

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**CARACTERIZACIÓN DE EFLUENTES DE MINA
PARA ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA DE
TRATAMIENTO**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO DE MINAS**, que presenta el bachiller:

MAYRA INÉS MONTESINOS LEÓN

ASESOR: OSVALDO ADUVIRE PATACA

Lima, Enero del 2017

Resumen de tesis

La presente tesis tiene como propósito identificar la alternativa óptima de tratamiento de efluentes de mina tomando como base la caracterización física-química de los drenajes, la caracterización geoquímica de materiales mineros y la evaluación en laboratorio de alternativas de tratamiento.

En el Capítulo 1 a modo de Introducción se realiza una breve descripción de la situación actual del país respecto de los drenajes de mina, abarcando desde el daño ambiental producido por pasivos mineros hasta los distintos conflictos sociales que hoy en día han detenido más de 20,000 millones de dólares de inversiones en el sector.

En el Capítulo 2 se desarrolla el Marco Teórico del tema donde se describe los mecanismos de formación del drenaje ácido, su caracterización, control y la descripción de sus distintos tratamientos tanto activos como pasivos.

En el Capítulo 3 se describe el Marco Legal actual del país en relación al manejo de efluentes en el Sector Minero.

Teniendo en cuenta que para el desarrollo de la tesis se han utilizado materiales y efluentes de dos unidades mineras, en el Capítulo 4 se describe la ubicación de estas y sus características ambientales más representativas.

En el Capítulo 5 se describe el Desarrollo Experimental de la tesis que abarca la caracterización de materiales y efluentes provenientes de cada unidad minera, los ensayos de laboratorio a los que fueron sometidos los efluentes para determinar los rangos de operación de los procesos de neutralización, precipitación y remoción de las fases sólidas formadas y la elección de la alternativa de tratamiento óptima para cada efluente.

Para finalizar en el Capítulo 6 se plasman las conclusiones y recomendaciones planteadas luego del desarrollo de la presente tesis.

TEMA DE TESIS

PARA OPTAR : Título de Ingeniero de Minas
ALUMNO : Mayra Inés Montesinos León
CÓDIGO : 20050473
PROPUESTO POR : Dr. Ing. Adolfo Pillihuaman Zambrano
ASESOR : Dr. Osvaldo Aduvire Pataca
TEMA : Caracterización de efluentes de mina para elección de la alternativa óptima de tratamiento
No. TEMA : # 145
FECHA : San Miguel, 12 de octubre del 2016.



OBJETIVOS

Objetivo principal

- Identificar la alternativa óptima del tratamiento de efluentes de mina a partir de su caracterización.

Objetivos secundarios

- Cumplir la legislación minero ambiental vigente en el Perú para efluentes mineros.
- Evaluar alternativas de tratamiento de efluentes y comparar su efectividad en base a aspectos económicos.
- Caracterizar materiales y residuos mineros para promover el manejo preventivo y reducir la generación ácida.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO:

La presente tesis tiene como propósito identificar la alternativa óptima de tratamiento de efluentes. La base del estudio se centra en la caracterización física-química de los efluentes, la evaluación en laboratorio de alternativas de tratamiento y la caracterización geoquímica de materiales mineros para promover el manejo preventivo y reducir la generación ácida.

Handwritten signature/initials.

PLAN DE TRABAJO:

- Revisión de la normativa ambiental relacionada con los efluentes mineros.
- Caracterización físico-química de los efluentes a partir de mediciones en campo y análisis de las muestras de agua.
- Someter a las muestras de efluentes a ensayos de laboratorio con el fin de comparar los resultados obtenidos.
- Caracterización geoquímica de materiales y residuos mineros.

Máximo: 100 páginas


Dr. Ing. Adolfo Pillihuáman Zambrano
Coordinador
Especialidad de Ingeniería de Minas




Dr. Ing. Osvaldo Aduvire Patáca
Asesor



Índice

1	Introducción	1
1.1	Planteamiento del problema	1
1.2	Hipótesis	3
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo principal	3
1.3.2	Objetivos secundarios	3
2	Marco teórico	4
2.1	Mecanismos de formación del agua ácida	5
2.1.1	Etapas en la formación del agua ácida	5
2.1.2	Reacciones principales en la generación de agua ácida (Oxidación de la Pirita)	7
2.1.3	Factores que influyen en la velocidad de formación de aguas ácidas	8
2.2	Caracterización de materiales mineros	9
2.2.1	Pruebas Estáticas	10
2.2.2	Pruebas de Lixiviación	13
2.2.3	Pruebas Cinéticas	14
2.2.4	Mineralogía	15
2.3	Caracterización de aguas de mina	16
2.4	Control de los drenajes ácidos	17
2.5	Tratamiento de aguas ácidas	18
2.5.1	Tratamiento por métodos activos	21
2.5.2	Tratamiento por métodos pasivos	22
3	Marco legal	24
3.1	Marco institucional	24
3.1.1	Estado Peruano	24
3.1.2	Ministerio del Ambiente (MINAM)	24
3.1.3	Ministerio de Energía y Minas (MINEM)	25
3.1.4	Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI)	26
3.2	Marco normativo	26
4	Características de las zonas de estudio	28
4.1	Mina 1	28
4.2	Mina 2	30
5	Desarrollo experimental	33
5.1	Metodología aplicada	33
5.1.1	Caracterización de materiales mineros	33

5.1.2	Caracterización de efluentes	34
5.2	Muestras de Mina 1	37
5.2.1	Caracterización de materiales mineros.....	37
5.2.2	Caracterización de efluentes	43
5.2.3	Elección de alternativa de tratamiento	53
5.3	Muestras de Mina 2	57
5.3.1	Caracterización de materiales mineros.....	57
5.3.2	Caracterización de efluentes	58
5.3.3	Elección de alternativa de tratamiento	69
6	Conclusiones y recomendaciones.....	73
6.1	Conclusiones	73
6.2	Recomendaciones	74
7	Bibliografía.....	76



Índice de tablas

Tabla 2-1: Criterio de Clasificación NPR= NP/AP	11
Tabla 2-2: Clasificación de rocas por Contenido de Azufre y Relación Acido/Base	12
Tabla 2-3: Caracterización de Materiales por el Criterio NAG.....	13
Tabla 2-4: Clasificación de los drenajes de mina	17
Tabla 4-1: Calidad de las aguas en cuerpos receptores (Mina 1)	29
Tabla 4-2: Calidad de las aguas naturales (Mina 2).....	31
Tabla 4-3: Calidad de las aguas en cuerpos receptores (Mina 2)	32
Tabla 5-1: Métodos de Referencia de Análisis de Calidad de Agua.....	35
Tabla 5-2: Resultados ABA	37
Tabla 5-3: Resultados Ensayo NAG	39
Tabla 5-4: Resultados de las pruebas SPLP	40
Tabla 5-5: Análisis Mineralógico por DRX.....	41
Tabla 5-6: Características de los efluentes de Mina 1.....	44
Tabla 5-7: Descripción de muestras ensayadas	46
Tabla 5-8: Concentración de metales Post tratamiento.....	52
Tabla 5-9: Ensayo de costos preliminar (Al y Zn).....	56
Tabla 5-10: Caracterización ácido/base de los Relaves y Desmontes	57
Tabla 5-11: Características de los efluentes de Mina 2.....	59
Tabla 5-11: Descripción de muestras ensayadas	61
Tabla 5-13: Concentración de metales Post tratamiento.....	68
Tabla 5-9: Ensayo de costos preliminar (Al y Zn).....	72

Índice de figuras

Figura 1-1: Perú: Conflictos sociales en cifras	2
Figura 2-1: Elementos que intervienen en la formación del DAM.....	5
Figura 2-2: Etapas en la formación de aguas ácidas	6
Figura 2-3: Solubilidad de hidróxidos metálicos en función al pH.....	19
Figura 2-4: Sistemas de Tratamiento Activo - Pasivo.....	20
Figura 2-5: Árbol de decisión del drenaje ácido	21
Figura 5-1: Instrumentación de laboratorio.....	36
Figura 5-2: Agitador Magnético y Cal Viva Cal Sur	37
Figura 5-3: Relación NP y AP	38
Figura 5-4: Relación NP/AP y %S.....	38
Figura 5-5: Criterio NAG	39

Figura 5-6: Contenido de Minerales en la muestra de relave (%Peso).....	42
Figura 5-7: Valores de pH de cada efluente.....	43
Figura 5-8: Contenido de metales de importancia medioambiental en la muestra Nv. 245	
Figura 5-9: Valores de pH de cada efluente previo al inicio de los ensayos	46
Figura 5-10: Procedimiento N°1 para Nv. 2A.....	48
Figura 5-11: Procedimiento N°1 para Nv. 2B	49
Figura 5-12: Procedimiento N°1 para Nv. 2C	51
Figura 5-13: Consumo de Cal – pH	53
Figura 5-14: Consumo de cal en el Ensayo Nv.2 B.....	54
Figura 5-15: Consumo de cal en el Ensayo Nv.2 C.....	55
Figura 5-16: Evaluación de la Generación Acida	57
Figura 5-17: Valores de pH de cada efluente.....	58
Figura 5-18: Contenido de metales de importancia medioambiental en la muestra Nv. +40	60
Figura 5-19: Valores de pH de cada efluente previo al inicio de los ensayos	61
Figura 5-20: Resultados del ensayo Nv.+40A.....	62
Figura 5-21: Resultados de ensayos realizados mediante Procedimiento N°1.....	64
Figura 5-22: Resultados del ensayo Nv.+40B.....	65
Figura 5-23: Resultados del ensayo Nv.0B	66
Figura 5-24: Resultados del ensayo Nv.-40B.....	66
Figura 5-25: Resultados del ensayo R-4B	66
Figura 5-26: Resultados de ensayos realizados mediante Procedimiento N°2.....	67
Figura 5-27: Consumo de Cal - pH	69
Figura 5-28: Consumo de cal en el Ensayo Nv.+40A.....	70
Figura 5-29: Consumo de cal en el Ensayo Nv.+40B.....	70

1 Introducción

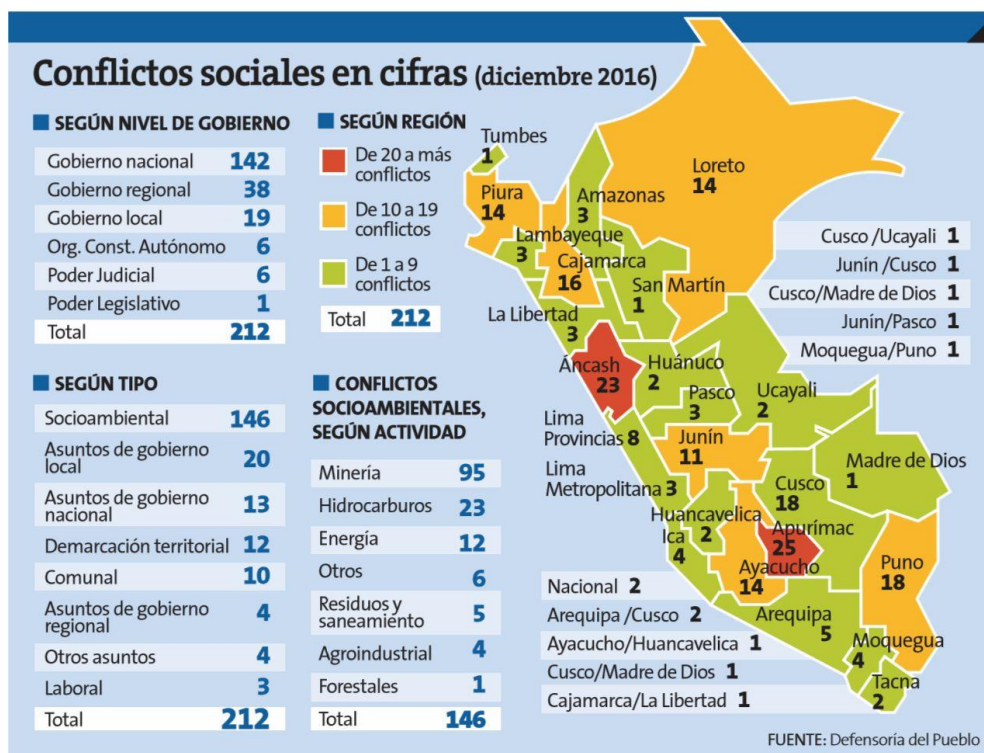
1.1 Planteamiento del problema

La historia nos dice que desde los inicios de la civilización, los seres humanos utilizaron piedras, cerámicas y luego metales para su subsistencia. Con el tiempo, esta utilización de metales dio origen a la actividad minera la cual hoy en día es uno de los principales motores económicos a nivel mundial.

En el caso de Perú, de acuerdo a lo publicado por el *Ministerio de Energía y Minas* en el *Boletín Estadístico del Subsector Minero*, en el 2015 las exportaciones mineras alcanzaron los US\$18,832 millones, monto que representó un 61.85% del total de las exportaciones peruanas y un aporte al PBI del 15.5%. Otra cifra importante para el país es la transferencia de recursos generados por la minería a las regionales, la cual alcanzó los S/. 2,994 millones y aunque la minería formal no es intensiva en mano de obra, en promedio se tuvieron contratados 195,705 trabajadores directos (2016: 7-17). En síntesis, es innegable que la Minería es fundamental para el desarrollo del país (no por nada está presente en 23 de sus 25 regiones), mas esta representatividad conlleva también a que todos sus actores (sector público, privado y educación) tengan el compromiso de promover el crecimiento sostenido y ordenado de la actividad.

En estos últimos tiempos en los que los conflictos sociales han tomado un mayor auge, el tema ambiental ha sido un factor importante para la desconfianza de la población frente a la Minería. Las preocupaciones en torno al tema ambiental y por qué no decirlo también la desinformación, se ven reflejadas en un alto índice de conflictividad social que ha sido motivado y aprovechado para intereses particulares con fines políticos o de corrupción logrado finalmente detener más de US\$ 20,000 millones en inversiones en el sector. Sólo basta revisar las cifras del *Reporte de Conflictos Sociales N°154* de la *Defensoría del Pueblo*, donde de los 212 conflictos sociales registrados en el mes de diciembre del 2016, 146 son de carácter socioambiental y de estos, 95 están relacionados propiamente con la actividad minera (2016: 6-20). La Figura 1-1 grafica lo antes mencionado y muestra que los departamentos de Ancash y Ayacucho son departamentos con mayor número de conflictos en el país.

Figura 1-1: Perú: Conflictos sociales en cifras



Fuente.- Perú21, 2017

Entonces ¿Qué hacer para promover la minería en el país y hacer que esta siga siendo exitosa? Una respuesta rápida a esta interrogante sería evitar que opiniones negativas se trasladen sobre toda la actividad minera y sobre todo considerar que un tema muy tocado en los últimos conflictos sociales es el tema de contaminación ambiental donde específicamente dos palabras fueron (y hasta ahora son) las más mencionadas: agua y drenaje ácido.

Independientemente de si los reclamos hacia determinadas minas (o proyectos) fueron o no justificados, múltiples publicaciones coinciden en que los efluentes de mina y sobre todo los efluentes ácidos son el mayor problema ambiental que enfrenta la industria minera a nivel mundial. En este sentido, tomando un extracto del libro “Drenaje Ácido de Mina: Generación y Tratamiento” de Aduvire tenemos que “los drenajes ácidos...son una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en el mundo debido a que su duración es de incluso cientos de años [...]. Estos drenajes son tóxicos en diverso grado para el hombre, la fauna y la vegetación pues contienen metales disueltos y constituyentes orgánicos solubles o insolubles” (Aduvire 2006: 1).

Dada la toxicidad y la duración de estos drenajes, es fundamental prevenir su formación más aún si esta puede darse en cualquier etapa de la vida de la mina

(exploración, operación e incluso luego del cierre final). En su defecto, si es que el drenaje ya se ha formado, es necesario aplicar el tratamiento más adecuado para su atenuación y control, el cual no solo deberá tener como meta el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles (ver capítulo 3 Marco legal) si no también la optimización de los costos de tratamiento teniendo como base la caracterización física-química de los drenajes y la caracterización geoquímica de materiales mineros.

Así, no solo se busca rentabilidad si no también la posibilidad de que se reduzcan los impactos ambientales que hasta hoy en día se ha visto en el país y que son unas de las principalmente causantes de la desconfianza en el sector.

1.2 Hipótesis

La hipótesis de la presente tesis radica en que es posible elegir un tratamiento óptimo de los efluentes a partir de una adecuada caracterización.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

Identificar la alternativa óptima del tratamiento de efluentes de mina a partir de su caracterización.

1.3.2 Objetivos secundarios

Entre los objetivos secundarios se tiene:

- Evaluar alternativas de tratamiento de efluentes y comparar su efectividad en base a aspectos económicos.
- Caracterizar materiales y residuos mineros para promover el manejo preventivo y reducir la generación ácida.

2 Marco teórico

Tomando en cuenta que en su mayoría, los efluentes de mina son de carácter ácido, la presente tesis se ha enfocado en el estudio del agua ácida o también conocido como drenaje ácido de mina (DAM).

Los drenajes ácidos se originan por la oxidación química de los sulfuros acelerada por la acción bacteriana. Estos drenajes tienen valores de pH entre 2 a 6, contienen sólidos en suspensión y altas concentraciones de sulfato y metales disueltos (Fe, Mn, Al, Cu, Pb, Zn, Cd, Ca, Na, K, Mg y otros) que alcanzan las decenas o centenas de miligramo por litro.

La formación del drenaje ácido es un proceso natural favorecido por la geodisponibilidad de minerales sulfurosos: “Durante la explotación de determinados yacimientos (carbón, sulfuros metálicos, hierro, uranio y otros) quedan expuestos a la meteorización grandes cantidades de minerales sulfurosos que pueden llegar a formar drenajes ácidos. Para que esto tenga lugar son necesarias unas condiciones aerobias, es decir la existencia de cantidades suficientes de agua, oxígeno y simultáneamente la acción catalizadora de bacterias” (Aduvire 2006:4).

En otras palabras, la exposición de materiales sulfurosos a la intemperie (es decir al contacto con agua y aire) hace que estos materiales reaccionen, creando ácido sulfúrico en un proceso continuo que puede durar cientos de años. Al mismo tiempo, al incrementar el nivel de acidez en el agua, ciertas bacterias actúan como elemento catalizador acelerando los procesos de oxidación y acidificación, lixiviando aún más los materiales y por ende produciendo más drenaje ácido.

Es preciso reiterar, que al ser un proceso continuo, la producción de drenaje ácido puede durar cientos de años independientemente de si la mina se encuentra en operación o no, por tanto una vez que el drenaje se ha generado, el costo de su tratamiento es elevado.

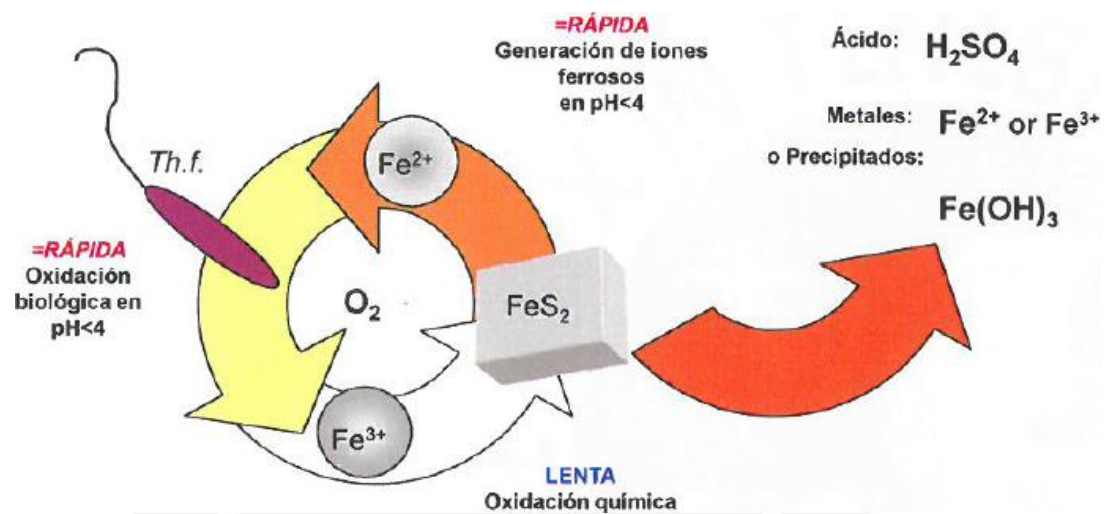
Así mismo, dada la acidez y las concentraciones elevadas de metales que contiene, los drenajes ácidos afectan la vida humana, los animales, los suelos y las plantas e incluso por su toxicidad y poder corrosivo producen deterioros en estructuras y maquinarias.

2.1 Mecanismos de formación del agua ácida

Tal como lo muestra la Figura 2-1, la generación de agua ácida se da por la existencia de los siguientes cuatro elementos:

- Mineral sulfuroso (mayormente pirita)
- Oxidante (oxígeno proveniente del aire o de procedencia química)
- Agua (como líquido o humedad)
- Bacterias como elemento catalizador (principalmente *Thiobacillus ferrooxidans*)

Figura 2-1: Elementos que intervienen en la formación del DAM



Fuente.- Kuyucak, 2006

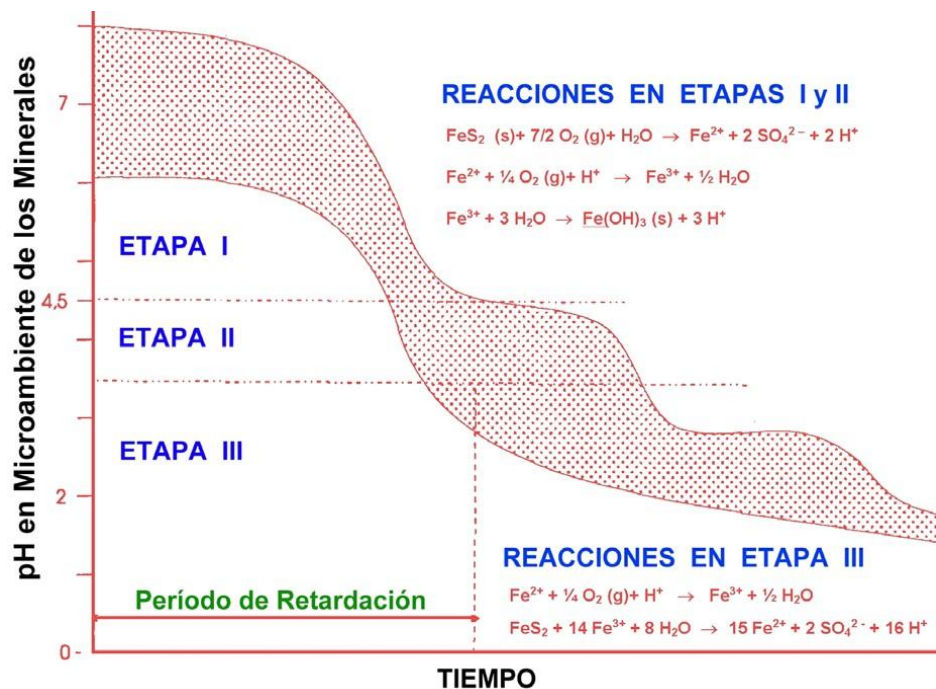
2.1.1 Etapas en la formación del agua ácida

Tal como se muestra en la Figura 2-2, el proceso de formación de las aguas ácidas está dividido en 3 etapas marcadas por el pH del agua (García 2013: 12-15; Aduvire 2006: 9-11; INAP 2009: 99-105).

La *primera etapa* está definida por la oxidación química de los minerales sulfurosos teniendo como principal oxidante al oxígeno. Esta oxidación libera iones ferrosos (Fe^{2+}) los cuales a un pH superior a 7, se oxidan a iones férricos (Fe^{3+}) y precipitan como hidróxidos aportando acidez al medio. Así mismo, en esta etapa los minerales carbonatados presentes neutralizan la acidez manteniendo el pH del agua de neutro a alcalino ($\text{pH}>7$). Por lo demás, la velocidad de oxidación es baja comparada con las etapas posteriores ya que el ion férrico no contribuye como agente oxidante al no contar aún con concentraciones significativas que le permitan accionar todo su potencial oxidante.

Dado que la generación de ácido continúa y la alcalinidad producida por los minerales carbonatados disminuye, el pH del agua va disminuyendo hasta 4.5 momento en que se inicia la *segunda etapa* donde predomina la oxidación de la pirita por la acción bacteriana. En esta reacción se produce el sulfato ferroso que al ser oxidado nuevamente se transforma en sulfato férrico, y éste a su vez en contacto con el agua da lugar al ácido sulfúrico y al hidróxido férrico provocando la coloración amarilla en el agua. Esta oxidación continuará hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización donde se presentarán valores de pH por debajo de 3.5.

Figura 2-2: Etapas en la formación de aguas ácidas



Fuente.- Aduvire 2006: 10, figura 2

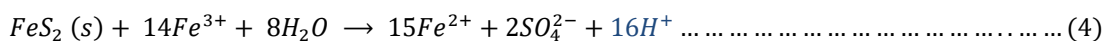
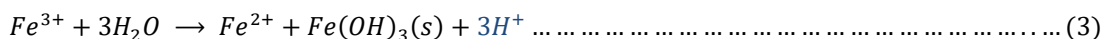
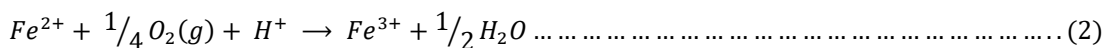
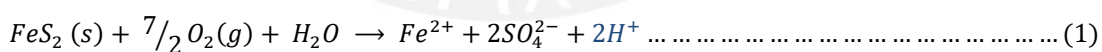
La tercera etapa está definida por la oxidación de los sulfuros por parte del Fe^{3+} cuya capacidad de oxidación es mucho más potente que la del oxígeno. En este sentido, de las reacciones de oxidación de sulfuros se produce el ion ferroso (Fe^{2+}), que bajo la presencia de bacterias se convierte en ion férrico (Fe^{3+}), el cual a su vez reemplaza al oxígeno como agente oxidante principal. Así mismo, cuando el pH del agua desciende por debajo de 4.5, el ion férrico se ve afectado por reacciones de oxidación-reducción y la acción bacteriana puede lixiviar el sulfuro de hierro directamente a sulfato. En este momento, la bacteria oxida el ion ferroso a férrico, el que a su vez oxida a los sulfuros produciéndose así grandes cantidades de ácido a una velocidad de oxidación considerablemente más rápida que la desarrollada en la primera etapa.

2.1.2 Reacciones principales en la generación de agua ácida (Oxidación de la Pirita)

Los sulfuros de hierro son los minerales más comunes con capacidad para generar drenaje ácido. De estos, la pirita FeS_2 es considerada la responsable de la formación de la mayor parte de aguas ácidas en el mundo (Alpers 1992; Aduvire 2006: 6-11; INAP 2009: 36; Nordstrom 2000).

Aduvire y Lopez Pamo coinciden en que al tener pirita expuesta al agua y al oxígeno se dará el proceso de oxidación produciendo Fe^{2+}, SO_4^{2-} e H^+ lo que producirá un incremento en el total de sólidos disueltos y además un incremento de la acidez asociada a la disminución del pH (Ecuación 1). Posteriormente y considerando un ambiente oxidante, los iones ferrosos (Fe^{2+}) se oxidarán a iones férricos (Fe^{3+}) (Ecuación 2) que luego precipitarán como hidróxidos considerando un pH por encima y alrededor de 3 (Ecuación 3) por tanto con la mencionada hidrólisis, el número de iones férricos disueltos disminuirá y al mismo tiempo disminuirá el pH. No obstante los iones férricos (Fe^{3+}) que se mantengan en solución seguirán oxidando adicionalmente a la pirita lo que dará origen a más Fe^{2+}, SO_4^{2-} e H^+ (Ecuación 4) haciendo que este proceso sea cíclico (Lopez Pamo et al, 2002; Aduvire 2006).

En esta etapa, al existir una mayor acidez, la capacidad neutralizadora del medio (o alcalinidad) va disminuyendo hasta alcanzar un pH=3.5 momento en el cual deja de formarse hidróxido y la actividad de los iones férricos disueltos (Fe^{3+}) se incrementa. Precisamente a este pH, las bacterias inician su acción catalizadora acelerando en varios órdenes de magnitud la oxidación de los iones ferrosos (Fe^{2+}) a iones férricos (Fe^{3+}) lo que origina que estos últimos oxiden rápidamente a la pirita.



Para finalizar, ambos autores mencionan que el proceso de oxidación de la pirita (que involucra las Ecuaciones 1, 2 y 3) es un proceso lento que finaliza con la precipitación de los hidróxidos.

2.1.3 Factores que influyen en la velocidad de formación de aguas ácidas

La importancia de la velocidad de formación del DAM radica en esta influye directamente sobre las consecuencias que ocasionará al ambiente. Por ejemplo, si el proceso ocurre lentamente, los efectos sobre el ambiente serán despreciables; caso contrario, si la generación es rápida, el problema sin duda será mayor debido a una mayor posibilidad de propagación y contaminación.

Diversas publicaciones mencionan que la velocidad de oxidación depende de varios factores de los cuales los más resaltantes son la estructura cristalina, la mineralogía, la temperatura, la producción de nuevos compuestos, las bacterias y la presencia de agua y oxígeno.

En el caso de la mineralogía, además de considerar que los minerales por su composición pueden generar acidez o aportar alcalinidad (como la calcita y otros carbonatos), otro factor predominante es la reactividad del mineral. Por ejemplo la marcasita tiene la misma fórmula química que la pirita pero es mucho más inestable y genera con mayor rapidez drenaje ácido. Por el contrario, los sulfuros de otros metales como plomo, zinc o cobre son generalmente menos reactivos que los de hierro debido a la mayor estabilidad de su estructura cristalina (Aduvire 2006: 6-7).

Durante el proceso de oxidación existe la posibilidad de que se generen nuevos compuestos. Estos pueden acelerar el proceso de oxidación o recubrir los sulfuros previniendo su alteración. Por ejemplo al generarse sulfuro de hierro meteorizado, este puede reaccionar posteriormente con la pirita acelerando la oxidación.

Las bacterias al actuar como elemento catalizador, tienen como rol principal acelerar la velocidad de generación ácida transformando los iones ferrosos (Fe^{2+}) a iones férricos (Fe^{3+}). De acuerdo al pH del agua, existen diversas bacterias que actúan en este tipo de ambiente siendo la más común la *Thiobacillus ferrooxidans* cuyo pH óptimo de crecimiento está entre 1.3-4.5. Li señaló que mientras la capacidad neutralizante sea mayor a la acidez producida, las bacterias no podrán desarrollarse y la producción de lixiviados ácidos no será muy elevada. En cambio, si la acidez producida es mayor, la población de bacterias se incrementará acelerando los procesos de oxidación y produciendo aún más acidez (2013:15).

Factores climáticos como la temperatura también influyen sobre la generación del DAM. Por ejemplo a bajas temperaturas tanto la oxidación química como la biológica disminuyen y lo mismo ocurre cuando la temperatura sobrepasa los 35°C.

Una mención aparte merece la presencia de agua y oxígeno. Tal como se ha venido detallando, estos dos elementos son indispensables para la formación de DAM, la no existencia de uno de ellos: oxígeno o agua (como líquido o humedad) detendrá la generación del drenaje ácido. No obstante es preciso mencionar que para la generación del DAM se demandan grandes cantidades de oxígeno frente al volumen de agua necesario. En este sentido si se sumergen los sulfuros en agua se suele detener la reacción por la baja difusión del oxígeno en el agua. Por el contrario, la sola presencia de aire conteniendo una pequeña cantidad de humedad conlleva a que se origine la oxidación (Aduvire 2006: 8).

2.2 Caracterización de materiales mineros

La caracterización geoquímica está orientada a obtener información de la estabilidad química de los materiales (mineral, desmonte, relave) en el largo plazo. La finalidad es evaluar el potencial de generación ácida empleando criterios de fácil interpretación basados en la relación ácido/base y otros de predicción del comportamiento a largo plazo.

La identificación anticipada de que un material pueda o no generar drenaje ácido es -sin duda -esencial para la planificación ambiental y económica de una mina. El implementar medidas preventivas (y tener el tiempo necesario para diseñarlas) siempre será más económico que el gasto ocasionado por acciones correctivas obteniendo además la ventaja de que en el futuro se reducirían las obligaciones financieras de la posible operación, mantenimiento y monitoreo de instalaciones para colección y tratamiento del drenaje a largo plazo.

Por otro lado, en caso de que el drenaje ya exista, la caracterización de los materiales permitirá asegurar la orientación del tratamiento a proponer permitiendo identificar si la calidad del agua variará o se mantendrá con los años.

Existen tres tipos principales de pruebas que se utilizan para la predicción:

- Pruebas estáticas para determinar las propiedades geoquímicas del material
- Pruebas de lixiviación para determinar el total de componentes solubles; y

- Pruebas cinéticas para determinar el comportamiento geoquímico del material a través del tiempo (drenaje).

Además, la mineralogía es un ensayo complementario que ayudará en la interpretación de las pruebas antes mencionadas. La descripción de los ensayos se realiza en los siguientes ítems:

2.2.1 Pruebas Estáticas

Su objetivo fundamental es la caracterización del potencial de generación de ácido. Esta prueba define el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquellos potencialmente consumidores de ácido. En teoría, una muestra será generadora de ácido sólo si su potencial para la generación de ácido excede a su potencial de neutralización.

Las pruebas estáticas son el primer paso en todo programa de pruebas para determinar el potencial de drenaje ácido y tienen la ventaja de que se realizan de manera simple, rápida y con costos relativamente bajos (aproximadamente 100 dólares por muestra obteniendo los resultados en 2 semanas).

2.2.1.1 Ensayos para estimar el potencial de Acidez (Test ABA)

El procedimiento para pruebas estáticas más comúnmente usado es el Test ABA (Sobek et al, 1978) o el procedimiento modificado para prueba de balance ácido-base (BAB). Cada uno de ellos determina los minerales potencialmente generadores de ácido (expresados como potencial de acidez máxima, PA) y los minerales potencialmente consumidores de ácido (expresados como potencial de neutralización PN). Así, a través del Test ABA se obtendrá la siguiente información:

- Potencial Neto de Neutralización (NNP)
- Ratio NP/AP, denominado Razón de Potencial Neto (NPR)
- Potencial de Neutralización (NP)
- Potencial de Acidez Máximo (AP)
- Azufre total, azufre como sulfato y azufre como sulfuro
- Grado de efervescencia.
- pH en pasta

Los criterios de evaluación de la generación de acidez son los siguientes:

- Razón de Potencial Neto (NPR)

La Razón de Potencial Neto (NPR) o cociente NP/AP permite determinar el potencial de generación ácida en fase sólida incorporando criterios de estabilidad química que son mostrados en la Tabla 2-1.

El potencial de acidez (AP) es definido como la capacidad de un material de generar acidez y depende exclusivamente de su contenido de sulfuros. De otro lado, el potencial de neutralización (NP) es definido como la capacidad de un material para neutralizar acidez y depende exclusivamente de su contenido de materiales consumidores de acidez tales como carbonatos, hidróxidos, etc.

Tabla 2-1: Criterio de Clasificación NPR= NP/AP

Caracterización	Criterio de clasificación	Comentarios
Potencial generador de acidez (Posible)	$NP/AP < 1$	Posible generación de acidez, salvo que los minerales sulfurosos sean no reactivos
Incertidumbre (Incierto)	$1 < NP/AP < 3$	Posible generador de acidez, si el NP es insuficiente reactivo o es consumido a una velocidad mayor que la velocidad de reacción
No generador de acidez (Imposible)	$NP/AP \geq 3$	No hay generación de acidez

Fuente.- Price, 1997, 2009.

- Potencial Neto de Neutralización (NNP)

Otro de los criterios utilizados en la valoración de acidez es el Potencial Neto de Neutralización (NNP), que es la capacidad de un mineral o material para generar o consumir acidez y se obtiene por diferencia entre el potencial de neutralización (NP) y el potencial de acidez (AP) o acidez total ($NNP = NP - AP$).

En la evaluación de generación ácida propuesta por el MINEM en la Guía para Manejo de Drenaje Acido de Minas, como regla general se asume las siguientes situaciones:

Si $NNP > + 20 \text{ kg } CaCO_3/t$; no producirá drenaje ácido

Si $- 20 < NNP < + 20$; rango de incertidumbre (recomendable ver mineralogía y otros)

Si $NNP < - 20 \text{ kg } CaCO_3/t$; posible generación de drenaje ácido

- Relación entre la Razón NP/AP y S (%) como Sulfuro

Tal como lo muestra la Tabla 2-2, este criterio realiza una correlación entre el ratio NP/AP con el contenido del azufre como sulfuro (en porcentaje) determinando los rangos o límites del potencial de generación ácida de las

muestras estudiadas. En general, cuando el ratio NP/AP es 3:1 o mayor y el contenido de azufre como sulfuro es menor a 0.3 % no hay generación de acidez o el riesgo de que se generen drenajes ácidos es muy bajo.

Tabla 2-2: Clasificación de rocas por Contenido de Azufre y Relación Acido/Base

Tipo de Roca	Clasificación	Contenido de Azufre como Sulfuro (% S)	Ratio (NP: AP)
I	Potencial formador de acidez (Posible)	Mayor a 0.3 %	1:1 o menos
II	Indeterminado (Incierto)		3:1 a 1: 1
III	No forma acidez (Improbable)	Menor a 0.3 %	3:1 o más

Fuente.- Aduvire 2006, 2012, tabla 6 con adaptaciones del CANMET 2009: 14-14.

- pH en Pasta

El pH en pasta entrega una estimación cualitativa del pH inicial de la muestra. Se prepara mezclando agua con roca o muestra molida en una proporción fija y se mide el pH de la pasta resultante. En las rocas ricas en sulfuro, valores de pH superiores a 7 generalmente sugieren que la muestra contiene una significativa capacidad de neutralización en forma de carbonato reactivo. Valores de pH de la pasta por debajo de 4 ó 4.5 podrían indicar la presencia de acidez mineral derivada de productos anteriormente meteorizados que se hidrolizan con facilidad (por ejemplo, sulfatos secundarios). Proporciona una indicación de la acidez total almacenada en la muestra, así como la extensión en la que ha ocurrido la oxidación antes de un análisis más acabado.

2.2.1.2 Ensayo o Test NAG

El ensayo NAG (Generación Neta de Acidez) es una prueba sencilla y complementaria a los ensayos ABA que se utiliza para determinar el potencial neto de generación ácida y se basan en la oxidación acelerada de los sulfuros a sulfatos en presencia de peróxido (H_2O_2).

El método consiste en añadir 150 ml de solución de peróxido de oxígeno sobre la muestra pulverizada estudiada, una vez ocurrida la oxidación se mide el pH y la acidez de la solución generada que dependerá del ácido formado y la reacción de éste con los materiales neutralizantes presentes en la muestra.

El resultado del efecto neto de acidificación y neutralización se mide directamente por la lectura del pH después de 24 horas. Los valores de pH finales menores a 4.5 unidades, implican que a esos materiales se los clasifique como potenciales generadores de acidez.

La solución generada en el Test NAG opcionalmente será analizada por ICP-MS para determinar los potenciales solutos (metales) liberados en condiciones oxidantes. Estos resultados permitirán identificar los potenciales contaminantes, aunque las concentraciones obtenidas en las condiciones del test no necesariamente corresponderán a las que puedan resultar en los hipotéticos efluentes.

El criterio de interpretación basado en los resultados de la prueba NAG considera tanto el valor del pH obtenido al finalizar la prueba como la cantidad de ácido generado en el ensayo ($kg H_2SO_4/t$), presentado tres clasificaciones indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 2-3: Caracterización de Materiales por el Criterio NAG

Resultado Prueba NAG	Clasificación
pH NAG <4.5 y NAG>10	Alta generación de acidez
pH NAG >4.5 y 1 < NAG<10	Baja generación de acidez
pH NAG >4.5 y NAG<1	No genera acidez

Fuente.- CANMET 2009: 14-14.

2.2.2 Pruebas de Lixiviación

Las pruebas de lixiviación se realizan para evaluar el potencial de lixiviación de metales procedentes de los materiales estudiados, que podrían generar drenaje ácido.

2.2.2.1 Test SFE (Shake Flask Extraction)

La prueba Shake Flask Extraction está diseñada para medir la interacción del material con agua proveniente de fenómenos meteorológicos (agua meteórica). En este sentido, en la prueba se usa agua destilada (según el procedimiento que indica la norma ASTM 2006) la cual se combina con el material a estudiar en la relación de 03:01 para luego proceder a agitar durante un período de 24 horas. Posteriormente se colecta el lixiviado y se filtra con una membrana de acetato de celulosa de 0.45 micras.

El lixiviado filtrado generado se analiza para determinar los siguientes parámetros: pH, alcalinidad, acidez, conductividad, sulfato, cloruro, incluyendo la determinación de las concentraciones de metales como arsénico, antimonio, bario, berilio, bismuto, boro, cadmio, calcio, cromo, cobalto, cobre, hierro, plomo, de litio, magnesio,

manganeso, molibdeno, níquel, potasio, plata, sodio, estroncio, estaño, uranio, vanadio, zinc por el método ICP.

2.2.2.2 SPLP

Las pruebas de lixiviación o pruebas SPLP (Procedimiento sintético de lixiviación de precipitados) se realizan para evaluar el potencial de lixiviación de metales procedentes de los relaves, que podrían contaminar los suelos, aguas superficiales y/o subterráneas.

La evaluación del potencial de lixiviación de metales se realiza por lixiviación de los materiales utilizando una solución de ácido sulfúrico/ácido nítrico a un pH de 4.2 y luego en los extractos se evalúan los parámetros físicos, químicos, sulfatos y metales.

La metodología de lixiviación de metales se desarrolla teniendo como referencia la norma US EPA method 1312.

2.2.3 Pruebas Cinéticas

Los ensayos cinéticos tienen la finalidad de confirmar el potencial de generación de acidez de los materiales y predecir la calidad de las aguas de drenaje cuando estos son sometidos a condiciones meteorológicas controladas. Dentro de los ensayos más empleados están los de celdas húmedas, percolación en columnas y otros de lixiviabilidad que están establecidos por la normativa ATSM.

A partir de los resultados de las pruebas estáticas se deberá evaluar la necesidad de realizar los ensayos cinéticos a las muestras que presenten un claro potencial de generación de acidez y/o un cierto grado de incertidumbre.

Celda Húmeda

El Test de Celda Húmeda (TCH) se emplea para estimar el potencial de generación ácida de la degradación acelerada de una matriz mineral y se realiza con una muestra fragmentada y preparada, que se dispone en la celda hasta ocupar un 75% del volumen total. La muestra se somete a condiciones controladas de humedad y temperatura utilizando una corriente de aire que producirá- de forma acelerada- la degradación natural que podría ocurrir en condiciones del ambiente, llegando a

predecir la calidad de los lixiviados que se obtienen a lo largo del tiempo por acción de los cambios meteorológicos.

La evaluación cinética mediante ensayos de celdas de humedad nos permite confirmar el potencial de generación de acidez y predecir la calidad de las aguas de drenaje cuando los materiales son sometidos a condiciones de meteorización en condiciones controladas.

El TCH está regulado por la norma ASTM D5744-96. Las variables que se consideran son: la duración de los ciclos, el tiempo de aireación de la celda, la temperatura del gas de entrada y los tiempos de drenaje. Normalmente, un TCH consta de 1 ciclo inicial (1 día) y 20 ciclos posteriores estándares de 7 días cada uno. El ciclo inicial (ciclo 1) es un ciclo de lavado que consiste en inundar la celda durante 2 horas para al día siguiente dejar drenar durante 2 horas y posteriormente analizar los lixiviados de drenaje. En cada ciclo se insufla aire húmedo ($HR > 90\%$) a $40 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 3 días a un caudal de 2 a 5 l/min, seguido de 3 días de aire seco, posteriormente se inunda la celda y se analizan los lixiviados obtenidos en el drenaje.

Sobre los lixiviados se mide el pH, la conductividad y el potencial redox. Además sobre el lixiviado filtrado se analizarán aniones, alcalinidad y el contenido en metales donde tiene especial importancia la especiación de hierro (II) y hierro (III).

2.2.4 Mineralogía

Los estudios mineralógicos identifican los minerales de una muestra a través de microscopios ópticos, láser y difracción de rayos-X.

Conociendo en detalle la mineralogía, se puede predecir la química de los drenajes, asumiendo que estos pueden verse influenciados por las impurezas que contienen y acompañan a los minerales que afectan la composición, las tasas de reacción y la química del agua.

En los análisis mineralógicos semicuantitativos por Difracción de Rayos X se cuantifica todos los minerales presentes con un determinado límite de detección (L.D.). La mineralogía obtenida de los análisis mineralógicos por difracción de rayos X nos brinda información de los minerales presentes con sus concentraciones en porcentaje, que es muy útil para muestras con contenidos significativos de cuarzo y sílice con comportamiento incierto en los ensayos ABA.

2.3 Caracterización de aguas de mina

El diagnóstico es una parte muy importante y necesaria para la solución de cualquier problema. Saber exactamente donde se origina el problema, su frecuencia, envergadura y características específicas es sin duda básico para lograr identificar la mejor solución.

Enfocándonos al tema específico de la presente tesis se menciona que una vez que ya se cuenta con la presencia de aguas ácidas es necesario realizar una correcta caracterización del efluente pues esto influirá directamente sobre la elección del método de tratamiento a emplear, el consumo de reactivos, el tamaño de los equipos (por ejemplo tanques de neutralización, clarificadores, etc.) e incluso sobre el requerimiento o no de instalaciones auxiliares como las utilizadas para el almacenamiento temporal de los lodos del tratamiento, canales de coronación, pozas de sedimentación, entre otros (Aduvire 2006; López Pamo 2002).

López Pamo describe que una correcta caracterización de efluentes debe incluir mediciones representativas de al menos un año hidrológico del caudal y de los siguientes parámetros físicos y químicos (Lopez Pamo, 2002: 5-6):

- pH
- Acidez/alcalinidad
- Contenidos de metales totales y disueltos
- Conductividad
- Potencial Redox

Según la legislación peruana, tanto la medición de los parámetros físico-químicos como la toma de muestras para el posterior análisis de metales totales y disueltos, se deben realizar de acuerdo al *Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes* publicado por el MINEM. Los valores obtenidos deberán de ser comparados de acuerdo a los *Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas* aprobados bajo D.S. N°010-2010-MINAM.

Los términos acidez o alcalinidad de un drenaje es la capacidad que estos tienen para neutralizar una base o neutralizar un ácido respectivamente. Si un *drenaje presenta acidez* quiere decir que en este predomina su acidez total por lo que hablamos de un *drenaje con acidez neta*. La misma regla se cumple en el caso de

que la alcalinidad sea la predominante. La ecuación que define lo anteriormente dicho se presenta a continuación:

$$Acidez / Alcalinidad \text{ Neta} = Acidez \text{ Total} - Alcalinidad \text{ Total}$$

De acuerdo a su acidez o alcalinidad neta, Bigatel clasifica de la siguiente manera a los drenajes:

Tabla 2-4: Clasificación de los drenajes de mina

Sub Categorías	Descripción	Rango de acidez o alcalinidad
1	Muy ácido	Acidez Neta > 300 mg/l como CaCO ₃
2	Moderadamente ácido	100 ≤ Acidez Neta ≤ 300 mg/l como CaCO ₃
3	Débilmente ácido	0 ≤ Acidez Neta < 100 mg/l como CaCO ₃
4	Débilmente alcalino	Alcalinidad Neta < 80 mg/l como CaCO ₃
5	Fuertemente alcalino	Alcalinidad Neta ≥ 80 mg/l como CaCO ₃

Fuente.- Aduvire, 2006: 54, tabla13

En aguas naturales, la acidez total está compuesta por acidez mineral, acidez orgánica y acidez de protones. La acidez orgánica es producida por el CO₂ asociado con la disolución de componentes orgánicos, la acidez mineral es debida a las reacciones de hidrólisis del Fe, Al y Mn (disolución de metales ácido formadores) y la acidez de protones se debe a la presencia de iones hidrógeno libres (H⁺) (Aduvire 2006). En el caso de las aguas de mina, la acidez total estará asociada directamente a la acidez de protones y a la acidez mineral ya que al tener poco contenido de carbón orgánico disuelto, la acidez orgánica es baja y por lo tanto despreciable.

Por lo general, la acidez total se incrementa a medida que el pH desciende y se reportada en unidades de mg CaCO₃/l. Teóricamente, la acidez total también puede ser calculada en base al pH y a la concentración en mg/l de cada catión que genere acidez:

$$Ac_t = 50 \left(\frac{2[Fe^{2+}]}{56} + \frac{3[Fe^{3+}]}{56} + \frac{3[Al^{3+}]}{27} + \frac{2[Mn^{2+}]}{55} + 1000(10^{-pH}) \right)$$

De la multiplicación de la acidez total por el caudal del efluente se obtendrá la Carga de Ácido, dato que equivale al requerimiento de tratamiento.

2.4 Control de los drenajes ácidos

El control de los drenajes ácidos se fundamenta en medidas de carácter preventivo y mitigador.

Las medidas preventivas se dan antes de la formación del DAM evitando proactivamente la oxidación de los sulfuros al contacto con agua y aire. Por otro lado, las medidas mitigadoras se dan cuando el DAM ya se ha formado y se busca minimizar o eliminar su generación con acciones de carácter correctivo. A continuación se realiza una breve descripción de los tres niveles de control del DAM:

- Medidas de control primario: Estas medidas están relacionadas a la prevención del DAM propiamente dicha y se basan en la supresión de los mecanismos de oxidación mediante la eliminación de uno de los elementos que intervienen en la formación del DAM. Por ejemplo depósitos con impermeabilización, depósitos subacuáticos, desvío de agua, adición de materiales alcalinos y fosfatos, inhibición bacteriana con aplicación de bactericidas, etc.
- Medidas de control secundario: Estas medidas se aplican cuando el DAM ya se ha generado. El objetivo principal es impedir o desviar la entrada del agua a las fuentes de acidez para evitar la migración del DAM.
- Medidas de control terciario: Estas medidas están orientadas a coleccionar y tratar el DAM. Las técnicas de tratamiento a implementar van desde tratamientos activos como neutralización, osmosis inversa, intercambio iónico, etc. y tratamientos pasivos como humedales aerobios, humedales anaerobios, etc.

La elección del control a implementar deberá considerar además el manejo de la operación minera (método de minado superficial o subterráneo), la mineralogía y la geoquímica del yacimiento, el clima, la topografía, la configuración del agua superficial y subterránea del entorno, la normativa vigente y los costos a generarse por la construcción, operación y mantenimiento de las medidas (INAP 2009: 261).

2.5 Tratamiento de aguas ácidas

El tratamiento del drenaje ácido tiene como objetivo principal la remoción y aislamiento de metales y aniones metálicos mediante su precipitación como hidróxidos insolubles. En este proceso, los metales se extraen de la solución precipitada como sólidos o absorbidos en sólidos para luego ser separados como residuos (lodos) y ser eliminados, reutilizados o dispuestos bajo condiciones adecuadas (Aduvire 2006:80; Puig 2014).

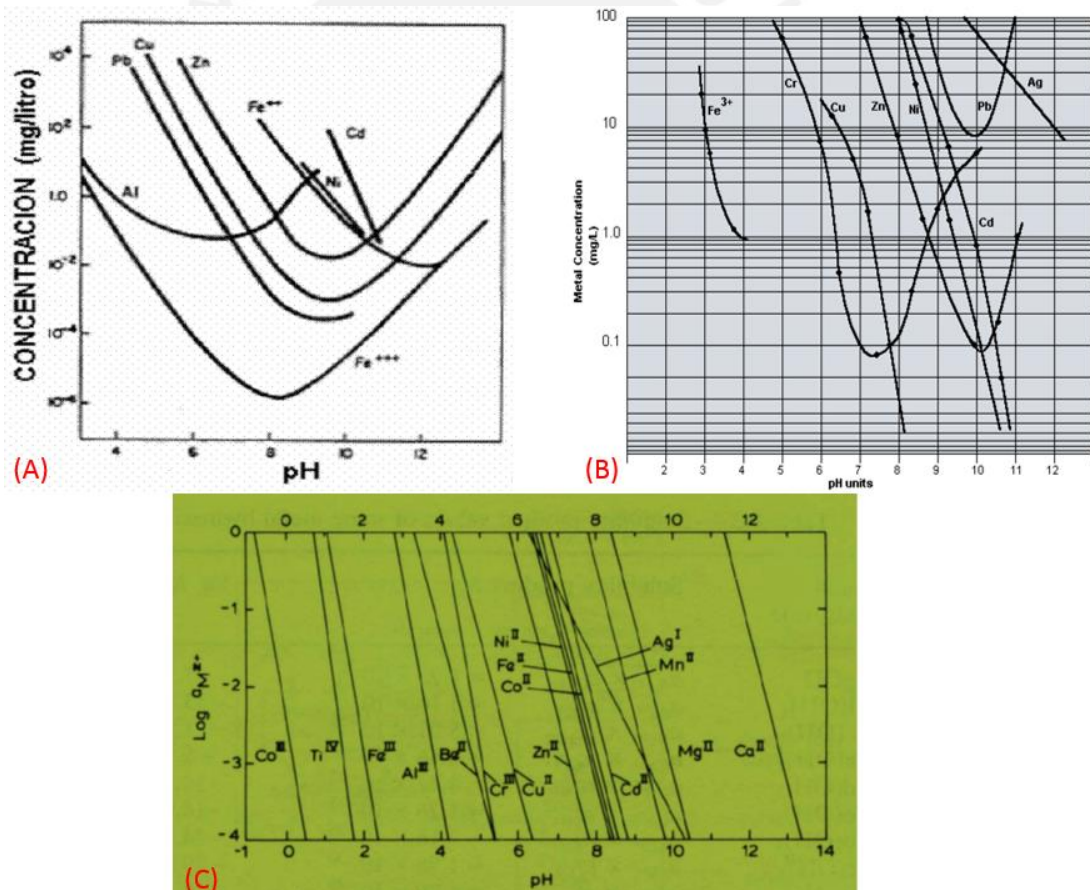
La precipitación de los metales se da en un intervalo de pH determinado que depende de los rangos de movilización de cada metal. En la Figura 2-3 se presentan gráficas

teóricas de solubilidad de hidróxidos metálicos en función del pH donde el punto más bajo de cada curva representa el punto óptimo de remoción.

Cabe mencionar que las curvas teóricas presentadas fueron construidas en base a ensayos a condiciones determinadas (temperatura, presión, etc.) por lo que para cada curva experimental se podrá observar un rango de desplazamiento ligado principalmente a las condiciones en las que se efectuó el ensayo.

El tratamiento del drenaje ácido puede darse por métodos activos o métodos pasivos. Básicamente la elección del tratamiento a implementar se centrará en la caracterización propia del drenaje, su caudal promedio, el uso final del agua tratada y el costo por infraestructura, operación y mantenimiento del tratamiento propiamente dicho (planta, humedal, etc).

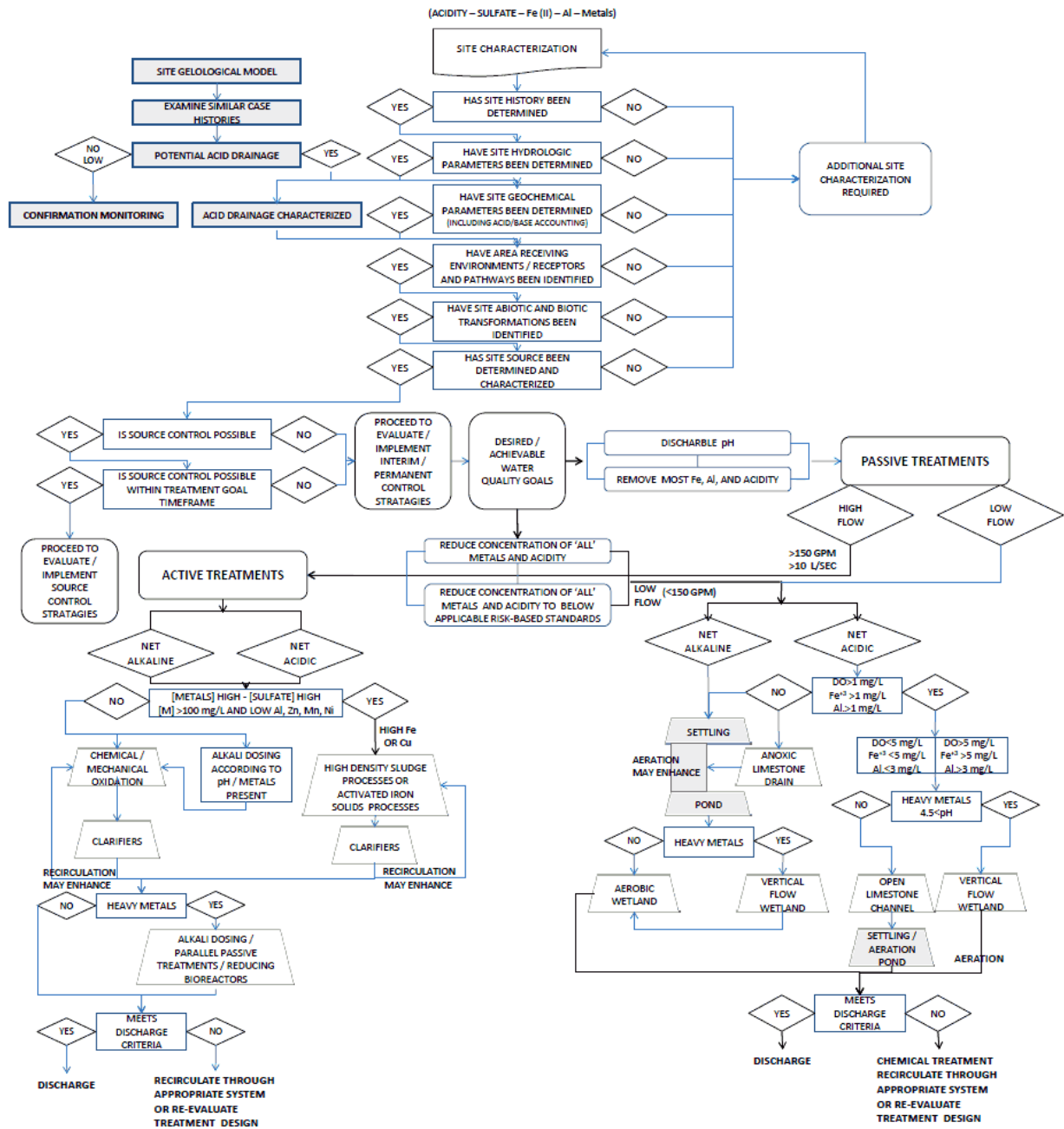
Figura 2-3: Solubilidad de hidróxidos metálicos en función al pH



Fuente.- Aduvire 2006 (Figura A y B); Hoffland 2016 (Figura B)

Tal como lo indica la Figura 2-4, los tratamientos pasivos son aplicados mayormente para drenajes con poca acidez y poco caudal. Por el contrario, los tratamientos activos si pueden trabajar con rangos de acidez y caudales altos.

Figura 2-5: Árbol de decisión del drenaje ácido



Fuente.- INAP 2009: 324, figura 7-3

2.5.1 Tratamiento por métodos activos

Las técnicas de tratamiento activo son las que requieren una operación, mantenimiento y monitoreo continuo y utilizan para su funcionamiento energía externa (energía eléctrica) y reactivos.

Este tipo de tratamiento es mayormente utilizado en minas operativas y su ventaja principal radica en que puede ser aplicado para tratar grandes caudales y cualquier

tipo de acidez, siendo además adaptable a cambios en la química del agua que pudiera darse durante el avance del minado.

Si bien este tipo de tratamiento no requiere de grandes áreas para su infraestructura, su costo de inversión es elevado pues implica el montaje de una planta de tratamiento químico con diversos equipos como tanques, clarificadores, bombas entre otros. Así mismo, por ser de operación continua, su costo operativo considerará la adición rutinaria de reactivos requiriendo el monitoreo permanente del personal.

Entre los métodos de tratamiento activo más comunes tenemos: Control de pH o neutralización/precipitación, intercambio iónico, métodos electroquímicos, procesos de membrana como la filtración, ósmosis inversa, etc.

Mundialmente el método de mayor aceptación es el tratamiento de neutralización/precipitación con cal que realiza la neutralización de drenaje ácido en un sistema mecánico que facilita la neutralización y la eliminación de metales mediante la adición de reactivos neutralizantes como CaO (cal viva), Ca(OH)₂ (cal apagada), caliza rica en calcio, soda caustica, etc. A partir de este método existen otras neutralizaciones con cal basados en las densidades de los lodos resultantes, por ejemplo: el proceso de lodos de baja densidad (LDS) donde las densidades finales de lodos sedimentados está entre 4%-15% de sólidos y el tratamiento de lodos de alta densidad (HDS) con densidades entre 15-30% de sólidos.

2.5.2 Tratamiento por métodos pasivos

Las técnicas de tratamiento pasivo son aquellas donde la intervención del hombre es mínima tanto en la parte operativa (no requiere adición rutinaria de reactivos) como en la parte de mantenimiento.

Este tipo de tratamiento se basa en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que se dan en los humedales naturales (wetlands) cambiando las condiciones de Eh y pH del drenaje de forma que se favorezca la formación de especies insolubles que precipiten y retengan la carga contaminante. En este sentido el tratamiento emplea:

- Material alcalino para neutralizar la acidez
- Substratos orgánicos para crear ambientes reductores

- Bacterias para catalizar las reacciones y acelerar los procesos que forman precipitados
- Flujo gravitacional para facilitar el movimiento del agua

La principal ventaja de los tratamientos pasivos radica en sus bajos costos de inversión y operación. Sin embargo, este tipo de tratamiento es usado sólo para tratar drenajes con poco caudal y poca acidez siendo fundamental para el diseño y configuración de los dispositivos, la disponibilidad de grandes áreas de terreno que aseguren una buena circulación y distribución del efluente dentro del sistema maximizando el tiempo de contacto entre el flujo de agua contaminada con los elementos y materiales que componen cada dispositivo de tratamiento.

Entre los métodos de tratamiento pasivo más utilizados destacan los humedales aerobios, los humedales anaerobios o balsas orgánicas, los drenajes anóxicos calizos (ALD, Anoxic Limestone Drains), los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems) y las barreras reactivas permeables cuando son aguas subterráneas (PRB, Permeable Reactive Barriers). En la práctica estos métodos se emplean solos o combinados, dependiendo del tipo de drenaje ácido y de los requerimientos de tratamiento (Lopez Pamo 2002:6).

3 Marco legal

El marco legal de la presente tesis está constituido por una breve descripción de las instituciones públicas del país relacionadas con el Sector Minero y Ambiental y además la recopilación de una serie de normas legales, protocolos y guías relacionadas con el tratamiento de efluentes:

3.1 Marco institucional

3.1.1 Estado Peruano

Las atribuciones del Estado Peruano en cuanto a la determinación de la política nacional del ambiente y la promoción del uso sostenible de los recursos naturales están claramente definidas en los Artículos 66°, 67°, 68° y 69° de la Constitución Política del Perú, los cuales establecen la importancia de la protección y conservación del medio ambiente y de los recursos naturales a fin de hacer posible el desarrollo integral de la persona humana.

3.1.2 Ministerio del Ambiente (MINAM)

El MINAM, creado mediante D.L. N° 1013, es el organismo rector del sector ambiental, que desarrolla, dirige, supervisa y ejecuta la política nacional del ambiente, cuya función general es diseñar, establecer, ejecutar y supervisar la política nacional y sectorial ambiental, asumiendo la rectoría con respecto a ella.

Asimismo, el MINAM tiene por objeto promover la conservación del ambiente y el uso sostenible de los recursos naturales, el ordenamiento territorial, la diversidad biológica y las áreas naturales protegidas.

Las competencias del MINAM comprenden la ejecución de acciones técnico normativas, de alcance nacional en materia de regulación ambiental, entendiéndose como tal el establecimiento de la política ambiental, la elaboración de normatividad específica en materia ambiental, la fiscalización, el control y el ejercicio de la potestad sancionadora por el incumplimiento de las normas ambientales en el ámbito de su competencia, la misma que puede ser ejercida a través de sus organismos públicos correspondientes.

Al MINAM se adscriben los siguientes organismos públicos:

- El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
- El Instituto Geofísico del Perú (IGP).
- El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).
- El Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP).
- El Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP).
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).
- El Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles (SENACE).
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistema de Montaña (INAIGEM).

El OEFA, fue creado mediante el D.L. N° 1013, como ente rector del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental, promulgado mediante la Ley N° 29325. El OEFA tiene como funciones centrales la fiscalización, la supervisión, el control y la sanción en materia ambiental. Mediante la Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental, Ley 29325, Artículo 10°, se crea el Tribunal de Fiscalización Ambiental (TFA) para resolver en última instancia administrativa los recursos de apelación interpuestos a las sanciones impuestas por el OEFA.

3.1.3 Ministerio de Energía y Minas (MINEM)

El MINEM es la autoridad sectorial competente en asuntos ambientales en el subsector minería. Tiene como misión institucional promover el desarrollo sostenible de las actividades energéticas y mineras, mediante la administración, la creación de normas y administración de un sistema de información que promueva la inversión privada en un marco global competitivo, velando por la protección del medio ambiente y por las relaciones armoniosas entre los actores del sector minero energético y la sociedad civil.

El MINEM tiene como órgano de línea competente en materia ambiental minera a la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM). Asimismo, tiene como órgano técnico normativo en materia de minería a la Dirección General de Minería (DGM). Así mismo se menciona que cada región cuenta con su respectiva Dirección Regional de Energía y Minas (DREMs) las cuales asumen el rol promotor y fiscalizador para el desarrollo integral de la actividad minero-energética y asuntos ambientales.

3.1.4 Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI)

Organismo público descentralizado del Ministerio de Agricultura, fue creado por Decreto Ley N° 25902 el 27 de noviembre de 1992 y es el encargado de velar por el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables, así como de cautelar la gestión sostenible del medio ambiente rural y la biodiversidad silvestre.

Asimismo, al MINAGRI se adscriben los siguientes organismos públicos:

- El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).
- El Organismo Público Sierra Exportadora
- La Autoridad Nacional del Agua (ANA).
- El Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA)
- El Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR)

La ANA fue creada mediante la Ley de Organización y Funciones del MINAG, mediante el D.L. N° 997. Es un organismo técnico especializado adscrito al MINAG y ente del Sistema Nacional de Recursos Hídricos, el cual es parte del Sistema Nacional de Gestión Ambiental.

3.2 Marco normativo

Para la presente tesis se ha tenido en cuenta la siguiente normativa peruana:

- Ley General del Ambiente (Ley N°28611 modificada por D.L. N°1055).
- Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (Ley N° 28245 modificada por Ley N°29050) y su reglamento (DS N°008-2005-PCM).
- Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338) y su reglamento (D.S. N°001-2010-AG).
- Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (D.S. N°015-2015-MINAM).
- Aprueban disposiciones para la implementación de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (D.S. N°023-2009-MINAM).
- Clasificación de Cuerpos de Agua Superficiales y Marino-Costeros (R.J. N°202-2010-ANA).

- Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas (D.S. N°010-2010-MINAM).
- Ley General de Minería (D.S. N°014-92-EM).
- Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las Actividades de Explotación, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero (D.S. N°040-2014-EM)
- Términos de Referencia Comunes para la Elaboración de EIA-d y EIA-sd (Categoría III) de Proyecto de explotación, beneficio y labor general mineros metálicos a nivel de factibilidad (R.M. N°116-2015-EM)

Así mismo se han considerado las guías ambientales publicadas por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM):

- Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes
- Guía para la evaluación de impactos en la calidad de las aguas superficiales por actividades minero metalúrgicas
- Guía Ambiental para el Manejo de Agua en Operaciones Minero – Metalúrgicas.
- Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas.
- Guía para el Manejo de Relaves Mineros.
- Guía Cierre de Minas.

E igualmente se ha considerado la guía ambiental publicada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA)

- Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (RJ N°010-2016-ANA).

4 Características de las zonas de estudio

Teniendo en cuenta que para el desarrollo de la tesis se han utilizado materiales y efluentes de dos unidades mineras, en el presente capítulo se describe la ubicación de estas unidades y sus características ambientales más representativas.

El uso de distintos efluentes y materiales servirá para comparar la influencia de caracterización de estos sobre la elección de la alternativa óptima de tratamiento.

4.1 Mina 1

La denominada Mina 1 corresponde a un proyecto minero subterráneo con labores entre los 3900 a 4800 msnm ubicado en una de las cabeceras de la cuenca alta del Río Chancay perteneciente a la provincia de Huaral en el departamento de Lima.

La mineralización es polimetálica (zinc, plomo y plata), la ley de zinc es alta, promedio 15%, existiendo puntualmente leyes superiores a 30% de zinc.

De la data de las 10 estaciones pluviométricas cercanas al proyecto, se concluye que la precipitación total media anual para años promedio es de 647 mm teniendo valores de 886 mm para años húmedos y 416 mm para los años secos. Además, la zona tiene una evapotranspiración anual media de 377.3mm.

En el área del proyecto se han identificado cuatro cauces superficiales considerados como cuerpos receptores (quebradas). Los caudales medidos en dichos cuerpos van de 1 a 18 l/s. En tanto los análisis de calidad de la Tabla 4-1 muestran valores de pH neutros que van desde 7.3 a 7.97 encontrándose dentro de lo contemplado por los ECA Agua Categoría 3 Riego de Vegetales y Bebida de Animales (subcategorías D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: Bebida de Animales) aprobados el por D.S. N°015-2015-MINAM.

Vale mencionar que en mérito al inciso 3.3 del artículo 3° del D.S. N°023-2009-MINAM que indica que “para aquellos cuerpos de agua que no se les haya asignado categoría de acuerdo a su calidad, se considerará transitoriamente la categoría del recurso hídrico al que tributan”, las quebradas 1-2-3 y 4 han sido evaluadas de acuerdo a los ECA Categoría 3 al ser estas afluentes al Río Chancay, el cual de acuerdo a la Clasificación de Cuerpos de Agua Superficiales y Marino-Costeros aprobada por R.J. N°202-2010-ANA figura con Id. Cuerpo de Agua #137558 y pertenece a la mencionada categoría.

Tabla 4-1: Calidad de las aguas en cuerpos receptores (Mina 1)

Parámetros	Caudal	pH	OD	STS	DBO	Cianuro Wad	Arsénico	Cobre	Hierro	Mercurio	Plomo	Zinc	Coliformes totales
Unidades	l/s	u.e.	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	NMP/100ml
Quebrada 1	1	7.97	5.5	4	<3	<0.005	<0.2	<0.01	0.152	<0.00005	<0.05	0.0095	13
Quebrada 2a	8-10	7.3	4	13	<3	<0.005	<0.2	<0.01	0.116	<0.00005	<0.05	0.021	<3
Quebrada 2b	4	7.4	5	5	<3	<0.005	<0.2	<0.01	0.159	<0.00005	<0.05	0.008	<3
Quebrada 3	12	7.3	6.5	13	<3	<0.005	<0.2	<0.01	0.076	<0.00005	<0.05	0.007	-
Quebrada 4	18	7.5	6.6	13	<3	<0.005	<0.2	<0.01	0.052	<0.00005	<0.05	0.036	<3
ECA3 D1(*)	-	6.5-8.5	4	-	15	0.1	0.1	0.2	5	0.001	0.05	2	1000
ECA3 D2(*)	-	6.5-8-4	5	-	15	0.1	0.2	0.5	-	0.01	0.05	24	5000

(*) D.S. N°015-2015-MINAM: ECA's Agua Categoría 3 (subcategorías D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: Bebida de Animales)
 Fuente.- Elaboración propia, 2016

4.2 Mina 2

La denominada Mina 2 corresponde a una mina subterránea ubicada en la cabecera de la hoya del Mantaro en la provincia de Concepción del departamento de Junín. Históricamente es una mina de zinc, sin embargo, varias perforaciones descubrieron zonas de oro, plomo y manganeso.

La mina se encuentra ubicada sobre una altitud de 4200 msnm y de acuerdo a estaciones meteorológicas cercanas, la precipitación promedio alcanza los 1040.4mm al año y evapotranspiración media anual de 87 mm

En el área del proyecto se encuentran diversas fuentes hídricas entre aguas naturales y cuerpos receptores. Las aguas naturales corresponden a tres lagunas ubicadas aguas arriba del área minera. Estas lagunas alimentan con sus descargas a las quebradas contiguas y se caracterizan por tener carga metálicas muy baja, además de valores de pH neutros a ligeramente alcalinos por encontrarse en una zona calcárea. En la Tabla 4-2 se realiza la evaluación de la calidad del agua de las lagunas tomando en consideración los ECA's Agua Categoría 4 (subcategoría E1 Lagos y Lagunas) aprobados por D.S. N°015-2015-MINAM.

Por otro lado, los cuerpos receptores identificados como Quebrada 1 y Quebrada 2 fueron evaluados en la Tabla 4-3 considerando la ECA's Agua Categoría 3 (subcategoría D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: Bebida de Animales) presentando valores de pH neutros con poca concentración metálica a excepción del Zn, As y Pb. Vale mencionar que en mérito al inciso 3.3 del artículo 3° del D.S. N°023-2009-MINAM que indica que “para aquellos cuerpos de agua que no se les haya asignado categoría de acuerdo a su calidad, se considerará transitoriamente la categoría del recurso hídrico al que tributan”, las quebradas 1 y 2 han sido evaluadas de acuerdo a los ECA Categoría 3 al ser estas afluentes al Rio Mantaro, el cual de acuerdo a la Clasificación de Cuerpos de Agua Superficiales y Marino-Costeros aprobada por R.J. N°202-2010-ANA figura con Id. Cuerpo de Agua # 4996 y pertenece a la mencionada categoría.

Tabla 4-2: Calidad de las aguas naturales (Mina 2)

Parámetros	Caudal	pH	Conductividad	Fe	Al	Mn	Cu	Zn	As	Pb	Mg	Ca
Unidades	l/s	u.e.	(μ S/cm)	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Laguna 1	-	8.26	111	<0.0031	<0.0019	0,0079	<0.0001	0.0077	0.0283	<0.0002	5.17	23.26
	0.2	7.04	582	1.81	-	0.34	0.012	0.367	<0.001	0.06	17	-
	-	7.5	620	6.82	-	-	ND	21.78	0.706	ND	-	-
Laguna 2	432.9	7.51	158	0.69	-	0.11	0.014	0.284	<0.001	0.04	2.4	-
	-	8.84	115	ND	-	-	ND	0.005	0.017	ND	-	-
Laguna 3	152.7	9.59	220	0.29	-	0.07	0.013	0.054	<0.001	0.06	2.4	-
	-	8.03	1091	0.112	-	0.038	<0.004	0.022	0.069	<0.01	-	184.3
	-	8.15	-	0.178	-	-	ND	0.054	0.052	ND	-	-
ECA4 E1 (*)	-	6.5-9.0	1000	-	-	-	0.1	0.12	0.15	0.0025	-	-

(*) D.S. N°015-2015-MINAM: ECA's Agua Categoría 4 Conservación del ambiente acuático (subcategorías E1: Lagunas y Lagos)

Fuente.- Elaboración propia, 2016

Tabla 4-3: Calidad de las aguas en cuerpos receptores (Mina 2)

Parámetros	Caudal	pH	Conductividad	Fe	Al	Mn	Cu	Zn	As	Pb	Mg	Ca
Unidades	l/s	u.e.	(μ S/cm)	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Quebrada 1	-	7.17	1014	10.14	-	-	ND	4.961	52.73	ND	-	-
Quebrada 2	634.3	7.05	404	1.57	-	4.016	0.013	4.05	<0.001	0.03	10.2	-
	-	8.04	927	<0.03	-	41.08	<0.004	21.15	7.33	<0.01	-	84.24
ECA3 D1(*)	-	7.65	792	4,147	-	-	ND	12.38	4.42	ND	-	-
ECA3 D2(*)	-	6.5-8.5	2500	5	5	0.2	0.2	2	0.1	0.05	-	-
	-	6.5-8.4	5000	-	5	0.2	0.5	24	0.2	0.05	250	-

(*) D.S. N°015-2015-MINAM: ECA's Agua Categoría 3 (subcategorías D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: Bebida de Animales)
Fuente.- Elaboración propia, 2016

5 Desarrollo experimental

El desarrollo experimental de la tesis abarca la caracterización de materiales y efluentes provenientes de las unidades mineras descritas en el anterior capítulo y la elección de alternativas de tratamiento que permitan cumplir tanto con la legislación minero-ambiental vigente en Perú como con la optimización de los costos de tratamiento.

Como primer punto se abordará la caracterización geoquímica de los materiales, desmontes o relaves. Seguidamente se presentará la caracterización de los efluentes mediante la toma de parámetros fisicoquímicos, la determinación del contenido de metales totales y disueltos y la aplicación de una serie de ensayos de laboratorio utilizando el método original de neutralización directa y un método alternativo de neutralización secuencial que contempló la separación de sólidos en etapas intermedias.

La elección de la alternativa óptima de tratamiento se realizará comparando la eficiencia de ambos métodos en base a aspectos económicos principalmente ligados al consumo de cal y tomando como base la caracterización de materiales y efluentes propios de la mina.

5.1 Metodología aplicada

La parte experimental de la presente tesis está marcada por tres etapas:

- Caracterización de materiales mineros
- Caracterización de efluentes
- Elección de alternativa de tratamiento

5.1.1 Caracterización de materiales mineros

El dimensionamiento del muestreo es un paso fundamental en el proceso de caracterización geoquímica de los materiales pues se requiere que las muestras tomadas sean lo más representativas de la zona o del componente minero.

El MEND Report 1.20.1 publicado en diciembre del 2009 por el Ministerio de Recursos Naturales de Canadá sugiere dos tipos de dimensionamiento de muestreo basado en la etapa en que la se encuentra el proyecto (exploración, pre-factibilidad o factibilidad) o en el tonelaje de roca alterada cuando se muestrea una unidad

geológica o un componente minero sin ninguna información previa como referencia. Sin embargo, este mismo reporte menciona que ambas propuestas son solo un punto de partida y no recomiendan o determinan el número final de muestras requeridas. El reporte señala que la frecuencia de muestreo final deberá de ser determinada en campo en base a la variabilidad de los resultados analíticos, los objetivos de predicción y la precisión requerida.

De igual manera, la *Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas* publicada por el *Ministerio de Energía y Minas (MINEM)* menciona solo pasos para la implementación de un programa de muestreo y pruebas por lo que el número de muestras estará ligado a los objetivos de la campaña de muestreo.

Para el caso de Mina 1 y 2, se realizaron evaluaciones en campo para identificar las zonas de muestreo y el posterior envío del material a laboratorios reconocidos para ser sometidos a ensayos estáticos y de lixiviación usualmente recomendados en este tipo de estudios. Las pruebas contempladas fueron: ABA, NAG, SPLP y Mineralogía.

5.1.2 Caracterización de efluentes

La caracterización de efluentes está marcada por dos etapas:

- Muestreo y caracterización del agua de mina
- Ensayos de neutralización a nivel laboratorio

5.1.2.1 Muestreo y caracterización del agua de mina

Para la caracterización de la calidad de los efluentes a tratar se determinaron puntos de muestreo en cada una de las unidades mineras considerando principalmente los drenajes provenientes de bocaminas y depósitos de relaves.

En campo, la toma de Parámetros Fisicoquímicos fue realizada utilizando equipos portátiles y aplicando el *Protocolo de Monitoreo de Agua y Efluentes (MINEM)*.

Las muestras recolectadas fueron remitidas a laboratorios certificados para la determinación del contenido de metales totales y disueltos. Los detalles del análisis realizado se muestran en la Tabla 5-1:

Tabla 5-1: Métodos de Referencia de Análisis de Calidad de Agua

Análisis	Parámetro	Unidad	Método	Referencia
Inorgánico	Metales totales (t) y metales disueltos (d)	mg/l	Espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente	EPA 200.7 Determination of trace elements in waters and wastes by inductively coupled plasma mass spectrometry.

Fuente.- Elaboración propia, 2016

Por último, los resultados obtenidos en campo y en laboratorio fueron evaluados respecto de los *Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas* aprobados por D.S. N°010-2010-MINAM y a modo referencial con los *Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua* aprobados por D.S. N°015-2015-MINAM.

5.1.2.2 Procedimientos aplicados en laboratorio

Se realizaron una serie de pruebas en los Laboratorios de la Sección Ingeniería de Minas de la Pontificia Universidad Católica del Perú aplicando dos procedimientos:

- Procedimiento N°1: Ensayos de neutralización directa
 - a. Una vez contenida la muestra en el vaso de precipitados se procedió a la medición de los parámetros físico químicos iniciales.
 - b. En seguida, se inició la agitación hasta lograr la uniformización de la muestra.
 - c. Se procedió a agregar porciones de masa conocida de cal para luego continuar con la agitación por un lapso de 10 minutos. Finalizado este tiempo, se realizó la medición de pH, Potencial Redox y CE, para luego añadir otra porción de cal.
 - d. El paso anterior fue repetido hasta obtener un $\text{pH} \approx 8.5$. Luego se inició el proceso de decantación donde la muestra permaneció sin agitación por un lapso de 15 a 20 minutos pudiendo observarse los sólidos precipitados.
 - e. Por último, se elaboraron las Curvas de neutralización representativas para cada efluente con el fin de identificar los rangos de hidrólisis de los metales y determinar las etapas de corte de los Ensayos de neutralización secuencial.

- Procedimiento N°2: Ensayos de neutralización secuencial
 - a. Inicialmente, se sometió a la muestra a los pasos a, b y c del Procedimiento N°1.
 - b. Al alcanzar un $\text{pH} \approx 4.5$ (hidrólisis del Fe) se da inicio la Primera Etapa de Corte del Ensayo Secuencial y se somete a la muestra a decantación por un lapso de 15 a 20 minutos.
 - c. Los sólidos formados producto de la decantación fueron separados y depositados en frascos.
 - d. Los pasos mencionados fueron repetidos en las siguientes dos etapas en las cuales se alcanzó un $\text{pH} \approx 5.5$ (hidrólisis del Al) y finalmente un $\text{pH} \approx 10$ (hidrólisis del Mn).

Materiales e instrumentos

Se utilizaron los siguientes equipos y reactivos:

- Multiparámetro
- Cal Viva Cal Sur (CaO 90%)
- Vaso de Precipitados
- pH - metro
- Agitador magnético
- Balanza de precisión
- Medidor de Potencial Redox

Figura 5-1: Instrumentación de laboratorio



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Figura 5-2: Agitador Magnético y Cal Viva Cal Sur



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

5.2 Muestras de Mina 1

5.2.1 Caracterización de materiales mineros

Para el caso de la Mina 1 se tomaron muestras en campo correspondientes a material de desmonte y fueron sometidas a ensayos estáticos y pruebas de lixiviación de corta duración usualmente recomendadas en la caracterización geoquímica de residuos sólidos; estas pruebas fueron complementadas con el análisis de contenido mineralógico de cada muestra.

- Ensayo ABA

Para determinar el potencial de generación ácida a largo plazo de las muestras evaluadas se han realizado ensayos estáticos que se presentan en la Tabla 5-2:

Tabla 5-2: Resultados ABA

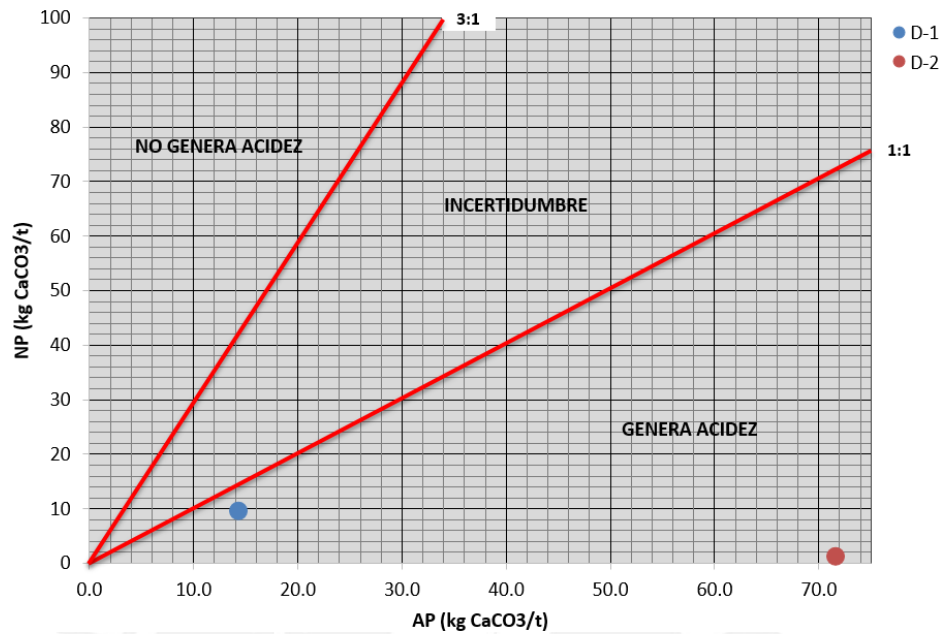
Código	pH Pasta	AP	NP	NNP	NP/AP	Sulfuro (%)
D-1	6.68	14.3	9.59	-4.71	0.67	0.5
D-2	3.52	71.63	1.23	-70.4	0.02	2.3

Fuente.- Elaboración propia, 2016

Los resultados indican que de acuerdo al Criterio NNP, los materiales de desmonte evaluados corresponden a material Generador de Acidez (NNP<-20 en el caso de la muestra D-1) y a materiales que se encuentran en el rango de generación incierta (-20<NNP<20 en el caso de la muestra D-2). Además, de acuerdo a las Figuras 5-3

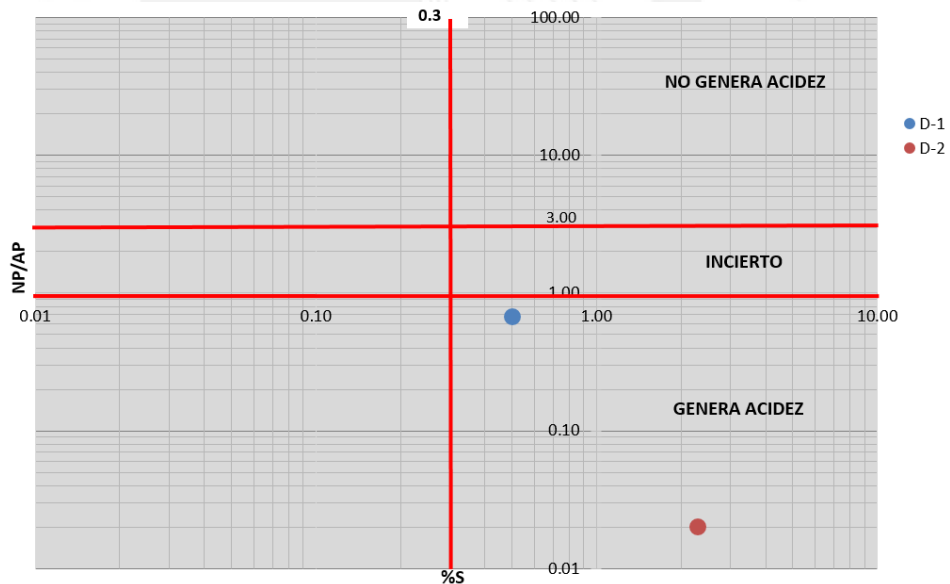
y 5-4 que representan el Criterio NP/AP y la Correlación NP/AP-%S; ambas muestras de desmonte corresponden a material Generador de Acidez (NP/AP<1 y %S>0.3).

Figura 5-3: Relación NP y AP



Fuente.- Elaboración propia, 2016

Figura 5-4: Relación NP/AP y %S



Fuente.- Elaboración propia, 2016

- Ensayo NAG

Los resultados obtenidos en el Ensayo NAG se muestran en la Tabla 5-3:

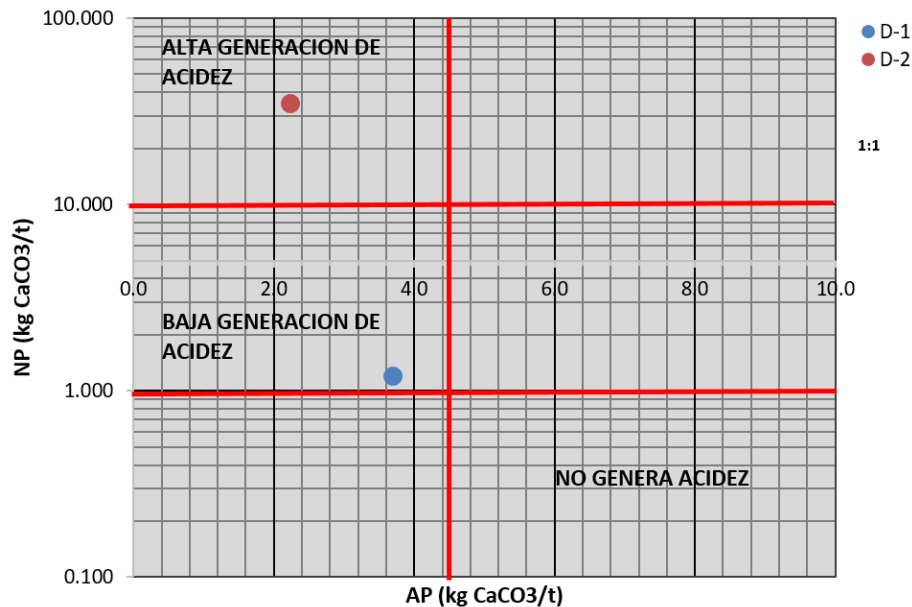
Tabla 5-3: Resultados Ensayo NAG

ID Muestra	Parámetros NAG		Clasificación según criterio NAG
	pH-NAG	NAG (pH 4.5)	
		Kg H ₂ SO ₄ /t	
D-1	3.7	1.2	Baja generación de acidez
D-2	2.23	34.7	Alta generación de acidez

Fuente.- Elaboración propia, 2016

De acuerdo al criterio de NAG, se puede decir que las muestras analizadas corresponden a material Generador de Acidez. En la Figura 5-5 se muestra la interpretación indicada.

Figura 5-5: Criterio NAG



Fuente.- Elaboración propia, 2016

- Prueba SPLP

La Tabla 5-4 muestra las concentraciones de los metales de interés medioambiental ligados a la generación de aguas acidas que podrían ser lixiviados a partir del material evaluado; así mismo, se incluye a modo referencial los *Límites Máximos Permisibles (D.S. 010-2010 MEM) para efluentes de operaciones mineras* y los *ECA's Agua Categoría 3 (subcategorías D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: Bebida de Animales) aprobados por D.S. N°015-2015-MINAM* a fin de realizar la comparación referencial respectiva.

Tabla 5-4: Resultados de las pruebas SPLP

Parámetros (Metales Totales)	Unid.	Muestras evaluadas Desmonte		LMP (*)	ECA (**) Categoría 3	
		D-1	D-2		D1	D2
Al	mg/l	0.032	9.138	-	5	5
As	mg/l	0.005	0.013	0.1	0.1	0.2
Cd	mg/l	<0.0024	0.4731	0.05	0.01	0.05
Cu	mg/l	<0.0036	2.0437	0.5	0.2	0.5
Fe	mg/l	<0.04	9.35	-	5	-
Mn	mg/l	0.812	>20	-	0.2	0.2
Pb	mg/l	<0.01	3.09	0.2	0.05	0.05
Zn	mg/l	<0.14	>20	1.5	2	24

(*) D.S. N°010-2010-MINAM: Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas

(**) D.S. N°015-2015-MINAM: ECA's Agua Categoría 3 (subcategorías D1)

Fuente.- Elaboración propia, 2016

De la tabla se verifica que las concentraciones de manganeso en el lixiviado de ambas muestras están por encima de los ECA's Agua. Las concentraciones de cadmio, cobre, plomo y zinc en el lixiviado están por encima de los LMP para la muestra D-2 y sólo el As no ha sido cubierto por los ECA's Agua.

Se señala además que en la Prueba SPLP, las muestras evaluadas, son sometidas a condiciones extremas (simulando lo que podría ser una lluvia ácida) para obtener el lixiviado analizado, condición que resultaría favorable para la movilización de metales pesados tal como se ve claramente en el lixiviado de la muestra D-2. Así también, se menciona que la comparación con los LMP y los ECA's es únicamente referencial.

- **Análisis Mineralógico**

La Tabla 5-5 y la Figura 5-6 presentan la composición y abundancia mineralógica de las muestras sometidas al análisis de difracción de rayos X.

De los resultados mineralógicos se evidencia la presencia de minerales ácido generadores (sulfuros) en ambas muestras, sin embargo el contenido más importante está en la muestra D-2 con un contenido global de 11.018% siendo la Pirita (5.632%) y la Esfalerita (4.148%) los minerales sulfurosos más abundantes en dicha muestra.

Por otro lado, el contenido de minerales consumidores de acidez en la muestra está dado por la presencia de Calcita en un porcentaje mínimo (1.6%) en la muestra D-1, mientras que la muestra D-2 la presencia de este mineral es casi nula (0.01%).

Tabla 5-5: Análisis Mineralógico por DRX

Fórmula	Composición Mineralógica	%en Peso	
		D-1	D-2
SiO ₂	Cuarzo	38.56	27.47
CaCO ₃	Calcita	1.6	0.01
K(AlSi ₃ O ₈)	Ortoclasa	7.3	6.2
Na(AlSi ₃ O ₈)	Albita	3.1	2.3
Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈)	Anortita	2.4	3.5
FeS ₂	Pirita	1.275	5.632
CuFeS ₂	Calcopirita	0.006	0.136
ZnS	Esfalerita	0.018	4.148
PbS	Galena	0.003	1.102
Fe ₂ O ₃	Hematita	4.27	13.17
Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Caolinita	1.4	4.1
MnO ₂	Pirolusita	0.07	0.09
KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	Muscovita	9.5	0.14
Na _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·2H ₂ O	Montmorillonita	30.5	32.00

Fuente.- Elaboración propia, 2016

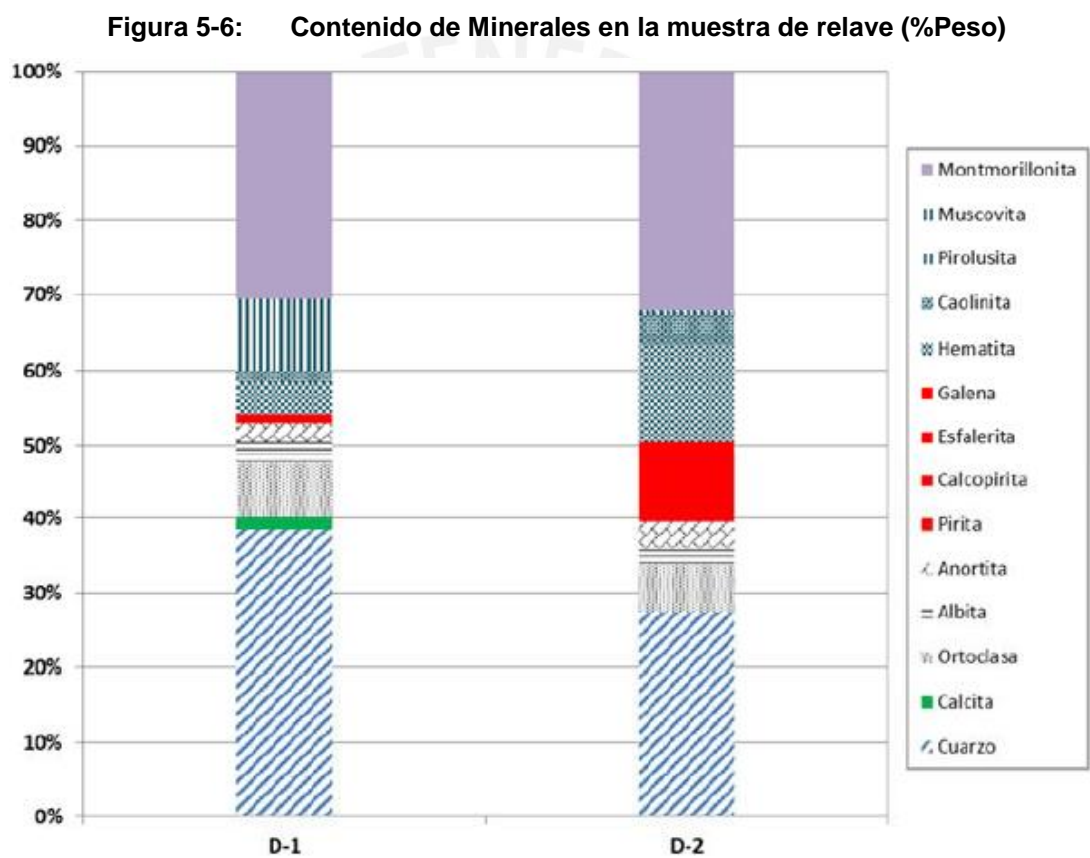
Adicionalmente tanto en la muestra D-1 como en la muestra D-2, se observa la presencia de óxidos de hierro (4.27 % y 13.17% respectivamente).

Como complemento a los resultados obtenidos en esta sección, se acota lo siguiente: la pirita, por lo general, es el mineral con mayor incidencia sobre el potencial generador de drenaje ácido por su tendencia oxidarse fácilmente una vez expuesta a la intemperie; por otro lado, la calcita es el mineral con mayor incidencia sobre el potencial de neutralización por su fácil disolución una vez expuesta a la intemperie. Si bien hay otros minerales presentes que influyen en la generación de acidez y su neutralización, las cantidades presentes son muy pequeñas y su reacción en condiciones naturales es lenta y se realiza con dificultad.

De acuerdo a los criterios de evaluación de la prueba ABA y el Test NAG cuyas correlaciones gráficas se muestran en las Figuras 5-3, 5-4 y 5-5, los materiales de desmonte evaluados de la Mina 1 corresponden a material Generador de Acidez.

Según la prueba de lixiviación (SPLP), el lixiviado resultante de exponer las muestras al contacto con una solución acuosa ácida presenta concentraciones significativas de metales como Al, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en el caso de la muestras D-2 y Mn en el caso de la muestra D-1, lo que debe ser considerado como un indicativo de una probable tendencia a la movilidad de estos elementos a medios acuosos, que a la vez amerita la recomendación de un estudio que involucre pruebas cinéticas a los materiales involucrados.

De acuerdo al análisis mineralógico, la muestra con mayor cantidad de minerales sulfurosos destacando la Pirita y la Esfalerita es la muestra D-2.



Fuente.- Elaboración propia, 2016

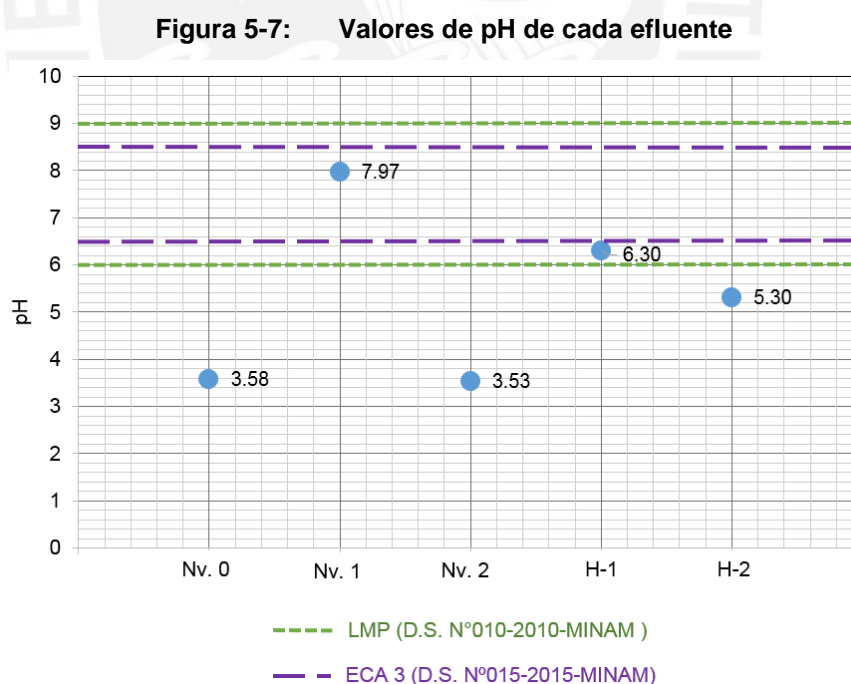
5.2.2 Caracterización de efluentes

Para el caso de la Mina 1, el estudio ha considerado la descarga de cinco (5) labores mineras nombradas como Nv.0, Nv.1, Nv.2, Nv. H-1 y Nv. H-2.

5.2.2.1 Muestreo y caracterización

Durante el Trabajo de Campo se realizaron las mediciones de los parámetros-físico químicos y se recolectaron muestras para la determinación del contenido de metales totales y disueltos, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 5-6. En esta misma tabla se resalta en color rojo los parámetros y concentraciones que no cumplen con los *Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas (D.S. N°010-2010-MINAM)* y a modo referencial con los *ECA's Agua (D.S. N°015-2015-MINAM)*.

Siendo el pH un indicador directo de la naturaleza ácida, neutra o básica del agua, de acuerdo a los valores mostrados en la Tabla 5-6, se puede calificar a los efluentes de los Nv. 0 y 2 como aguas ácidas, a los del Nv. H-2 como moderadamente ácidas y a los del Nv. 1 y H-1 como aguas neutras (ver Figura 5-7).



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

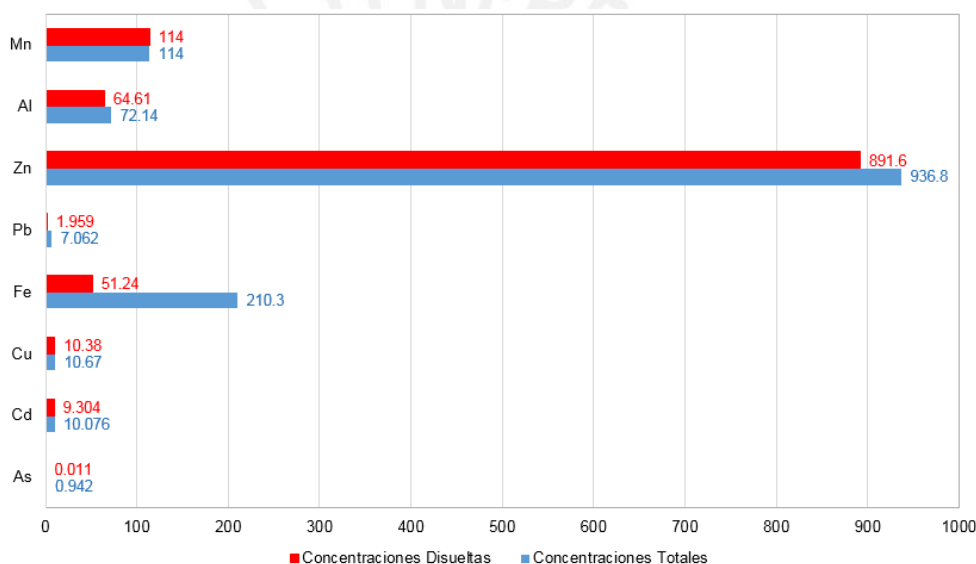
Tabla 5-6: Características de los efluentes de Mina 1

Parámetro	Caudal	pH	Conductividad	OD	STS	Cianuro Total	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Pb	Hg	Zn	Al	Ca	Mn	Mg	
Unidad	l/s	u,e	µS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
Concentraciones Total																			
Nv 0	0.07	3.58	3460	3.4	1165	0.018	0.288	8.049	0.027	1.552	183	1.555	-	1027	30.51	158.3	85.69	71.05	
Nv 1	0.11	7.97	587	2.9	1636	<0.005	0.048	0.1362	0.008	0.115	17.53	3.646	-	8.73	6.73	97.94	3.62	17.45	
Nv 2	0.04	3.53	4170	3.11	382	0.013	0.942	10.076	0.108	10.67	210.3	7.062	-	936.8	72.14	262.2	114	123.1	
H-1	0.09	6.3	213	3.43	11	<0.005	<0.005	0.0585	<0.001	0.074	1.833	0.808	-	16.14	1.49	24.2	3.48	8.2	
H-2	0.14	5.3	113	4.15	<2	<0.005	<0.005	0.023	<0.001	0.007	0.103	0.056	-	6.98	0.7	6.83	0.68	2.84	
LMP (*)	-	6-9	-	-	50	1	0.1	0.05	-	0.5	-	0.2	0.002	1.5	-	-	-	-	
ECA 3D1(**)	-	6.5-8.5	2500	4	-	-	0.1	0.01	0.1	0.2	5	0.05	0.001	2	5	-	0.2	-	
ECA 3D2(**)	-	6.5-8.4	5000	5	-	-	0.2	0.05	1	0.5	-	0.05	0.01	24	5	-	0.2	250	
Concentraciones Disueltas																			
Nv 0	0.07	3.58	3460	3.4	1165	0.018	0.018	7.564	0.018	1.548	79.4	0.854	<0.0002	983.8	23.63	141	57.97	65.66	
Nv 1	0.11	7.97	587	2.9	1636	<0.005	<0.005	0.0073	0.001	0.003	0.028	0.018	<0.0002	0.129	0.052	82.6	1.13	13.59	
Nv 2	0.04	3.53	4170	3.11	382	0.013	0.011	9.304	0.067	10.38	51.24	1.959	<0.0002	891.6	64.61	229.7	114	117.7	
H-1	0.09	6.3	213	3.43	11	<0.005	<0.005	0.0585	<0.001	0.015	0.019	0.118	<0.0002	15.77	0.035	23.1	3.44	8.12	
H-2	0.14	5.3	113	4.15	<2	<0.005	<0.005	0.023	<0.001	0.007	0.041	0.055	<0.0002	6.976	0.584	6.83	0.68	2.83	
LMP (*)	-	6-9	-	-	50	1	0.1	0.05	-	0.5	2	0.2	0.002	1.5	-	-	-	-	
ECA 3D1(**)	-	6.5-8.5	2500	4	-	-	0.1	0.01	0.1	0.2	5	0.05	0.001	2	5	-	0.2	-	
ECA 3D2(**)	-	6.5-8.4	5000	5	-	-	0.2	0.05	1	0.5	-	0.05	0.01	24	5	-	0.2	250	

(*) D.S. N°010-2010-MINAM: Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas
 (**) D.S. N°015-2015-MINAM: ECA's Agua Categoría 3 (subcategorías D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: Bebida de Animales)
 Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Los efluentes de los Nv. 0 y 2 a pesar de tener caudales muy bajos (0.07 l/s y 0.04 l/s respectivamente) presentan valores que superan los LMP respecto del pH, Sólidos Totales Suspendidos, concentraciones totales de As, Cd, Cu, Pb y Zn y concentraciones disueltas de Fe. Además sobrepasan los ECA Categoría 3 para el caso de As, Cd, Cu, Pb, Cr, Mn y Zn causado principalmente por la presencia de sulfuros en las formaciones geológicas del medio; aspectos que guardan relación con lo presentado en las Tablas 5-4 (Resultados del análisis SPLP) y 5-5 (Análisis mineralógico). Por la calidad de los efluentes y con el fin de cumplir con la legislación vigente, estos drenajes deberán ser sometidos a un tratamiento químico como por ejemplo la neutralización con cal.

Figura 5-8: Contenido de metales de importancia medioambiental en la muestra Nv. 2



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

La Figura 5-8 muestra gráficamente el contenido de metales totales y disueltos presentes en los efluentes del Nv. 2. De la gráfica se puede concluir que la mayor parte de los metales presentes se encuentran disueltos por tanto se debería evaluar a mayor detalle la viabilidad o no de implementar sedimentadores previos al tratamiento.

En el caso de los efluentes de los Nv. 0, H-1 y H-2, los análisis muestran que las concentraciones totales de Cd, Cu, Pb y Zn superan ligeramente los LMP sin embargo este exceso no se refleja en los valores obtenidos para concentraciones disueltas, a excepción del Zn que si supera ligeramente el límite de 1.5 mg/l. Así tomando en cuenta que los tres efluentes tienen valores elevados de Sólidos Totales Suspendidos se podría considerar la aplicación de un tratamiento físico por

sedimentación-precipitación a la salida de las bocaminas con el fin de decantar las fases sólidas y por coprecipitación atrapar el Zn en los precipitados. Si después del proceso de sedimentación la calidad del agua continúa con contenidos de Zn superiores a los permitidos se deberá implementar su tratamiento químico o un tratamiento pasivo.

5.2.2.2 Ensayo de neutralización a nivel laboratorio

En el ítem anterior se identificó que las descargas ácidas de la Mina 1 corresponden a los efluentes de los Nv. 0 y 2 y que ambos tienen características muy parecidas donde predomina la alta concentración de Fe, Al, Zn y Mn y el bajo pH con valores cercanos a 3.5.

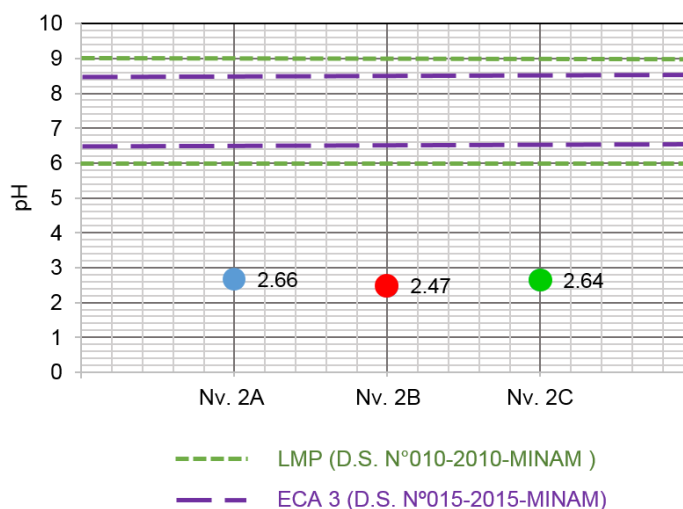
Dada la mayor disponibilidad de muestra, se eligió a los efluentes del Nv. 2 para la realización de los ensayos de neutralización con la finalidad de realizar la mayor cantidad de ensayos posibles a fin de obtener el mayor número posible de Curvas de Neutralización y detectar las zonas de hidrólisis de los elementos donde predominan sus fases sólidas en forma de hidróxidos condición que facilita la separación sólido-líquida. En la Tabla 5-7 se detallan los procedimientos realizados y en la Figura 5-9 los valores de pH previo al inicio de los ensayos.

Tabla 5-7: Descripción de muestras ensayadas

Origen	Muestra	Volumen tratado	Procedimientos aplicados
Nv. 2	Nv.2 A	500 ml	Procedimiento N°1: Ensayos de neutralización directa
	Nv.2 B	500 ml	
	Nv.2 C	350 ml	Procedimiento N°2: Ensayos de neutralización secuencial

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Figura 5-9: Valores de pH de cada efluente previo al inicio de los ensayos



Fuente: Elaboración propia, 2016.

Procedimiento N°1: Ensayos de neutralización directa

Los ensayos Nv.2 A y Nv. 2 B fueron realizados de manera directa y sin retiro de sólidos, por tanto, la cal fue consumida en su totalidad al mantenerse la agitación durante todo el ensayo.

Se menciona además que en su mayoría los efluentes tratados cumplen con los LMP y ECA's Agua Cat. 3, sin embargo, el efluente tratado del ensayo Nv.2A no cumple lo solicitado por la norma en cuanto a Zn y Mn. Ver Tabla 5-8.

Nv. 2A

Tal como se muestra en la Figura 5-10, el ensayo finalizó al alcanzar el pH=7.16 obteniendo un consumo de 470 mg de cal. Las curvas de Consumo de Cal en función al pH y la relación Potencial Redox-pH muestran que según se incrementa el consumo cal, también se incrementa el pH del medio y por el contrario, el Potencial Redox desciende desde 600 mV (que corresponde a aguas ácidas) hasta valores inferiores a 200 mV que corresponde a aguas neutras o con poca carga metálica.

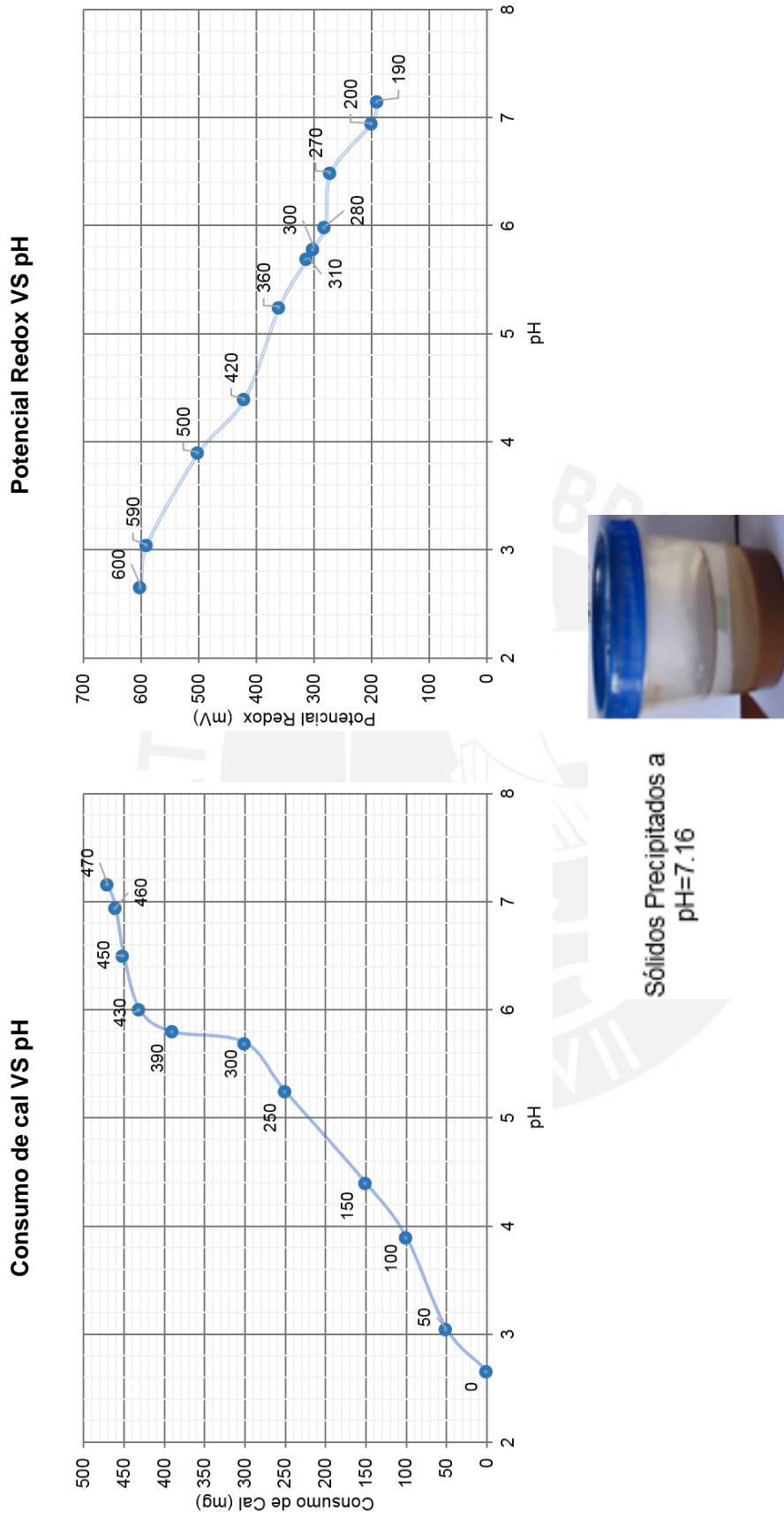
Es preciso señalar que al detener el ensayo al alcanzar el pH=7.16, se observó una rápida separación sólido-líquido obteniéndose finalmente las fases sólidas mostradas en la siguiente figura. Así mismo la curva de Consumo de Cal en función al pH permite visualizar las zonas de tamponamiento de Fe entre el pH 3 y 3.8, para el Al entre 4 y 5.5 y para el caso del Zn entre 5.7 y 7.16, valores que guardan relación con las gráficas teóricas de la Figura 2-3. Sin embargo se señala que el presente ensayo pudo no alcanzar la hidrólisis del Mn el cual precipita según las curvas teóricas entre el pH 8-10 y de acuerdo a la experiencia por encima del pH=9.

Nv. 2B

De acuerdo a la Figura 5-11, este ensayo se realizó hasta alcanzar el pH=9.39 (valor por encima de los LMP) y 73.9 mV de Potencial Redox (valor que corresponde a aguas neutras o con poca carga metálica).

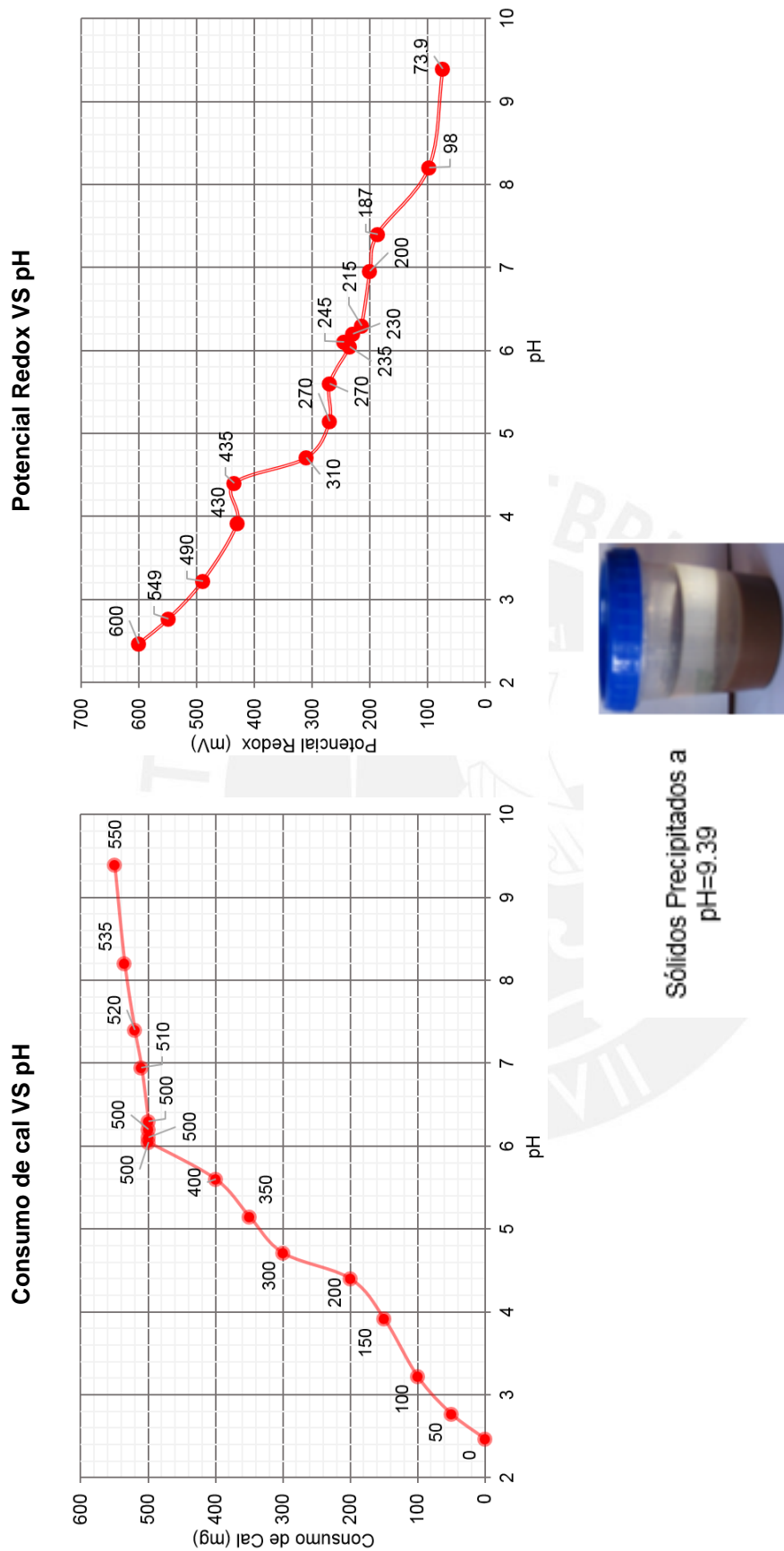
Las zonas de tamponamiento identificadas fueron para el Fe entre el pH 2.6 y 3.8, para el Al entre 4.4 y 5.3, para el Zn entre 5.8 y 8 y a partir del pH=8.1 para el Mn. Así mismo se señala que las fases sólidas obtenidas presentan una coloración más oscura respecto de la Figura 5-10 esto debido a que al alcanzar un mayor pH, se ha promovido la precipitación del Zn y Mn cuyos valores de hidrólisis teóricos se encuentran entre los pH 6-10 (Figura 2-3).

Figura 5-10: Procedimiento N°1 para Nv. 2A



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Figura 5-11: Procedimiento N°1 para Nv. 2B



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Procedimiento N°2: Ensayos de neutralización secuencial

Nv. 2C

Este ensayo se realizó con una muestra de 350 ml y su ejecución fue de manera secuencial, retirando las fases sólidas formadas en el proceso de neutralización a diferentes valores de pH.

La neutralización se realizó teniendo un pH de inicio de 2.64 hasta un pH final de 9, alcanzando un consumo total de cal de 300 mg. La Figura 5-12 muestra la curva de Consumo de Cal en función al pH, la cual permite visualizar las zonas de tamponamiento del Fe entre el pH 3 y 4, del Al entre 4.4 y 6, del Zn a partir del 6.4 y un quiebre entre los pH 6.8 y 7 que pudiera marcar el inicio de la formación de hidróxidos insolubles de Mn.

Las fases sólidas retiradas en el ensayo secuencial se muestran en tres frascos:

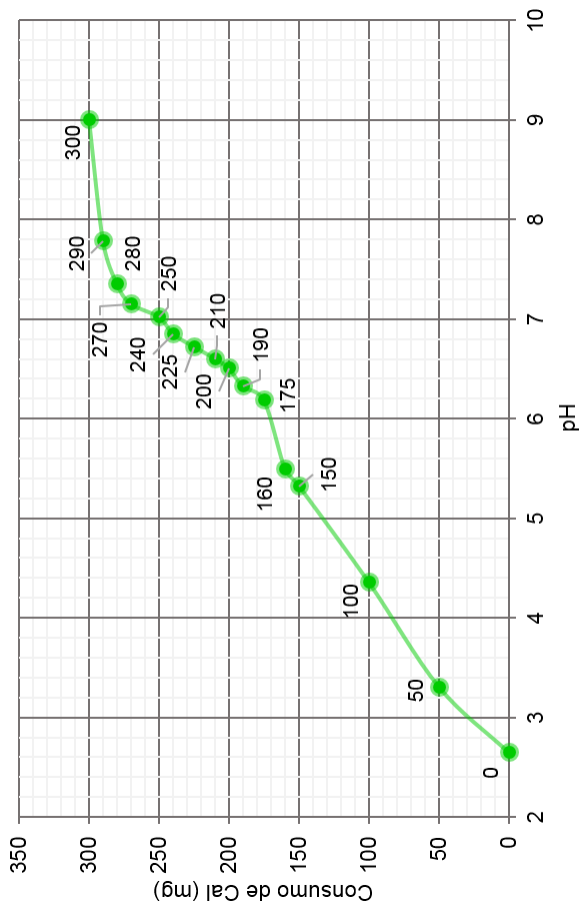
- El frasco M-1 contiene los sólidos obtenidos a pH=5.49, los cuales presentan una coloración marrón-naranja donde la fase mayoritaria pertenecería a hidróxidos de hierro
- El frasco M-2 contiene los sólidos obtenidos a pH=6.5 y presentan una coloración blanquecina propia de los hidróxidos de aluminio
- El frasco M-3 contiene los sólidos obtenidos al finalizar el ensayo (pH=9) y tienen una coloración marrón oscura que correspondería mayoritariamente a las fases sólidas de Zn (hidróxidos de Zinc) y en menor medida a precipitados de Mn. Además haciendo un llamado a las gráficas de la Figura 2-3 donde se verifica que las curvas teóricas de hidrólisis del Zn y Mn se sobreponen en un pequeño rango (Zn pH=6-9 y Mn pH=8-10) se puede concluir que las fases sólidas decantadas en el frasco M-3 contienen ambos metales.

Una vez realizado el retiro de los sólidos en una determinada etapa, se continuó con el ensayo añadiendo cal para seguir con el proceso de neutralización.

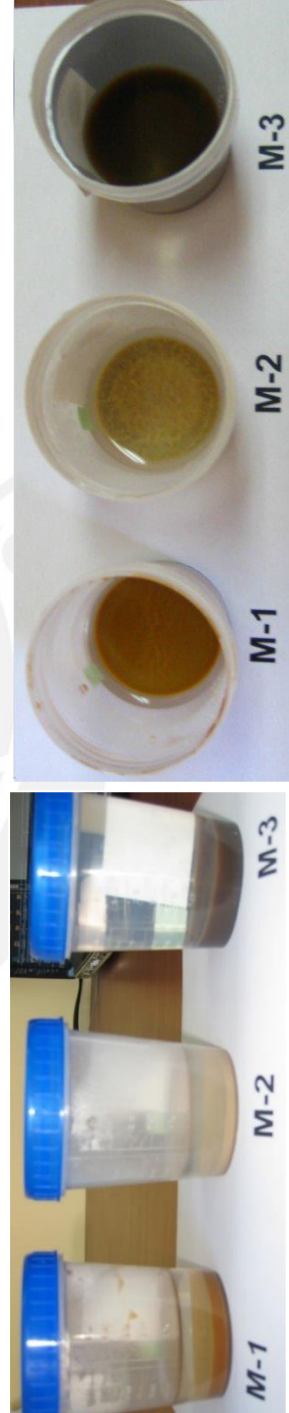
Se menciona que la duración de este ensayo fue mayor respecto de los ensayos de neutralización directa debido al tiempo de sedimentación previo al retiro de los sólidos.

En el ensayo se alcanzaron concentraciones de metales que cumplen con los LMP y ECA's Agua Cat. 3, el detalle se presenta en la Tabla 5-8.

Figura 5-12: Procedimiento N°1 para Nv. 2C



Fases sólidas retiradas en el ensayo secuencial:



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Tabla 5-8: Concentración de metales Post tratamiento

Parámetro	pH	As	Cu	Fe	Pb	Zn	Al	Mn
Unidad	u.e	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Concentraciones Total								
Nv 2A	7.8	0.13	0.32	0.16	0.1	2.1	0.26	5.2
Nv 2B	10.5	<0.008	<0.003	0.025	<0.01	0.2	0.1	0.254
Nv 2C	10.4	<0.008	<0.003	0.03	<0.01	0.012	0.14	0.064
LMP (*)	6-9	0.1	0.5	-	0.2	1.5	-	-
ECA 3D1(**)	6.5-8.5	0.1	0.2	5	0.05	2	5	0.2
ECA 3D2(**)	6.5-8.4	0.2	0.5	-	0.05	24	5	0.2
Concentraciones Disueltas								
Nv 2A	7.8	0.1	0.24	0.15	0.1	1.9	0.26	4.9
Nv 2B	10.5	<0.008	<0.003	0.01	<0.01	0.1	0.06	0.2
Nv 2C	10.4	<0.008	<0.003	0.03	<0.01	0.012	0.06	0.064
LMP (*)	6-9	0.1	0.5	2	0.2	1.5	-	-
ECA 3D1(**)	6.5-8.5	0.1	0.2	5	0.05	2	5	0.2
ECA 3D2(**)	6.5-8.4	0.2	0.5	-	0.05	24	5	0.2

(*) D.S. N°010-2010-MINAM: Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas

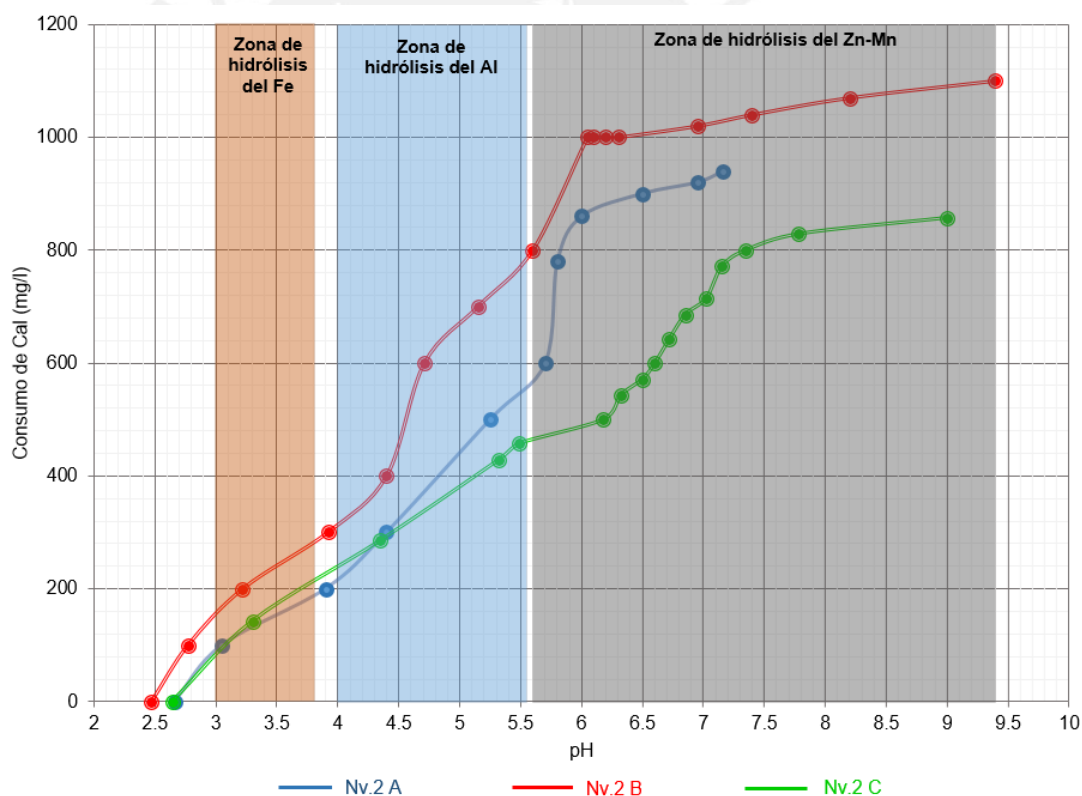
(**) D.S. N°015-2015-MINAM: ECA's Agua Categoría 3 (subcategorías D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: Bebida de Animales)
Fuente: Elaboración propia, 2016.

5.2.3 Elección de alternativa de tratamiento

Teniendo en cuenta que la caracterización de los desmontes (y por ende de los materiales propios de mina) dio como resultado la generación de acidez y que el SPLP concluyó que el lixiviado a generarse presentará concentraciones significativas de Al, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn y Mn (Tabla 5-4) tal cual lo evidenciado en la caracterización de efluentes de la Tabla 5-6, se concluye que el tratamiento de los efluentes deberá ser realizado mediante métodos activos y que la calidad del efluente continuará en el tiempo, sin embargo esto debería ser asegurado periódicamente en caso la mineralización cambie.

Dado que los ensayos de neutralización a nivel laboratorio fueron realizados utilizando diversos volúmenes de muestra (Tabla 5-7), se uniformizaron las curvas de neutralización con el fin de mostrar los consumos de cal en valores de mg/l:

Figura 5-13: Consumo de Cal – pH



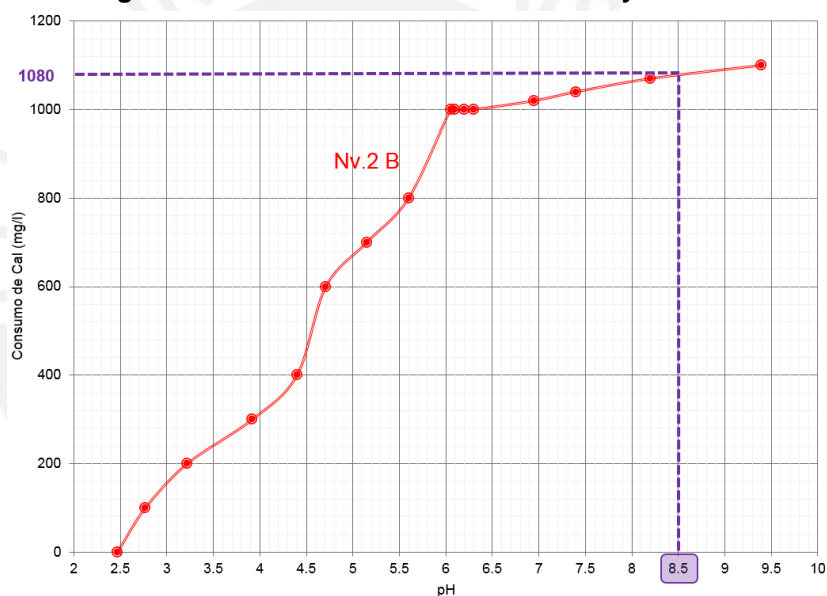
Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Las curvas de la Figura 5-13 indican que –en general- el rango de hidrólisis del Fe estaría entre pH 3 y 3.8, del Al entre pH 4 y 5.6, del Zn entre pH 5.8 y 7.9 y para el Mn a partir del pH=7 sobreponiéndose en un pequeño rango con el Zn.

Se menciona además que los efluentes tratados en los ensayos Nv.2B (neutralización directa) y Nv.2C (neutralización secuencial) cumplen con los LMP y ECA's Agua Cat. 3, sin embargo, el efluente tratado del ensayo Nv.2A no cumple lo solicitado por la norma en cuanto a Zn y Mn (Tabla 5-8).

Para el caso de los ensayos del **Procedimiento N°1 o Neutralización Directa**, como primer ejercicio se procedió a proyectar el comportamiento de la curva del ensayo **Nv.2A** (el cual tuvo como pH final=7.16) **estimando un consumo de cal de 1127.8 mg/l a un pH=8.5**. Así mismo, se verificó que para el ensayo **Nv. 2B**, **el consumo de cal a pH=8.5 fue de 1080 mg/l** (ver Figura 5-14). En este sentido, **el promedio de ambos valores da como resultado un consumo de cal de 1103.9 mg/l para el caso de Neutralización Directa**.

Figura 5-14: Consumo de cal en el Ensayo Nv.2 B

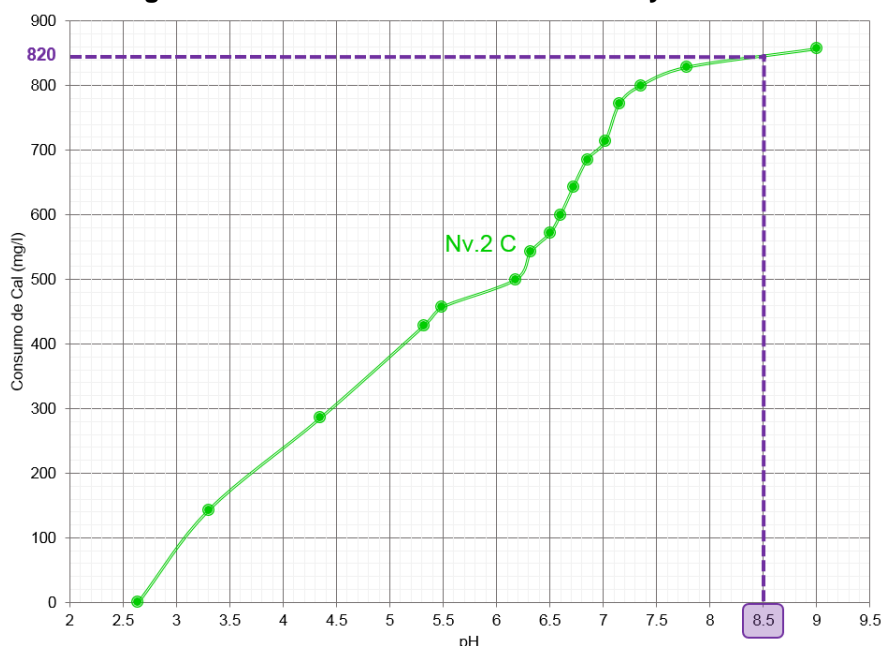


Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Por otro lado para el caso del **Procedimiento N°2: Ensayos de Neutralización Secuencial**, se determinó que el **consumo de cal por litro, para alcanzar el pH=8.5, es 820 mg/l**.

Comparando los valores de **1103.9 mg/l para Ensayos de Neutralización Directa y de 820 mg/l en el Ensayo de Neutralización Secuencial**, se concluye que la **Neutralización Secuencial consume 283.5 mg/l menos de reactivo**, lo que representa un ahorro significativo en el consumo de cal si lo llevamos a volúmenes mayores. Por ejemplo, si consideramos implementar una planta de neutralización secuencial de 1000 l/s y que el costo de cal es de 0.23 US\$/kg, al año se obtiene un ahorro de 8'940,456 kg de cal equivalente a US\$ 2'056,304.88.

Figura 5-15: Consumo de cal en el Ensayo Nv.2 C



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Del resultado anterior se puede deducir que el tratamiento óptimo para los efluentes de Mina 1 se deberá realizar en dos etapas:

- La primera etapa: Hasta alcanzar el pH=6 donde se retirarían las fases sólidas de Fe y Al, dos de los metales con mayor presencia en el efluente y en los análisis de lixiviados y mineralógicos.
- La segunda etapa: Hasta alcanzar el pH=8.5-9 donde se retirarían los lodos formados por los hidróxidos de Zn y Mn, los cuales por su contenido metálico podrían ser llevados a la Planta Concentradora para aprovechar la recuperación de ciertos metales, proyecto que debería ser estudiado a mayor detalle.

Es preciso mencionar que los **Ensayos de Neutralización Directa incurren en un mayor consumo de reactivo cuando se va un pH superior a 8 o 9**, ya que al no ser retiradas las fases sólidas de Fe y Al formadas a pH 5-6, estas se vuelven a disolver cuando el sistema alcanza pH>7 (ver Figura 2-3), por lo que se requerirá de una cantidad adicional de cal para hacer que vuelvan a formar fases sólidas, repercutiendo directamente en el costo del tratamiento. Por el contrario, **al retirar las fases sólidas de Fe y Al formadas hasta pH=6, solo se requerirá añadir cal para formar las fases sólidas del resto de elementos como Zn y Mn**, por tanto, se necesitará añadir una menor cantidad de cal.

Así mismo para facilitar la formación de los lodos ricos en Zn y Mn se podría considerar el uso de un coagulante o floculante. Si bien este no ha sido el tema de la

tesis, de la experiencia se sabe que algunos floculantes actúan como agente reductor de pH obteniendo una reducción máxima de 0.75 puntos lo que podría ayudar a cumplir los LMP. La selección del floculante y la determinación de la dosis deberán ser ajustadas en base a Pruebas de Jarras.

Se menciona que las curvas de neutralización de la Figura 5-13 guardan ligeras desviaciones respecto de las curvas teóricas (Figura 2-3) debido a que estas han sido elaboradas en base a ensayos a distintas condiciones y para aguas con determinadas características. Para el diseño del tratamiento a Nivel Ingeniería de Detalle se deberá de realizar el pilotaje en mina con la finalidad de ajustar los parámetros a las condiciones propias de la zona (presión y temperatura de operación).

Finalmente, a continuación, se presenta un ensayo de costos preliminar de la cantidad de Al y Zn que al ser removido de manera secuencial pudiera tener un valor económico de recuperación:

Tabla 5-9: Ensayo de costos preliminar (Al y Zn)

Concentraciones	Al	Zn
Iniciales (mg/l)	72.14	936.8
Post Tratamiento (mg/l)	0.14	0.012
Remoción (mg/l)	72	936.788

Consideraciones - Caudal: 1000 l/s - Periodo de evaluación: 1 año

Remoción (t)	2,271	29,543
Precio (US\$/t) (*)	1,849.02	2,774.08
Posible ganancia (US\$)	4,198,370	81,953,387

(*) SRK CONSULTING, 2017

Fuente.- Elaboración propia, 2017.

De la tabla se obtiene que la posible ganancia por la recuperación de Al es de US\$ 4'198,370 y por la recuperación de Zn es de US\$ 81'953,387. Si bien los anteriores valores son muy favorables y brindarían un gran valor agregado al tratamiento de aguas ácidas de mina, el proyecto de recuperación debería ser estudiado a mayor detalle para evaluar la viabilidad del proyecto pues -por ejemplo- para el presente cálculo se asumió que el lodo removido es 100% recuperable.

5.3 Muestras de Mina 2

5.3.1 Caracterización de materiales mineros

En la Tabla 5-10 y Figura 5-16 se muestran los resultados del análisis ácido/base de las muestras de relaves y desmontes de Mina 2.

El potencial de acidez determinado a partir de ensayos estáticos (Relación ácido/base, ABA) sirve para evaluar la posibilidad de generación ácida e implementar las medidas de control en estos residuos para satisfacer unos criterios de calidad medioambiental en el entorno donde se desarrolla la actividad minera.

Tabla 5-10: Caracterización ácido/base de los Relaves y Desmontes

Punto Muestreo	pH pasta	MPA (*)	NNP	NP (*)	NP/MPA	Sulfuro (%S)
Desmante 1	5.10	71.50	-69.40	2.10	0.03	2.29
Desmante 2	5.00	71.40	-69.30	2.10	0.03	2.28
Relaves	7.10	0.10	5.70	5.80	58.00	0.01

PN = Potencial de neutralización;

%S = Porcentaje de azufre como sulfuro;

MPA = Potencial de acidez;

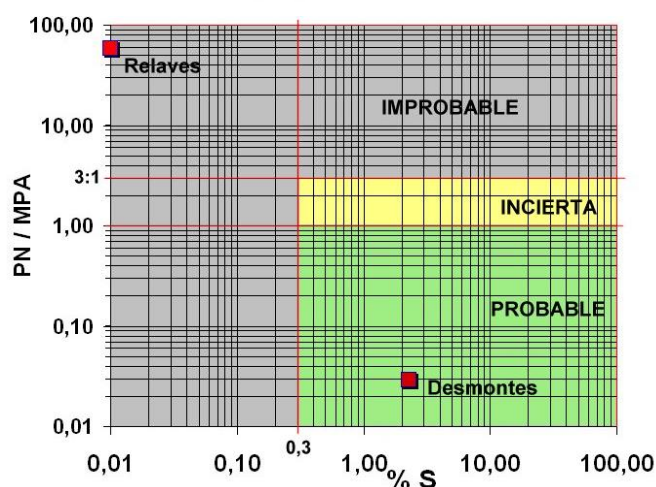
PNN = Potencial neto de neutralización;

(*) PN, MPA y PNN están expresados en kgCaCO₃/t

Fuente.- Elaboración propia, 2016

De acuerdo con los resultados de la Tabla 5-9 se deduce que las muestras de desmante tienen valores de PNN que van desde -69.3 hasta -69.4 expresados en kgCaCO₃/t, lo que indica que tienen tendencia a generar drenaje ácido, en cambio, las muestras de relave tienen valores PNN de 5.7 y pH neutro, por tanto, no generarían drenaje ácido en caso se alteren al contacto con agua y oxígeno.

Figura 5-16: Evaluación de la Generación Ácida



Fuente.- Elaboración propia, 2016

Por otro lado, la evaluación del contenido de azufre como sulfuro y la relación PN/MPA indica que los relaves no generan acidez y en cambio los desmontes si podrían generar acidez (Figura 5-16).

Para una caracterización más adecuada se deberán contemplar pruebas NAG, SPLP y Mineralogía.

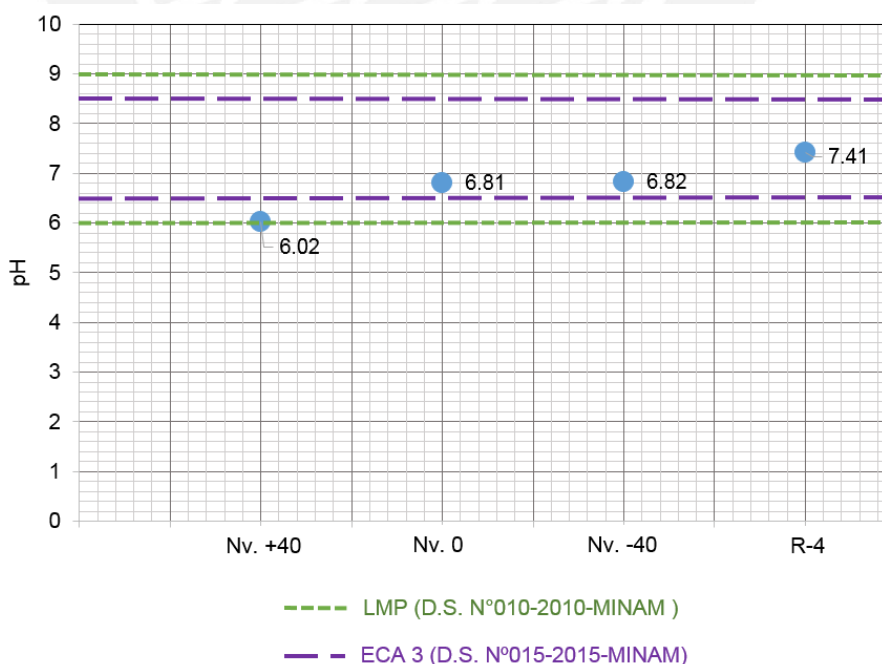
5.3.2 Caracterización de efluentes

Para la Mina 2 se han considerado como efluentes las descargas que proceden de tres labores mineras (Nivel +40, 0 y -40) y las provenientes de una relavera (R-4).

5.3.2.1 Muestreo y caracterización

Durante el Trabajo de Campo se realizaron las mediciones de los parámetros-físico químicos y se recolectaron muestras para la determinación del contenido de metales totales y disueltos, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 5-11. En esta misma tabla se resalta en color rojo los parámetros y concentraciones que no cumplen con los *Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas (D.S. N°010-2010-MINAM)* y a modo referencial con los *ECA's Agua (D.S. N°015-2015-MINAM)*.

Figura 5-17: Valores de pH de cada efluente



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Tabla 5-11: Características de los efluentes de Mina 2

Parámetro	Caudal	pH	Conductividad	Redox	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Pb	Hg	Zn	Al	Ca	Mn	Mg
Unidad	l/s	u,e	µS/cm	mV	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Concentraciones Total																
Nv +40	0.3	6.02	1643	104.5	3.9476	0.2585	0.0039	0.022	28.3756	0.042	0.0003	263.4853	11.5426	181.4498	259.7979	25.223
Nv 0	0.3	6.81	612	987	0.0368	0.6588	0.001	0.1015	4.248	0.0047	<0.0001	49.1165	4.929	118.5882	23.3735	16.6418
Nv -40	3	6.82	1031	-30.6	7.0554	0.18	0.0008	0.0174	45.0232	0.072	<0.0001	150.3111	2.4156	158.5428	92.0735	25.1124
Relavera 4	5	7.41	587	-95.9	4.6998	0.0471	<0.0005	0.0044	3.0894	0.0046	<0.0001	27.7717	0.0267	86.9098	42.3851	14.692
LMP (*)	-	6-9	-	-	0.1	0.05	-	0.5	-	0.2	0.002	1.5	-	-	-	-
ECA D1(**)	-	6.5-8.5	2500	4	0.1	0.01	0.1	0.2	5	0.05	0.001	2	5	-	0.2	-
ECA D2(**)	-	6.5-8.4	5000	5	0.2	0.05	1	0.5	-	0.05	0.01	24	5	-	0.2	250
Concentraciones Disueltas																
Nv +40	0.3	6.02	1643	104.5	0.6433	0.2575	<0.0005	0.013	6.1439	<0.0002	<0.0001	258.3577	0.0423	180.9117	259.4245	23.0486
Nv 0	0.3	6.81	612	987	0.0128	0.628	0.001	0.004	<0.0031	<0.0002	<0.0001	28.7759	<0.0019	118.5808	23.105	17.3468
Nv -40	3	6.82	1031	-30.6	1.2071	0.1718	<0.0005	0.0051	16.5695	<0.0002	<0.0001	145.9194	<0.0019	158.4658	89.5778	25.0322
Relavera 4	5	7.41	587	-95.9	0.3003	0.0198	0.0032	0.0012	<0.0031	<0.0002	<0.0001	20.5435	<0.0019	85.7611	42.4987	14.6015
LMP (*)	-	6-9	-	-	0.1	0.05	-	0.5	2	0.2	0.002	1.5	-	-	-	-
ECA D1(**)	-	6.5-8.5	2500	4	0.1	0.01	0.1	0.2	5	0.05	0.001	2	5	-	0.2	-
ECA D2(**)	-	6.5-8.4	5000	5	0.2	0.05	1	0.5	-	0.05	0.01	24	5	-	0.2	250

(*) D.S. N°010-2010-MINAM: Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas

(**) D.S. N°015-2015-MINAM: ECA's Agua Categoría 3 (subcategorías D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: Bebida de Animales)

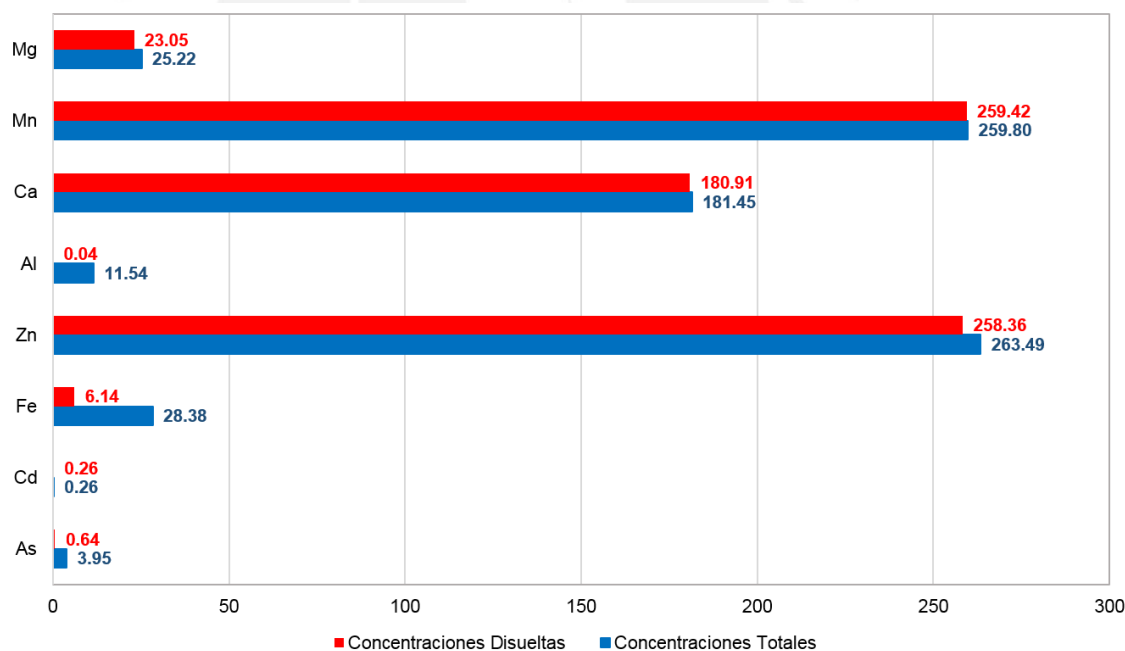
Fuente.- Elaboración propia, 2016.

En la Figura 5-17 se puede observar que los valores de pH de todos los efluentes son cercanos al neutro e incluso se encuentran dentro de los rangos establecidos por los LMP y ECA Categoría 3, sin embargo, los valores Redox indican que estos efluentes si llevan carga metálica.

De la Tabla 5-11 se advierte la presencia de carga metálica significativa de As, Fe, Al, Zn y Mn posiblemente por el fondo geoquímico de las litologías que cortan las labores mineras. En este sentido, las concentraciones de As, Fe y Al estarían mayoritariamente en fase sólida ya que sus valores disminuyen considerablemente para el caso de concentraciones disueltas. Sin embargo las concentraciones de Zn, Mn, Mg, Ca, Na y K estarían mayoritariamente disueltas con contenidos significativos.

En la Figura 5-18 se puede apreciar la comparación de las concentraciones totales y disueltas de los principales metales del efluente Nv.+40. La figura nos muestra las altas concentraciones Mn, Al, Zn, Fe, As y además la presencia de Mg y Ca que estaría relacionado con el pH neutro del efluente.

Figura 5-18: Contenido de metales de importancia medioambiental en la muestra Nv. +40



Fuente.- Elaboración propia, 2016

5.3.2.2 Ensayo de neutralización a nivel laboratorio

Teniendo como fin obtener la mayor cantidad de Curvas de Neutralización para la detección de las zonas de hidrólisis de los principales elementos como Fe, Al, Zn y Mn, se prepararon dos muestras de 400 ml de cada efluente para ser sometidas a procesos de neutralización con Cal aplicando los procedimientos N°1 y N°2:

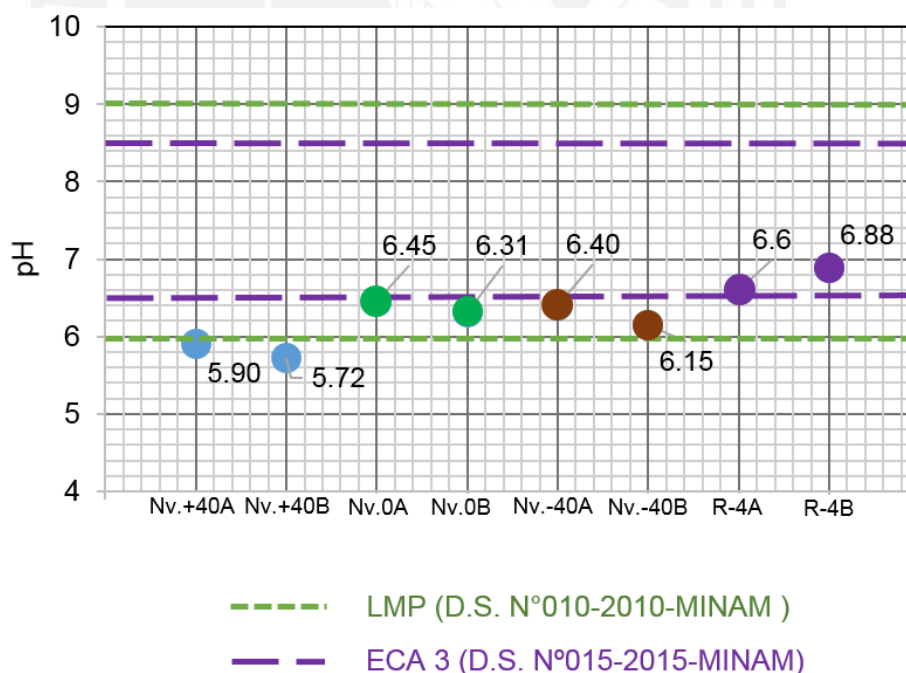
Tabla 5-12: Descripción de muestras ensayadas

Procedimiento aplicado	Muestra	Procedimiento aplicado	Muestra
Procedimiento N°1 Ensayos de neutralización directa	Nv.+40 A	Procedimiento N°2 Ensayos de neutralización secuencial	Nv.+40 B
	Nv. 0 A		Nv. 0 B
	Nv. -40 A		Nv. -40 B
	R-4 A		R-4 B

Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Antes del inicio de cada ensayo, se procedió a realizar la medición del pH correspondiente a fin de constatar los valores obtenidos en campo y en laboratorio. Los resultados se muestran en el gráfico 5-19.

Figura 5-19: Valores de pH de cada efluente previo al inicio de los ensayos



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Procedimiento N°1: Ensayos de neutralización directa

Los siguientes ensayos fueron realizados de manera directa y sin retiro de sólidos, por tanto, la cal fue consumida en su totalidad al mantener la agitación durante todo el ensayo.

Nv.+40A

Tal como se muestra en la Figura 5-21, el ensayo finalizó al alcanzar el pH=8.65 obteniendo un consumo de cal de 156 mg. Dado que este efluente posee las mayores concentraciones de Zn y Mn (Tabla 5-10 y Figura 5-18), el consumo de reactivo fue mayor durante las pruebas de neutralización respecto del resto de efluentes.

La curva de Consumo de Cal en función al pH permite visualizar las zonas de tamponamiento del Fe alrededor del pH=6, del Al entre pH 6.15 y 7, del Zn a partir del pH= 7.3 y del Mn a partir del pH=7.45.

En la figura siguiente se presentan los sólidos retirados al finalizar el ensayo así como también el agua neutralizada:

Figura 5-20: Resultados del ensayo Nv.+40A



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Se menciona además que los efluentes tratados cumplen con los LMP, sin embargo, presenta valores superiores en Mn en referencia a los ECA Agua Categoría 3. Los valores pueden ser vistos en la Tabla 5-13.

Nv.0A

Ya que el efluente del Nv. 0 posee las más bajas concentraciones de carga metálica, el consumo de reactivo también fue el menor: 50 mg de cal.

Nv.-40A

Tal como se muestra en la Figura 5-21, el ensayo finalizó al alcanzar el pH=9.48 obteniendo un consumo de cal de 62.3 mg. Al poseer concentraciones significativas de Fe-Zn y Mn, la curva de Consumo de Cal en función al pH permitió identificar las zonas de tamponamiento del Fe alrededor del pH=6.45 a 6.9, del Zn a partir del pH= 7.1 y del Mn a partir del pH=7.8.

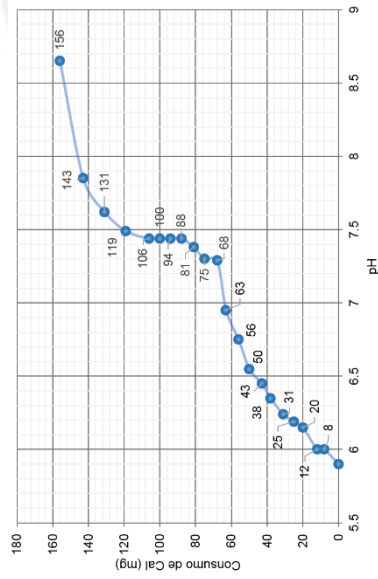
R-4A

Este efluente posee concentraciones de Zn y Mn que superan los límites máximos de vertidos lo cual se ve reflejado en un tamponamiento a partir del $\text{pH}=7.5$ en la curva de Consumo de Cal en función al pH. El consumo de cal final fue de 69 mg alcanzando un $\text{pH}=8.65$.

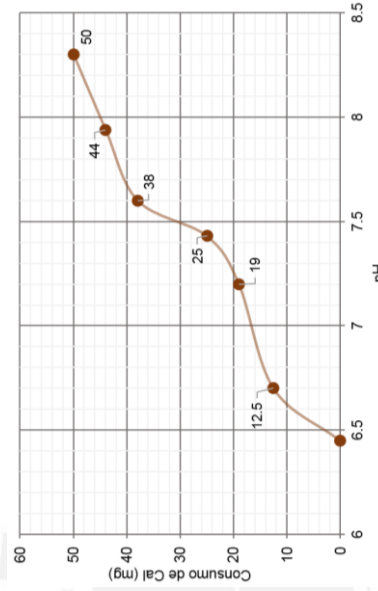


Figura 5-21: Resultados de ensayos realizados mediante Procedimiento N°1

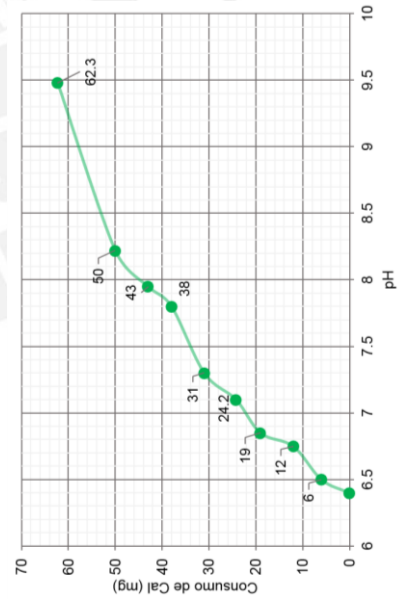
Nivel +40A



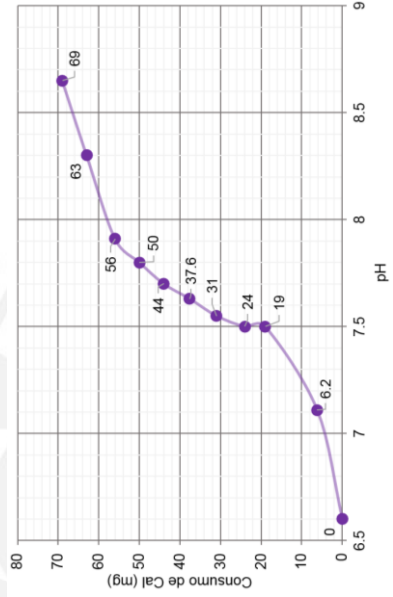
Nivel 0 A



Nivel -40 A



Relavera 4A



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

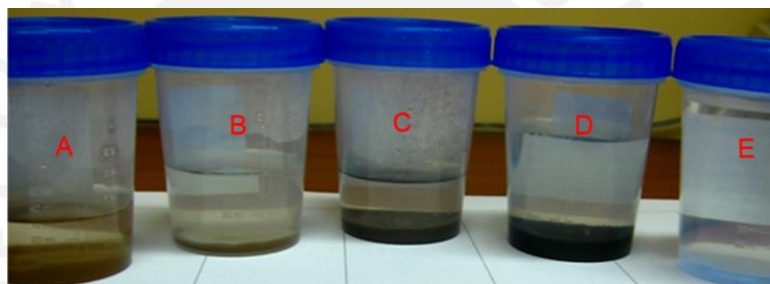
Procedimiento N°2: Ensayos de neutralización secuencial

Los siguientes ensayos fueron realizados de manera secuencial, retirando las fases sólidas formadas en el proceso de neutralización a diferentes valores de pH:

Nv.+40B

La neutralización se realizó teniendo un pH de inicio de 5.72 hasta un pH final de 8.3, alcanzando un consumo total de cal de 100 mg. La Figura 5-26 muestra la curva de Consumo de Cal en función al pH, la cual permite visualizar las zonas de tamponamiento del Fe entre el pH 5.72 y 5.81, del Al entre 6.35 y 6.92, del Zn y Mn a partir del 7.43. El retiro de los sólidos fue realizado en cuatro hitos del ensayo de neutralización (frascos A, B y C) y finalmente (al alcanzar el pH=8.3) se obtuvo la separación sólida-líquida de los frascos D y E.

Figura 5-22: Resultados del ensayo Nv.+40B



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

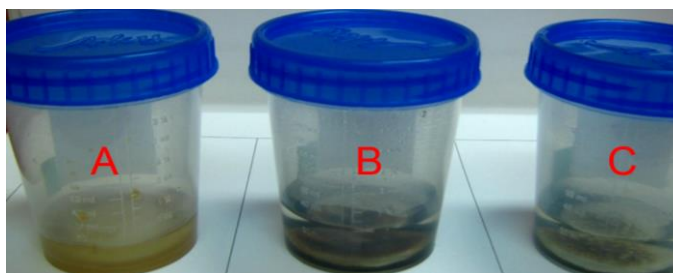
Una vez realizado el retiro de los sólidos en una determinada etapa, se continuó con el ensayo añadiendo cal para seguir con el proceso de neutralización.

Se menciona además que los efluentes tratados cumplen con los LMP, sin embargo, presenta valores ligeramente superiores en Mn en referencia a los ECA Agua Categoría 3. Los valores pueden ser vistos en la Tabla 5-13.

Nv.0B

Al igual que el comportamiento mostrado en la realización del Procedimiento N°1, el Consumo de Cal obtenido (para este efluente) a pH 8.7 fue de 44 mg, el menor consumo obtenido en los Procedimientos N°2. A continuación, una vista de los sólidos obtenidos a distintos pH:

Figura 5-23: Resultados del ensayo Nv.0B



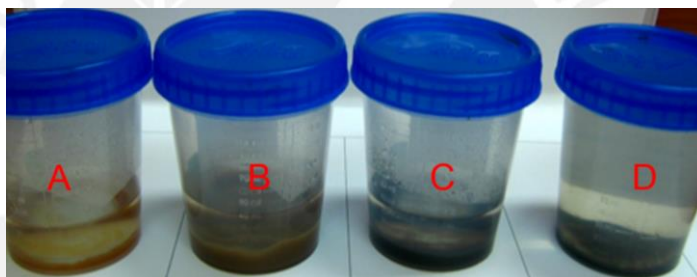
Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Nv.-40B

El Consumo de Cal obtenido a pH 7.92 fue de 56 mg considerando el retiro de los sólidos formados a distintos valores de pH.

En la Figura 5-26 se aprecia que a valores a pH=7.86, aparece la zona de tamponamiento del Zn y Mn:

Figura 5-24: Resultados del ensayo Nv.-40B

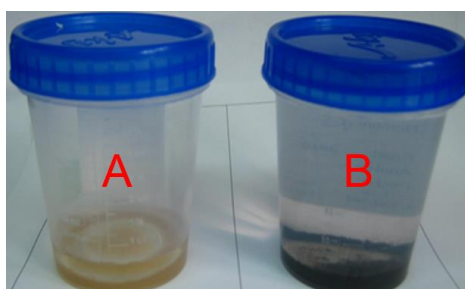


Fuente.- Elaboración propia, 2016.

R-4B

El Consumo de Cal obtenido a pH=8.78 fue de 62.5 mg y consideró el retiro de los sólidos formados a distintos valores de pH. La curva de Consumo de Cal en función al pH muestra una zona de tamponamiento entre los pHs 7.67 y 8.07 que se considera como la hidrólisis de Zn y Mn.

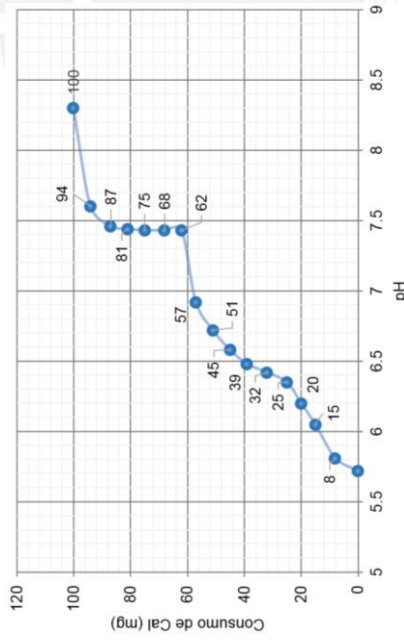
Figura 5-25: Resultados del ensayo R-4B



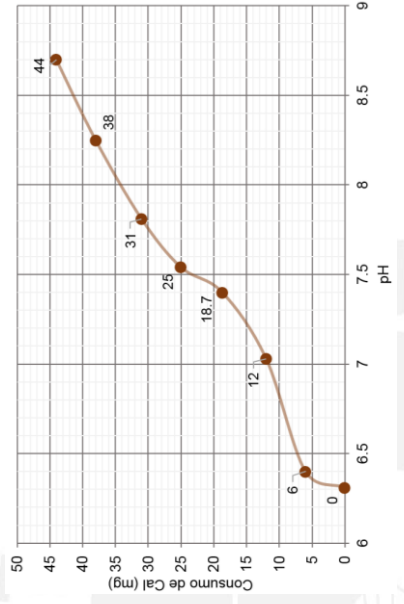
Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Figura 5-26: Resultados de ensayos realizados mediante Procedimiento N°2

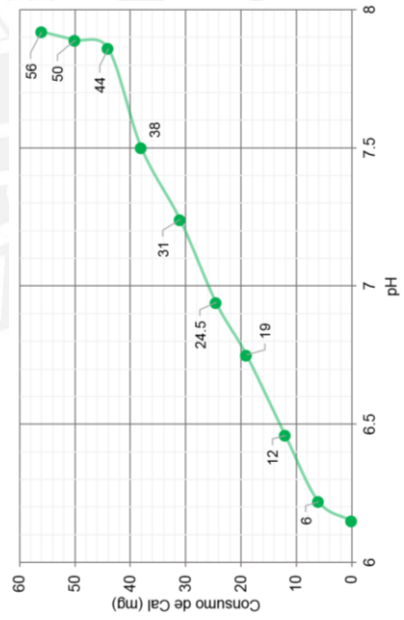
Nivel +40B



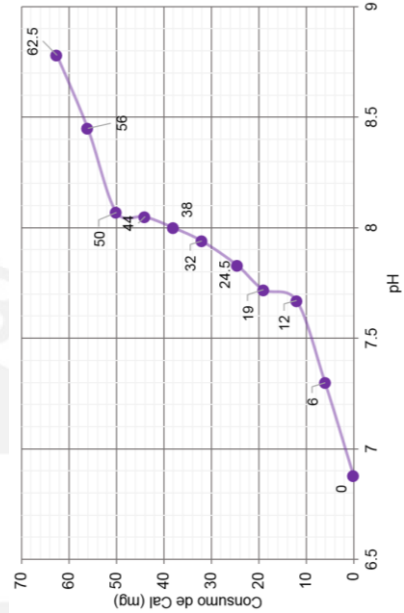
Nivel 0 B



Nivel -40 B



Relavera 4B



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Tabla 5-13: Concentración de metales Post tratamiento

Parámetro	pH	As	Cu	Fe	Pb	Zn	Al	Mn
Unidad	u.e	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Concentraciones Total								
Nv +40A	8.9	<0.008	<0.003	1	<0.01	1.45	0.02	1.5
Nv +40B	8.7	<0.008	<0.003	0.6	<0.01	1.51	0.02	0.35
LMP (*)	6-9	0.1	0.5	-	0.2	1.5	-	-
ECA 3D1(**)	6.5-8.5	0.1	0.2	5	0.05	2	5	0.2
ECA 3D2(**)	6.5-8.4	0.2	0.5	-	0.05	24	5	0.2
Concentraciones Disueltas								
Nv +40A	8.9	<0.008	<0.003	0.53	<0.01	1.01	0.02	0.98
Nv +40B	8.7	<0.008	<0.003	0.47	<0.01	1.2	0.01	0.32
LMP (*)	6-9	0.1	0.5	2	0.2	1.5	-	-
ECA 3D1(**)	6.5-8.5	0.1	0.2	5	0.05	2	5	0.2
ECA 3D2(**)	6.5-8.4	0.2	0.5	-	0.05	24	5	0.2

(*) D.S. N°010-2010-MINAM: Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas

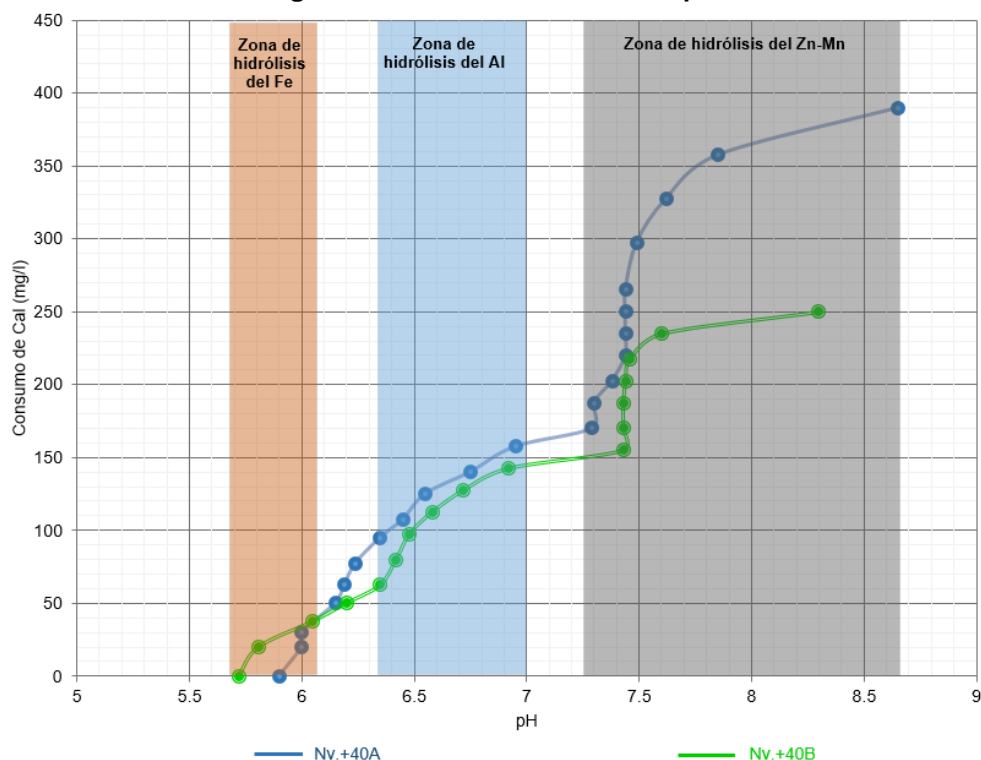
(**) D.S. N°015-2015-MINAM: ECA's Agua Categoría 3 (subcategorías D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: Bebida de Animales)

Fuente: Elaboración propia, 2016.

5.3.3 Elección de alternativa de tratamiento

Teniendo en cuenta que todos los ensayos fueron realizados utilizando 400 ml de muestra, se procedió a uniformizar las curvas de neutralización con el fin de mostrar los consumos de cal en valores de mg/l:

Figura 5-27: Consumo de Cal - pH



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Las curvas de la Figura 5-27 indican que -en general- el rango de hidrólisis del Fe llegaría hasta el pH=6.1, para el Al estaría entre el pH 6.3 y 7 y para el Zn estaría a partir del pH=7.3 sobreponiéndose en un pequeño rango con el Mn.

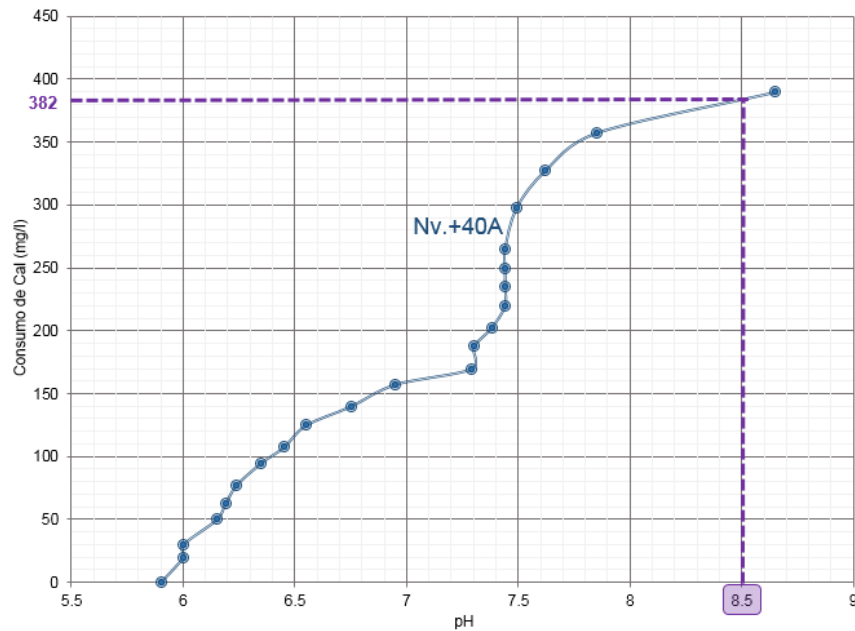
Se menciona además que los efluentes tratados cumplen con los LMP, sin embargo, presenta valores ligeramente superiores en Mn en referencia a los ECA Agua Categoría 3. Los valores pueden ser vistos en la Tabla 5-13.

Siendo el efluente Nv.+40 el de mayor criticidad por sus altas concentraciones de Zn y Mn (Tabla 5-10 y Figura 5-18), se analizaron los consumos de cal generados al emplear los procedimientos de N°1 (Directo) y N°2 (Secuencial) hasta alcanzar un pH=8.5 que cumpla con los LMP's.

Los resultados obtenidos dieron que para el **Procedimiento N°1 se necesitaron 382 mg/l de cal** (Figura 5-28) mientras que la demanda en el **Procedimiento N°2**

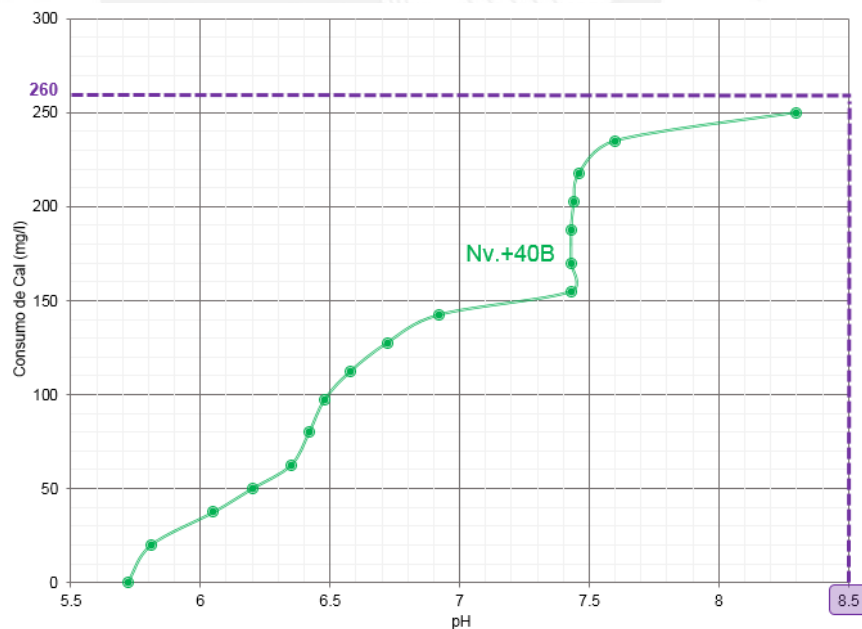
alcanzó los 260 mg/l (Figura 5-29). Comparando ambos valores se concluye que la Neutralización Secuencial consume 122 mg/l menos de reactivo.

Figura 5-28: Consumo de cal en el Ensayo Nv.+40A



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Figura 5-29: Consumo de cal en el Ensayo Nv.+40B



Fuente.- Elaboración propia, 2016.

Si consideramos implementar una planta de neutralización secuencial de 1000 l/s y que el costo de cal es de 0.23 US\$/kg, al año se obtendría un ahorro de 3'847,392 kg de cal equivalente a US\$ 884,900.16, el cual deberá ser contrastado con el costo

de inversión y operación que demanda una planta para neutralización secuencial la cual utiliza un mayor número de equipos (tanques, clarificadores, sistema de medición de pH) frente a una planta para neutralización directa.

Si bien los resultados arrojaron un menor consumo de reactivos en la Neutralización Secuencial y que el análisis de costo de inversión y operación de este tipo de plantas no será tocado en la presente tesis, las características del efluente de Mina 2 hacen que el tratamiento óptimo este orientado a tener una sola etapa que considere incrementar el pH hasta 9.5-10 con la finalidad de lograr la hidrólisis del Zn y Mn, metales cuyas concentraciones son largamente mayoritarias frente a otras existentes, ver Tabla 5-11.

Para evitar incurrir en un mayor consumo de reactivo se deberá remover previamente las fases sólidas de Fe y Al mediante pozas de sedimentación pues de la Tabla 5-10 se visualiza la existencia de 28.37 mg/l de Fe total mientras que el valor de Fe disuelto es de 6.14 mg/l y para el caso del Aluminio se tiene 11.54 mg/l como concentración total mientras que el valor de Al disuelto es de 0.04 mg/l.

Así mismo para facilitar la formación de los lodos ricos en Zn y Mn se podría considerar el uso de un coagulante o floculante. De la experiencia se sabe que algunos floculantes actúan como agente reductor de pH obteniendo una reducción máxima de 0.75 puntos lo que podría ayudar a cumplir los LMP. La selección del floculante y la determinación de la dosis deberán de ser ajustadas en base a Pruebas de Jarras.

En caso se dé la necesidad de utilizar ácido para bajar el pH, se deberá considerar dentro de los costos operativos de la planta de tratamiento: el monto concerniente al ácido propiamente dicho (el cual es alto comparado con la cal) y su costo de transporte y manejo.

Se menciona además que las curvas de neutralización de la Figura 5-27 guardan ligeras desviaciones respecto de las curvas teóricas (Figura 2-3) debido a que estas han sido elaboradas en base a ensayos a distintas condiciones y para aguas con determinadas características. Para el diseño a Nivel Ingeniería de Detalle se deberá de realizar el pilotaje en mina con la finalidad de ajustar los parámetros en base a la presión y temperatura de operación.

Finalmente, a continuación, se presenta un ensayo de costos preliminar de la cantidad de Al y Zn que al ser removido de manera secuencial pudiera tener un valor económico de recuperación:

Tabla 5-14: Ensayo de costos preliminar (Al y Zn)

Concentraciones	Al	Zn
Iniciales (mg/l)	11.5426	263.4853
Post Tratamiento (mg/l)	0.02	1.45
Remoción (mg/l)	11.5226	262.0353

Consideraciones - Caudal: 1000 l/s - Periodo de evaluación: 1 año

Remoción (t)	363	8,264
Precio (US\$/t)	1,849	2,774
Posible ganancia (US\$)	671,891	22,923,736

(*) SRK CONSULTING, 2017
Fuente.- Elaboración propia, 2017.

De la tabla se obtiene que la posible ganancia por la recuperación de Al es de US\$ 671,891 y por la recuperación de Zn es de US\$ 22'923,736. Si bien los anteriores valores son muy favorables y brindarían un gran valor agregado al tratamiento de aguas ácidas de mina, el proyecto de recuperación debería ser estudiado a mayor detalle para evaluar la viabilidad del proyecto pues -por ejemplo- para el presente cálculo se asumió que el lodo removido es 100% recuperable.

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

El punto de partida para todo diseño de Tratamiento de Aguas Ácidas implica la correcta caracterización del agua de mina y, en caso existan, de los efluentes.

La importancia de caracterizar los efluentes y los cuerpos de agua circundantes (lagunas, ríos, quebradas o manantiales) radica en la identificación de patrones o calidades de agua propias de la zona hacia donde debe apuntar el futuro vertido (posterior al tratamiento), el cual –de acuerdo a la normativa vigente- no deberá de modificar la calidad propia del cuerpo receptor.

Si un efluente posee altas concentraciones totales y bajas concentraciones disueltas, se deben de construir pozas de sedimentación previas al ingreso a la Planta de Tratamiento con el fin de decantar las fases sólidas y evitar el costo innecesario de su tratamiento.

La elaboración de las curvas de neutralización representativas para cada efluente permite identificar los rangos de hidrólisis de los metales, los cuales tienen ligeras desviaciones respecto de las curvas teóricas por ser elaboradas a distintas condiciones (temperatura y presión) y con distintas calidades de agua.

El tratamiento de efluentes con altas concentraciones metálicas se ve favorecido al implementar la Neutralización Secuencial pues permite reducir el consumo de reactivos en la planta y estudiar la posibilidad de recuperar los lodos ricos en metales.

Los ensayos de neutralización secuencial permitieron identificar a determinado pH, las fases sólidas de los hidróxidos con su color característico.

El ensayo de neutralización secuencial tiene un mayor tiempo de tratamiento al tener que incorporar dentro de su proceso la sedimentación/decantación de los sólidos por etapas.

El mayor consumo en la Neutralización Directa se da por la redisolución de las fases sólidas de Fe y Al (al alcanzar el $\text{pH} > 7$) que ocasiona un consumo adicional de cal.

En términos económicos, se deberá constar el ahorro en reactivos VS el monto de inversión y operación que demandará una Planta de Neutralización Secuencial que demanda mayor número de equipos y mayor cuidado en el control del pH y de la

recuperación de lodos ricos. Por ejemplo para la Mina 2, el método de Neutralización Secuencial si permitió optimizar el uso de reactivos pero su ahorro no necesariamente podría ser el óptimo –en términos económicos. Frente a la Neutralización Directa.

Se pudo identificar que la calidad de los efluentes varía según la litología y zona mineralizada que haya contactado la Galería o el Nivel de la mina, por tanto, es posible agruparlas por similitud de pH y carga metálica para conducir las y tratarlas por separado, mediante distintas alternativas, como: poca concentración (pasivos) y alta concentración (activos).

6.2 Recomendaciones

Ajustar el diseño de tratamiento en base a un mayor volumen de data de caracterización de efluentes de mina, para ello, se necesitará realizar un programa de monitoreo durante un período de por lo menos dos ciclos hidrológicos diferenciando como mínimo las estaciones húmedas y las de mayor estiaje.

Para el diseño de la planta de tratamiento se deberá realizar un pilotaje en campo para ajustar parámetros de acuerdo a las propias condiciones del entorno (presión y temperatura).

Será importante evaluar las distintas purezas de la cal (proveedores) y la utilización de floculantes o coagulantes dentro del proceso.

Realizar ensayos de neutralización directa y secuencial hasta pH=10 y enviar el agua tratada y las fases sólidas para su evaluación a laboratorio para tener la certeza de alcanzar los LMP y cumplir con los ECA's en el cuerpo receptor para lo cual se deberá de considerar elaborar el estudio de Zona de Mezcla una vez definido el punto de vertimiento y la calidad del vertido.

Realizar una correcta gestión del agua en el área del proyecto separando las aguas de escorrentía de los efluentes de mina con el fin de reducir los volúmenes de agua a tratar.

Dentro de la operación de una Planta de Neutralización Secuencial se considera necesario el control de pH debido a que en determinados rangos de pH ciertos metales pueden disolverse provocando un efecto contrario al que se busca que es retirar los sólidos en solución.

Se deberá considerar mayores estudios para probar la viabilidad de recuperar metales a partir del lodo removido de manera secuencial. Este aporte brindaría un gran valor agregado al tratamiento de aguas ácidas de mina.



7 Bibliografía

ADUVIRE, Osvaldo

- 2006 *Drenaje Ácido de Mina: Generación y Tratamiento*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Edición IGME. Código: SID-63187. Publicación Electrónica 136pp.
- 2012 *Control de la generación ácida en minería*. INGEOPRES, 212, pp. 20-24, ISSN 1136-4785.

ADUVIRE, Osvaldo y otros

- 2006a "Efluentes de Mina: predicción, generación, caracterización, hidrogeoquímica y atenuación natural". *Minería & Medio Ambiente*. Lima, año 2, número 7, pp.12-22.
- 2006b "Efluentes de Mina: predicción, generación, caracterización, hidrogeoquímica y atenuación natural II Parte". *Minería & Medio Ambiente*. Lima, año 2, número 8, pp.12-22.

ALPERS, C. y BLOWES, D.

- 1992 "Environmental geochemistry of sulfide oxidation". *National Meeting of the American Chemical Society*. Washington, DC. 325-342.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM)

- 1996 ASTM D5744 -96 Standard Test Method for Accelerated weathering of solid materials using modified Humidity Cell.
- 2006 ASTM D3987-06 Standard Test Method for Shake Extraction of Solid Waste with Water

BIGHAM, J.M. y NORDSTROM, D.K.

- 2000 "Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters". En: Alpers, C.N., Jambor, J.L. y Nordstrom, D.K. (eds), Sulfate minerals: crystallography, geochemistry and environmental significance. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry, MSA*. Virginia. USA. (40), 350-403.

BAQUERO, Juan y otros

- 2008 "Tratamiento de Aguas Ácidas. Prevención y Reducción de la Contaminación". *Revista Macla*. España, número 10, pp. 44-47.

CANMET MINING AND MINERAL SCIENCES LABORATORIES (CANMET)

2009 *Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials*. MEND Report 1.20.1. Ministry of Natural Resources Canada. December 2009.

DEFENSORIA DEL PUEBLO

2016 *Reporte de Conflictos Sociales N°154. Diciembre 2016*. Lima

HEI HOFFLAND ENVIRONMENTAL INC.

Hydroxide precipitation. Consulta: 16 de setiembre del 2016

<http://www.hofflandenv.com>

INSTITUTO GEOLOGICO MINERO Y METALURGICO

2014 "Producción histórica del Oro y de la Plata". *Desde adentro*. Lima, número 130, pp.40-43.

INTERNATIONAL NETWORK FOR ACID PREVENTION (INAP)

2009 *Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide)*. Consulta: 06 de marzo del 2016.

<http://www.gardguide.com/images/5/5f/TheGlobalAcidRockDrainageGuide.pdf>

GARCÍA, Sebastián

2013 *Modelación del potencial de drenaje ácido de botaderos: calibración a partir de celdas húmedas y granulometría*. Memoria para optar al título de Geólogo. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Li, Sergio

2013 *Medición del potencial de generación de agua ácida para un relave en la zona central del Perú y sus necesidades de neutralización*. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería de Minas. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería

LÓPEZ PAMO, Enrique. ADUVIRE, Osvaldo y BARETTINO, Daniel

2002 "Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas del futuro". *Boletín Geológico Minero*. Madrid, número 113.

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS

2015 *R.M. N°102-2015-MEM/DM*. Lima, 5 de marzo.

2015 *Boletín Estadístico del Subsector Minero*. Noviembre. Lima

MINISTERIO DEL AMBIENTE

2010 *D.S. N°010-2010-MINAM*. Lima, 20 de agosto de 2010.

NORDSTROM, K.

1985 "The rate of ferrous iron oxidation in a stream receiving acid mine effluent". *Hydrologic Sciences*, 1, 113-119.

2000 "Aqueous redox chemistry and the behavior of iron acid mine waters". En: Wilking, R., Ludwig, R, y Ford, R. *Proceeding of the Workshop on Monitoring Oxidation-Reduction Processes for Ground-water Restoration*. Cincinnati, OH, USA. 43-47.

PERU 21

2017 *Conflictos sociales en cifras (diciembre 2016)*. Consulta: 24 de enero del 2017.
<http://peru21.pe/multimedia/imagen/t-430753>

PRICE, W.A.

1997 *Draft Guidelines and Recommended Methods for the Prediction of Metal Leaching and Acid Rock Drainage at Minesites in British Columbia*. Reclamation Section, Energy and Minerals Division, British Columbia Ministry of Employment and Investment. Smithers, B.C., Canada. 160p.

2009 "Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials". *MEND Program*. CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories. British Columbia, Canada. 579 pp.

PUIG, Sandra

2014 Hydrogeological characteristics and numerical modeling of groundwater flow and contaminant transport in the Folldal mining site: Effects of acid mine drainage on groundwater. Master Thesis in Geosciences. University of Oslo-Norway, Faculty of Mathematics and Natural Sciences.

SOBEK, A. A., SCHULLER, W.A., FREEMAN, J.R. and SMITH, R.M.

1978. "Field and Laboratory Methods Applile to Overburdens and Minesoils". Report EPA-600/2-78-054, US National Technical Information Report PB-280 495

SRK CONSULTING

SRK Consulting: Servicios en la industria minera. Consulta: 26 de enero del 2017

<http://www.latam.srk.com/es/noticias-y-prensa/na-precio-de-los-metales>

KUYUCAK, Nural

2006 Tratamiento de efluentes mineros "prácticas convencionales, desafíos ambientales & temas clave". Material del Curso de especialización en Cierre de Minas y Pasivos Ambientales. Lima: Pontifica Universidad Católica del Perú y Proyecto Peruano Canadiense –PERCAN. Consulta: 25 de enero del 2017.

<https://es.scribd.com/document/332109418/amdtreat-presentacion>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA)

1994 EPA Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure(SPLP)