúrico como reactivo. La planta se ha diseñado para obtener un valor objetivo entre 6,5 a 9,0 unidades de pH

Esta fase se divide en las siguientes dos etapas:

- **Ácido Sulfúrico.-** El ácido sulfúrico se encuentra ubicado en una estación especialmente diseñada para descargar el ácido en forma segura y controlada. La descarga de ácido desde el camión hacia el tanque horizontal de almacenamiento será por gravedad.

Desde el tanque horizontal, el ácido sulfúrico se dosificará hacia la tubería de alimentación de agua tratada a los tanques mezcladores con unas bombas dosificadoras (una operando y una en stand by).

- **Ajuste de pH.-** El ajuste de pH se realizará en dos tanques mezcladores (tanque mezclador N° 1 y tanque mezclador N° 2) con agitación mecánica. Estos tanques mezclarán y homogenizarán el ácido sulfúrico que se inyectará en la alimentación de los mismos. La dosificación de

ácido será tal que pequeñas cantidades serán necesarias para dejar óptima la calidad de agua, en conjunto con una agitación adecuada para su correcta homogenización.

Ambos tanques operarán en serie. El producto del segundo tanque alimentará por gravedad la planta de osmosis inversa. El diseño además considera dejar fuera de servicio (bypass), un tanque o los dos, en caso de requerirse.

**Figura 11**  
**Tanques mezcladores**



ARD-450

### **5) Proceso de membranas:**

- **Ultrafiltración.-** El objetivo de la ultrafiltración es realizar un control de los sólidos suspendidos en la entrada de agua hacia la planta de osmosis inversa, lo que evitará la colmatación de las membranas y maximizará la vida útil de estas.

El agua clarificada desde el ajuste de pH alimentará un tanque de 50 m<sup>3</sup> de volumen útil que a su vez alimentará la etapa de ultrafiltración (UF). El permeado de esta etapa será enviado hacia un tanque de 50 m<sup>3</sup> de

volumen útil que alimentará la etapa de osmosis inversa (RO, por sus siglas en inglés)

El sistema está compuesto por 2 skids de 20 vessel cada uno. El flujo de ingreso al sistema de Ultrafiltración es de 100 m<sup>3</sup>/h

El sistema tiene una recuperación del 90% siendo el producto 90 m<sup>3</sup>/h y el rechazo 10 m<sup>3</sup>/h. cada skid produce 45 m<sup>3</sup>/h y rechaza 5 m<sup>3</sup>/h.

**Figura N° 12**  
**Sistema de Ultrafiltración**



ARD – 450

- **Ósmosis Inversa.**- La osmosis inversa es un proceso de separación por membrana donde el contenido de cationes y aniones, es removido por una membrana semipermeable. Esta membrana principalmente reduce los sulfatos presentes en la solución. Para que este proceso ocurra se debe aplicar un diferencial de presión que genera un desplazamiento de la solución.

El producto de la osmosis inversa se descargará en un tanque de permeado de 50 m<sup>3</sup> de volumen útil. Parte del agua permeada se recirculará hacia las etapas de ultrafiltración y osmosis inversa para los ciclos de retrolavado, mientras que el resto se descargará al medioambiente.

De esta forma, el agua generada de la planta de osmosis inversa será utilizada para proveer un volumen nominal de 18 L/s (65 m<sup>3</sup>/h) durante la temporada seca hacia las comunidades de la quebrada Pucaurán.

Los rechazos producidas en ambas etapas (UF y RO) serán enviadas hacia el tanque de retrolavados de 50 m<sup>3</sup> de volumen útil, para luego ser impulsadas hacia el tanque reactor N° 1

El flujo de ingreso a la Planta de Ósmosis Inversa es de 82 m<sup>3</sup>/h y tiene una recuperación del 80%, rechazando 17 m<sup>3</sup>/h.

**Figura N° 13**  
**Sistema de ósmosis inversa**



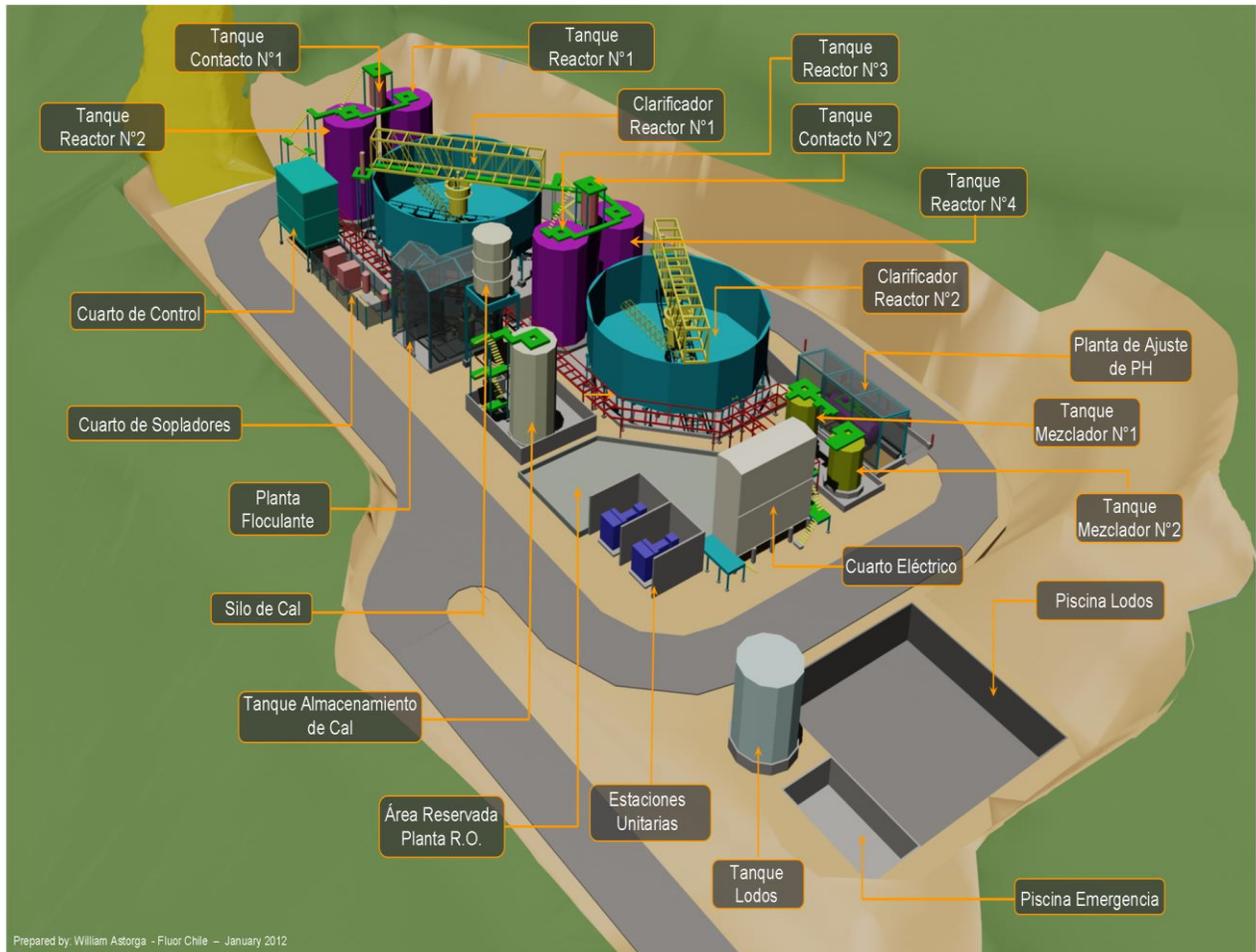
Planta ARD – 450

- 6) Manejo de lodos.**- El sistema se ha diseñado de manera que el envío hacia el tanque de manejo de lodos podrá ser desviado hacia la poza de lodos de la planta ARD 450. Esta poza tiene una bomba portátil para retornar los lodos de la poza hacia el tanque.

El tanque de manejo de lodos tiene también una línea de rebose que conducirá el material hacia la poza de lodos. La descarga del tanque de

manejo de lodos será bombeada por una bomba de descarga de lodos hacia camiones cisterna para el transporte y disposición de los lodos en las pozas de lodos 1 y 2 existentes.

**Figura N° 14**  
**Disposición de equipos en la planta ARD – 450**

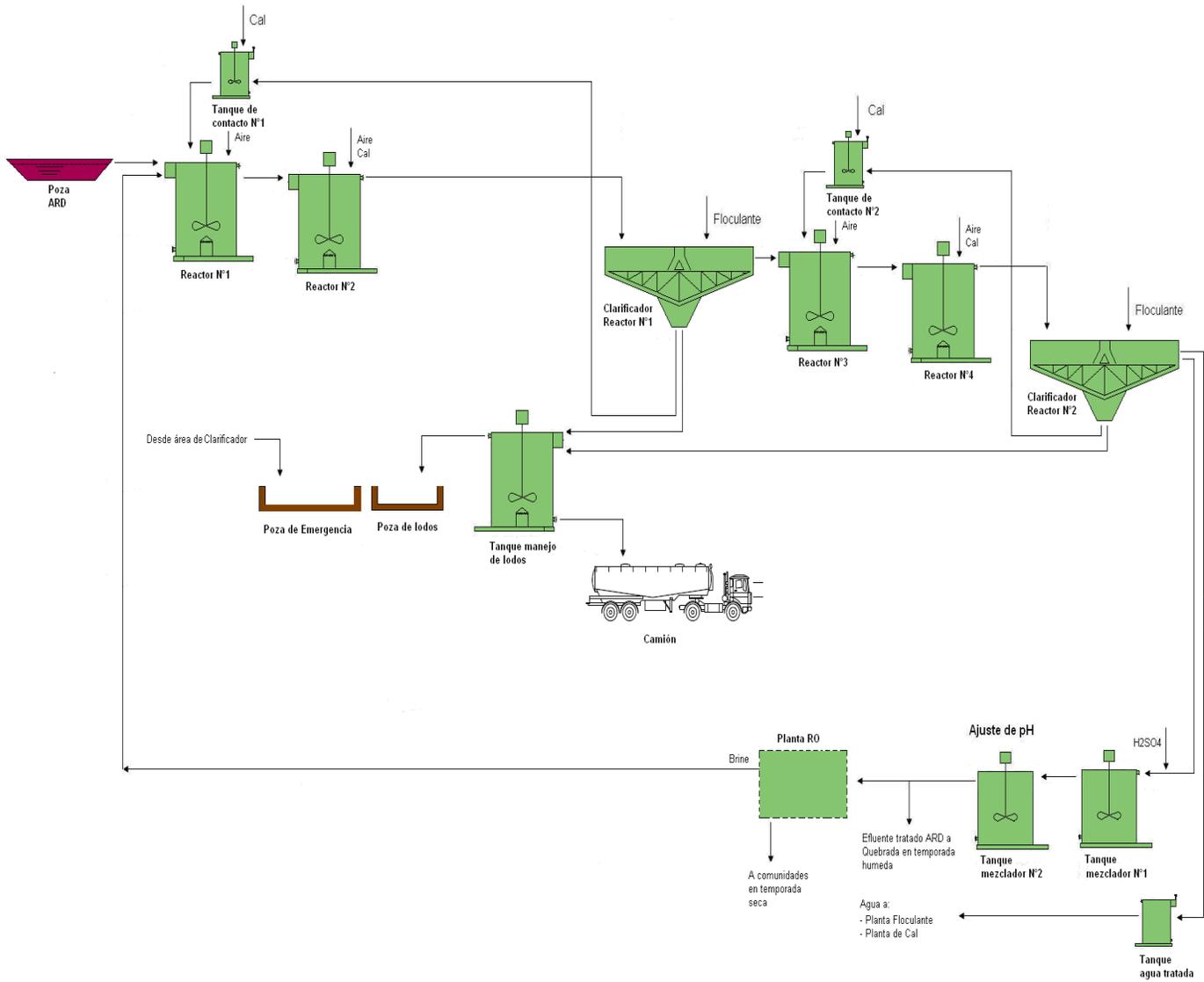


Planta ARD – 450

### 6.1.3 Diagrama de flujo de procesos

A continuación, se describe el Diagrama de Procesos de la Planta ARD – 450.

**Figura N° 15**  
**Diagrama de procesos de la planta ARD**



#### 6.1.4 Monitoreo de parámetros

A continuación, se describen los puntos de muestreo y los parámetros a medir en la Planta.

- a) **Poza ARD.**- En este punto se hace la medición de pH y se toma muestra para el análisis de metales porque en este punto se ubica el agua de ingreso a la planta.

pH: 2,5 – 3,5

Metales a medir: Hierro, cobre, aluminio, zinc, manganeso, cadmio, mercurio, arsénico, cromo, plomo.

- b) **Reactor 1 y Reactor 2.**- En este punto se hace la medición de pH y se toma muestra para el análisis de metales totales y disueltos; en este punto deben de precipitar el hierro, cobre, zinc y aluminio,

pH: 6,5 – 7,0

Metales a medir: Hierro, cobre, aluminio, zinc, manganeso, cadmio, mercurio, arsénico, cromo, plomo.

- c) **Reactor Clarificador 1.**- En este punto se hace la medición de pH y se toma muestra para el análisis de metales totales y disueltos; en este punto el agua clarificada debe de estar libre de metales disueltos tales como hierro, cobre, zinc y aluminio.

pH: 7,0

Metales a medir: Hierro, cobre, aluminio, zinc, manganeso, cadmio, mercurio, arsénico, cromo, plomo.

- d) **Reactor 3 y Reactor 4.**- En este punto se hace la medición de pH y se toma muestra para el análisis de metales totales y disueltos; en este punto deben de precipitar el cadmio y manganeso.

pH: 10,5 – 10,8

Metales a medir: Hierro, cobre, aluminio, zinc, manganeso, cadmio, mercurio, arsénico, cromo, plomo.

- e) **Reactor Clarificador 2.**- En este punto se hace la medición de pH y se toma muestra para el análisis de metales totales y disueltos; en este punto el agua

clarificada debe de estar libre de metales disueltos tales como cadmio y manganeso.

pH: 10,8

Metales a medir: Hierro, cobre, aluminio, zinc, manganeso, cadmio, mercurio, arsénico, cromo, plomo.

- f) Tanque de Ajuste de pH 2.-** En este punto se hace la medición de pH y se toma muestra para el análisis de metales totales y disueltos; en este punto el agua debe de cumplir los LMP para descargas de efluentes mineros.

pH: 8,5

Metales a medir: Hierro, cobre, aluminio, zinc, manganeso, cadmio, mercurio, arsénico, cromo, plomo.

## **6.2 Actividades realizadas en beneficio de la empresa**

Actualmente se está trabajando en disminuir la cantidad de sulfatos en el agua de salida del tratamiento de ARD esto debido a que parte del agua producto del tratamiento ARD ingresa a la planta de ósmosis inversa la cual está diseñada para tratar 700 ppm de Sulfatos y actualmente están ingresando un promedio de 1400 ppm de sulfatos, ocasionando así severas incrustaciones en las membranas.

Las pruebas consisten en disminuir el pH en la segunda etapa del ARD con la finalidad de optimizar el consumo de ácido sulfúrico porque el ácido sulfúrico en una fuente de aumento de sulfatos en el agua.

También se está tratando de subir el pH en la primera etapa hasta 8 para que los iones sulfatos precipiten en la primera etapa como sulfato de calcio.

Otra de las pruebas que se están realizando en laboratorio es precipitar los sulfatos mediante sales de aluminio.

## VII. DISCUSIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados que se han obtenido del tratamiento de aguas ácidas de mina mediante la tecnología de Lodos de Alta Densidad (HDS) en dos etapas.

A continuación, se presenta la tabla N° 1 en donde se recopila un promedio de los resultados de 6 meses de operación de la Planta ARD – 450

**Tabla N° 2**

***Reducción de Metales Pesados por tratamiento de Lodos de Alta Densidad (HDS)***

PARÁMETRO	UNIDAD	AGUA ÁCIDA	AGUA TRATADA	AGUA PERMEADA (RO)
Conductividad (Laboratorio)	uS/cm	2315	2243	20,6
<b>pH (Laboratorio)</b>	<b>Unidades pH</b>	<b>3,14</b>	<b>8,33</b>	<b>8,1</b>
<b>Sólidos Totales Suspendidos</b>	<b>mg/L</b>	<b>2</b>	<b>&lt; 2</b>	<b>&lt; 2</b>
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	1594	1500	13,36
Cianuro Libre	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<b>Cianuro Total</b>	<b>mg/L</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
Cianuro Wad	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Sulfuros	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Nitratos, (como N)	mg/L	0,075	4,252	0,679
Sulfatos, SO4-2	mg/L	15,71	1081	1,969
Aluminio (Al)	mg/L	22,31	0,057	< 0,001
Antimonio (Sb)	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
<b>Arsénico (As)</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,0064</b>	<b>&lt; 0,0003</b>	<b>&lt; 0,0003</b>
Bario (Ba)	mg/L	0,0384	0,0096	< 0,0001
Berilio (Be)	mg/L	0,0045	< 0,00004	< 0,00004
Bismuto (Bi)	mg/L	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Boro (B)	mg/L	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007
<b>Cadmio (Cd)</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,10296</b>	<b>&lt; 0,00003</b>	<b>&lt; 0,00003</b>
Calcio (Ca)	mg/L	144,5	324,2	< 0,02
Cobalto (Co)	mg/L	0,14527	0,02048	< 0,00004
<b>Cobre (Cu)</b>	<b>mg/L</b>	<b>1,909</b>	<b>0,0748</b>	< 0,0003
<b>Cromo (Cr)</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,004</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>
Estaño (Sn)	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Estroncio (Sr)	mg/L	0,43	0,5309	< 0,0004

Fosforo (P)	mg/L	0,083	0,025	< 0,001
Hierro (Fe)	mg/L	34,17	0,149	< 0,001
Litio (Li)	mg/L	0,019	0,02	< 0,001
Magnesio (Mg)	mg/L	8,793	1,977	< 0,004
Manganeso (Mn)	mg/L	18,58	0,0151	< 0,0002
<b>Mercurio (Hg)</b>	<b>mg/L</b>	<b>&lt; 0,00005</b>	<b>&lt; 0,00005</b>	<b>&lt; 0,00005</b>
Molibdeno (Mo)	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Níquel (Ni)	mg/L	0,0339	0,0078	< 0,0002
Plata (Ag)	mg/L	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
<b>Plomo (Pb)</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,0172</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>
Potasio (K)	mg/L	8,28	9,741	< 0,0008
Selenio (Se)	mg/L	0,00692	0,00571	< 0,00005
Silicio (Si)	mg/L	4,21	2,64	< 0,02
Sodio (Na)	mg/L	72,11	83,55	< 0,09
Talio (Tl)	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Titanio (Ti)	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Uranio (U)	mg/L	0,00821	< 0,00001	< 0,00001
Vanadio (V)	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
<b>Zinc (Zn)</b>	<b>mg/L</b>	<b>4,437</b>	<b>0,012</b>	< 0,003
Aluminio Disuelto (Al)	mg/L	22,14	0,041	< 0,001
Antimonio Disuelto (Sb)	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Arsénico Disuelto (As)	mg/L	0,0035	< 0,0003	<b>&lt; 0,0003</b>
Bario Disuelto (Ba)	mg/L	0,0382	0,0093	< 0,0001
Berilio Disuelto (Be)	mg/L	0,00445	< 0,00004	< 0,00004
Bismuto Disuelto (Bi)	mg/L	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Boro Disuelto (B)	mg/L	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007
Cadmio Disuelto (Cd)	mg/L	0,10245	< 0,00003	<b>&lt; 0,00003</b>
Calcio Disuelto (Ca)	mg/L	143,3	324,1	< 0,02
Cobalto Disuelto (Co)	mg/L	0,14419	0,02041	< 0,00004
Cobre Disuelto (Cu)	mg/L	1,904	0,0591	< 0,0003
Cromo Disuelto (Cr)	mg/L	0,0038	< 0,0001	<b>&lt; 0,0001</b>
Estaño Disuelto (Sn)	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Estroncio Disuelto (Sr)	mg/L	0,4251	0,5239	< 0,0004
Fosforo Disuelto (P)	mg/L	0,05	< 0,004	< 0,001
<b>Hierro Disuelto (Fe)</b>	<b>mg/L</b>	<b>32,99</b>	<b>0,074</b>	< 0,001
Litio Disuelto (Li)	mg/L	0,018	0,019	< 0,001

Magnesio Disuelto (Mg)	mg/L	8,791	1,968	< 0,004
Manganeso Disuelto (Mn)	mg/L	18,39	0,0102	< 0,0002
Mercurio Disuelto (Hg)	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005
Molibdeno Disuelto (Mo)	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Niquel Disuelto (Ni)	mg/L	0,0334	0,0046	< 0,0002
Plata Disuelta (Ag)	mg/L	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Plomo Disuelto (Pb)	mg/L	0,017	< 0,0001	< 0,0001
Potasio Disuelto (K)	mg/L	8,245	9,74	< 0,0008
Selenio Disuelto (Se)	mg/L	0,00652	0,00521	< 0,00005
Silicio Disuelto (Si)	mg/L	4,17	2,62	< 0,02
Sodio Disuelto (Na)	mg/L	71,84	83,25	< 0,09
Talio Disuelto (Tl)	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Titanio Disuelto (Ti)	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Uranio Disuelto (U)	mg/L	0,0082	< 0,00001	< 0,00001
Vanadio Disuelto (V)	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Zinc Disuelto (Zn)	mg/L	4,432	0,007	< 0,003

Planta ARD – 450

En la **Tabla N° 1 (Ver pag. N° 26)** se puede apreciar la reducción de metales pesados y otros iones presentes en el agua ácida proveniente de los drenajes ácidos de la mina; cabe resaltar también el aumento del ion Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) esto debido a que en la última etapa del tratamiento de drenaje ácido de mina se utiliza ácido sulfúrico para ajustar el pH de 10,8 a 8,5 Así también se ve un aumento del ión Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) esto porque se utiliza hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para inducir la precipitación de los metales pesados.

Los metales resaltados de color azul son los metales cuyos valores deben de cumplir los límites máximos permisibles estipulados en el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM, los cuales se resumen en la **Tabla N° 2 (Ver pag N° 40)**

**Tabla N° 3**  
**Límites Máximos Permisibles para descargas de efluentes líquidos de Actividades**  
**Minero-Metalúrgicos**

PARÁMETRO	UNIDAD	AGUA ÁCIDA	AGUA TRATADA	PORCENTAJE DE REMOCIÓN (%)	LÍMITE EN TODO MOMENTO	LÍMITE PARA EL PROMEDIO ANUAL
pH (Laboratorio) *	Unidades pH	3,14	8,33	-	6 – 9	6 – 9
Sólidos Totales Suspendidos	mg/L	2	< 2	-	50	25
Cianuro Total	mg/L	<0,001	<0,001	-	1	0,8
Arsénico (As)	mg/L	0,0064	< 0,0003	99,90	0,1	0,08
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10296	< 0,00003	99,90	0,05	0,04
Cobre (Cu)	mg/L	1,909	0,0748	96,10	0,5	0,4
Cromo (Cr)	mg/L	0,004	< 0,0001	99,90	0,1	0,08
Mercurio (Hg)	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	-	0,002	0,0016
Plomo (Pb)	mg/L	0,0172	< 0,0001	99,90	0,2	0,16
Zinc (Zn)	mg/L	4,437	0,012	99,73	1,5	1,2
Hierro Disuelto (Fe)	mg/L	32,99	0,074	99,78	2	1,6
Aceites y Grasas	mg/L	< 1	< 1	-	20	16

Planta ARD – 450

En la **Tabla N° 2 (Ver pag. N° 40)** se puede apreciar que la Minera Barrick – Pierina cumple con los LMP establecidos por la Normativa vigente.

## VIII. CONCLUSIONES

- 1) La caracterización del drenaje ácido de mina fue realizada por medio de análisis ICP en un Laboratorio externo de la Unidad Minera.
- 2) Según los valores promedio del agua tratada se puede apreciar que Minera Barrick Misquichilca Unidad Minera Pierina cumple con los Límites Máximos Permisibles para descargas de efluentes líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicos.
- 3) El porcentaje de remoción de metales estipulados por los LMP para descargas de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas en el proceso HDS de Minera Barrick – Pierina supera el 90%.
- 4) Se puede apreciar un aumento significativo en la concentración del ión Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de un valor de 15,71 a 1 081 ppm, esto debido a la adición de ácido sulfúrico para llevar el pH de 10,80 a 8,50 en la etapa de ajuste de pH.
- 5) La dosificación de hidróxido de calcio para la precipitación de los metales pesados induce al aumento de iones calcio en el agua y por ende induce la precipitación de Sulfato de Calcio cuyos cristales generan incrustamiento en las tuberías.
- 6) El porcentaje de sólidos en el lodo generado por el tratamiento de aguas ácidas de Minera Barrick Misquichilca – Pierina en la primera Etapa del Tratamiento es de 15% y en la Segunda Etapa es de 20%.

## **IX. RECOMENDACIONES**

- 1)** Evaluar la posibilidad de tratar la concentración de ión Sulfato con el fin de reducirla porque luego de la etapa de ajuste de pH existe una derivación hacia la Planta de Ósmosis Inversa la cual ha sido diseñada para operar con una concentración de Sulfatos de aproximadamente 500 ppm y actualmente se está alimentando con aproximadamente el doble (1 080 ppm), lo cual resulta perjudicial para las membranas de ósmosis inversa porque al unirse con el ión Calcio forma cristales que llegan a incrustar dichas membranas.
- 2)** Optimizar la dosificación de Hidróxido de Calcio con el fin de no generar mucho residual de ión calcio el cual pueda unirse al ion sulfato y formar así incrustaciones de sulfato de calcio.
- 3)** Realizar diariamente pruebas de jarras con la finalidad de optimizar la dosificación de floculante en ambas etapas del proceso.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- A. Mezei; C. A. Fleming; SGS Minerals Services “WATER TREATMENT ALTERNATIVES FOR ACID ROCK DRAINAGE”. Project 12449-001, Canadá, December 2010
- A. Mezei; M. Canizares; SGS Minerals Services “WATER TREATMENT ALTERNATIVES FOR ACID ROCK DRAINAGE SOLUTIONS FROM THE PIERINA MINE”. Project 13479-003, Canadá, April 2012
- Aubé Bernard & Zinck Janice, (2003) “Lime Treatment of Acid Mine Drainage in Canada”, Presentado y publicado en “Brazil-Canada Seminar on Mine Rehabilitation”, Florianópolis, Brasil, Diciembre 1-3
- Demopoulos, G.P., Zinck, J.M. and Kondos, P.D., 1997. Multiple Stage Precipitation of Heavy Metals from Acidic Aqueous Solutions., U.S. Patent # 5,672,280. September 30, 1997
- Ministerio de Energia y Minas del Perú. Guía ambiental para el manejo del drenaje ácido de Minas. Disponible On line: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/manedrenaje.pdf>
- J. J Donovan, J Frazier, P.F. Ziemkiewics; “Experimental Injection of Alkaline Lime Slurry for In Situ”. Canadá, December, 1999
- Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc; ICARD 2000; “Proceedings from the fifth International Conference on Acid Rock Drainage”. USA, 2000
- Villachica, Carlos; Llamosas Jaime y Villachica Joyce; SMALLVILL S.A.C. – CONSULCONT S.A.C. Proceso NCD “Tecnología Nacional comprobada para el tratamiento de efluentes ácidos mineros”, tomado del IV Congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería y Metalurgia, 13-16 de Julio del 2005.

## **ANEXOS**

- ANEXO 1 : LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE ACTIVIDADES MINERO - METALÚRGICA**
- ANEXO 2 : CONSUMOS ESTIMADOS DE REACTIVOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA**

## ANEXO Nº 1

### LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE ACTIVIDADES MINERO - METALÚRGICAS

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales en Suspensión	en mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

## ANEXO 2

### CONSUMOS ESTIMADOS DE REACTIVOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

PLANTA ARD-450		
REACTIVO	RATIO (Kg/m <sup>3</sup> )	CONSUMO MENSUAL (TN/mes)
CAL (CaO)	0,700	226,800
FLOCULANTE	0,006	1,944
ÁCIDO SULFÚRICO	0,350	113,400