

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS
SÓLIDOS DE LA INDUSTRIA MINERA”**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE
CONOCIMIENTOS**

PRESENTADO POR · Magaly Catherine Tapia Anaya

LIMA – PERU

2006

RESUMEN

Las características físico-químicas y toxicológicas de los residuos son variables de decisión importantes para el tratamiento y disposición de éstos, por ello es necesario buscar métodos adecuados y confiables para determinarlos. Los parámetros de interés en estos residuos, los cuales deben ser medidos y monitoreados dependen a la vez entre otros factores del origen y disposición final de los residuos.

El presente informe se ocupa de los residuos generados por la industria minera, los cuales tienen características peculiares en función de la naturaleza de la explotación, de los minerales acompañantes, la granulometría, la climatología del medio y la acción bacteriana muy relacionada con el drenaje ácido proveniente de las explotaciones mineras y mineralizaciones en general.

Entre los diversos tipos de análisis que se han desarrollado para caracterizar un residuo están los que nos darán a conocer el contenido de analitos como: metales, alcalinidad, acidez y otros para determinar el potencial peligro que estos residuos pueden significar. En el presente informe se analiza el uso de las pruebas llamadas estáticas y cinéticas dependiendo si el resultado de estos representará “supuestos resultados actuales” o “futuros”, por otro lado se valoran los parámetros extractables de los residuos, es decir aquellas concentraciones que serán encontradas en el lixiviado de los residuos ya que se considera como natural que estos lixiviados se formen con el pasar del tiempo por la acción del agua de las lluvias.

Se ha tomado un juego de muestras para ser sometidas inicialmente a las pruebas estáticas ABA y complementar con pruebas cinéticas en celdas de humedad. Otro juego de muestras que de igual manera fueron sometidas a las pruebas estáticas ABA, luego fueron lixiviadas sometiéndolas al ensayo SPLP. Los métodos de análisis utilizados en laboratorio están de acuerdo normas estándares.

INDICE

1.INTRODUCCION	5
1.1 Marco Legal	6
2.DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TECNICAS	7
2.1 Residuos Sólidos de la Industria Minera	7
2.1.1 Residuos Provenientes de la extracción	7
2.1.2 Residuos Provenientes del Procesamiento de los Minerales	8
2.2 Drenaje Acido de la Minería	9
2.3 Contaminación por Metales Pesados y Lixiviación	11
2.3.1 Factores que Afectan la Acumulación y Disponibilidad de los Metales	12
2.4 Contaminación Química	14
2.5 Erosión y Sedimentación	14
2.6 Ensayos para la Caracterización de Residuos Sólidos	15
2.6.1 Ensayos ABA Acid/base Accounting–Pruebas estáticas	16
2.6.2 Ensayos en Celdas de Humedad–Pruebas cinéticas	20
2.6.3 Pruebas de Toxicidad TCLP (EPA1311) y SPLP (EPA1312)	26
2.6.4 Análisis Instrumental de Metales por ICP	28
3.DESARROLLO DEL TEMA	30
3.1 Criterios para la Interpretación de los Resultados	30
3.2 Criterios para la Elección de Ensayos y Parámetros de Análisis	35
3.3 Resultados Obtenidos en la Aplicación de los Ensayos	38
3.3.1 Proyecto N°1 Magistral	38
3.3.2 Proyecto N°2 Purísima	54
3.4 Análisis e interpretación de resultados	58
4.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61

5.BIBLIOGRAFIA	62
6.APENDICE	63
6.1 Agua Subterránea	63
6.2 Suelos Contaminados	64
6.3 Niveles Máximos Permisibles (NMP) para Efluentes de Actividades Minero Metalúrgicas	66

1. INTRODUCCION

El creciente desarrollo de la industria minera en nuestro país trae consigo beneficios y a la vez responsabilidades diversas, entre estas últimas están las miles y millones de toneladas de residuos que genera esta actividad, las cuales deben ser dispuestas responsablemente dentro de un marco de respeto a nuestro medio ambiente y la sociedad en su conjunto.

Se debe tomar decisiones acerca de cómo y donde serán depositados estos residuos; para ello es necesario conocer sus características, lo cual permitirá determinar que efectos tendrán estos residuos, en el corto y largo plazo sobre el medio ambiente; con este propósito se han desarrollado diversos ensayos de laboratorio.

En el presente trabajo se analiza la aplicación de algunos de estos ensayos así como los resultados obtenidos en dos grupos de muestras ensayadas. Los diferentes ensayos han sido agrupados en:

- * Ensayo ABA Acid/base Accounting – Pruebas estáticas.
- * Ensayo en Celdas de Humedad – Pruebas cinéticas.
- * Prueba de toxicidad TCLP (EPA 1311) y SPLP (EPA 1312) – Pruebas de lixiviación.

Las muestras ensayadas corresponden a los siguientes proyectos mineros:

- ** Proyecto N°1 Magistral: Tres muestras de rocas.
- ** Proyecto N°2 Purísima: Cuatro muestras de rocas.

En este informe se revisa las opciones disponibles y más utilizadas actualmente para la caracterización de residuos sólidos de la minería y se verá los criterios básicos de selección. Lo cual ayudará a tomar decisiones para evitar perjuicios al medio ambiente.

1.1 Marco Legal.

Las actividades mineras se rigen por un conjunto de normas legales de carácter ambiental:

- D.S. N° 016-93-EM del 28 de Abril del 1993 modificada por D.S. N° 059-93-EM del 10 de Diciembre de 1993, “Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades Minero Metalúrgicas”
- D.S. N° 038-98-EM del 25 de Noviembre de 1998, “Reglamento Ambiental para la Exploración Minera”
- Ley N° 28090 del 14 de Octubre del 2004, modificada por la Ley N° 28243 del 13 de Mayo del 2004 y Ley N° 28507 del 5 de Mayo del 2005, “Ley que Regula el Cierre de Minas” y su reglamento aprobado por D.S. N° 033-2005-EM del 15 de Agosto del 2005
- Ley N° 28271 del 6 de Junio del 2004, “Ley que Regula los Pasivos Ambientales de la Actividad Minera”.
- R.M. N° 011-96-EM/VMM de Enero de 1996, “Niveles Máximos Permisibles para Efluentes de Actividades Minero Metalúrgicas”.

Existen también guías ambientales para la minería:

- Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas (1995)
- Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros (1995)
- Guía Ambiental para el Cierre y Abandono de Minas (1996)
- Guía Ambiental para la Elaboración de Planes de Cierre de Mina (2005)

En lo que respecta a los residuos sólidos existe la “Ley General de Residuos Sólidos”, ley N° 27314 del 21 de Julio del 2000 y su reglamento el D.S. N° 057-2004-PCM del 24 de Julio del 2004, que determina:

Artículo 36°: El almacenamiento, tratamiento y disposición final de residuos originados por la actividad minera, deberá ceñirse a la normatividad y especificaciones técnicas que disponga la autoridad competente, cuando estos procesos son realizados al interior de las áreas de la concesión minera.

2. DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TECNICAS

2.1 Residuos Sólidos de la Industria Minera.

Los residuos generados durante la actividad minera son diversos. Pueden ser estériles, minerales de baja ley, residuos de minerales tratados por lixiviación, relaves y escorias.

2.1.1 Residuos provenientes de la extracción:

Según las características de los yacimientos, es necesario para su explotación remover grandes cantidades de materiales los que debe posteriormente ser reubicados en el entorno del yacimiento o planta de procesamiento. Los residuos sólidos que se generan en esta etapa son:

- ***Estéril o lastre:***

Incluyen aquellos materiales sin valor económico, que sólo han sido removidos del yacimiento y que a lo más han pasado por un proceso de chancado antes de su disposición. Se generan en grandes tonelajes; estos residuos provienen de todos aquellos sectores del yacimiento cuyo contenido de mineral valioso es muy bajo para hacer atractiva su recuperación, pero que de todas maneras es necesario remover para poder acceder a zonas más ricas del mismo. El estéril una vez removido del yacimiento se dispone formando las características "tortas" de estéril en las cercanías de los yacimientos mineros.

- ***Minerales de baja ley:***

el tonelaje de minerales de baja ley (mineral cuyo contenido de metal no hace rentable su procesamiento en la actualidad) varía de una faena a otra y son considerables las cantidades que se deben acopiar, para su probable procesamiento en un futuro.

- ***Desmontes de minas subterráneas:***

Son materiales que se generan en la construcción de galerías, piques y rampas para acceder al yacimiento subterráneo, durante su explotación; deben ser dispuestos ya sea en el interior de la mina o en el exterior en forma similar a la minería a cielo abierto.

2.1.2 Residuos provenientes del procesamiento de los minerales:

En el proceso de flotación, concentración de los minerales de cobre y oro, se producen los residuos llamados relaves:

- ***Relaves:***

Son los residuos que están compuestos por una suspensión fina de sólidos (mezcla de 50% en peso de sólidos y 50% de agua), constituidos fundamentalmente por el mismo material presente in-situ en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso.

Los relaves son conducidos en forma de pulpa hacia los depósitos llamados tranque de relaves, los que están diseñados para permitir la decantación de los sólidos en suspensión, y dependiendo del proceso, se puede recircular la fase líquida (aguas sobre nadantes) al proceso o descartarla, ya sea a través de evaporación, evapo-transpiración, descarte a cursos de agua o infiltración.

- **Escoria:**

Es el residuo producido durante la etapa de fundición de los concentrados de cobre. Las escorias principalmente fijan el hierro y otros metales presentes en el concentrado, mediante la generación de compuestos estables con la sílice que se utiliza como fundente. Las escorias son retiradas desde los hornos y son dispuestas en vertederos.

- **Ripios:**

Son residuos sólidos generados en el proceso de lixiviación del mineral oxidado y sulfuros secundarios. En el proceso el mineral chancado, con un tamaño aproximado de un cuarto de pulgada, se dispone formando una pila sobre la que se hace pasar un fluido lixivante (ácido sulfúrico en el caso de minerales de cobre y cianuro en el caso del oro) durante un período de tiempo definido; dicho fluido solubiliza el metal de interés contenido en la pila. Una vez extraído el metal valioso, el mineral "agotado" que queda recibe el nombre de ripio de lixiviación o de cianuración. Los ripios pueden ser compactados y sobre ellos construirse una nueva pila o bien pueden ser removidos y dispuestos finalmente en otro sitio. Para depositar los ripios de lixiviación se utilizan normalmente sitios preparados e impermeabilizados, con el objeto de evitar el escurrimiento de soluciones generalmente ácidas.

2.2 Drenaje Acido de la Minería

El drenaje de roca ácida (DRA) es un proceso natural a través del cual el ácido sulfúrico se produce cuando los sulfatos de las rocas son expuestos al aire libre o al agua. El drenaje de la minería ácida (DAM) es esencialmente el mismo proceso, solo que magnificado. Cuando las grandes cantidades de roca que contienen minerales sulfatados, son excavadas en tajo abierto o en vetas en

minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua para crear ácido sulfúrico. Cuando el agua alcanza cierto nivel de acidez, un tipo de bacteria común llamada "Tiobacillus Ferroxidant", puede aparecer acelerando los procesos de oxidación y acidificación, lixiviando aun más los residuos de metales de desecho.

El ácido lixiviara la roca mientras que la roca fuente este expuesta al aire y al agua. Este proceso continuara hasta que los sulfatos sean extraídos completamente; este es un proceso que puede durar cientos, o quizás miles de años. El ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales, y posteriormente depositado en los estanques de agua, arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos. El DAM degrada severamente la calidad del agua y puede aniquilar la vida acuática, así como volver el agua prácticamente inservible.



Figura N° 1- Aspecto de un río afectado por el DAM

2.3 Contaminación por Metales Pesados y Lixiviación

La contaminación por metales pesados es causada cuando algunos metales como el arsénico, el cobalto, el cobre, el cadmio, el plomo, la plata y el zinc, contenidos en las rocas excavadas o expuestos en vetas en una mina subterránea, entran en contacto con el agua. Los metales son extraídos y llevados río abajo, mientras el agua lava la superficie rocosa. Aunque los metales pueden ser movidos en condiciones de pH neutral, la lixiviación es particularmente acelerada en condiciones de pH bajo, tales como las creadas por el drenaje ácido de la minería.

Los residuos sólidos, en función de su composición y de las condiciones climáticas en su lugar de disposición, experimentan distintos tipos de transformaciones que pueden resultar en una migración de los metales disueltos. La solubilización de los metales resulta de una oxidación de los sulfuros residuales presentes en los residuos. La movilidad los metales está controlada por el movimiento de la solución por percolación o por capilaridad y por la estabilidad de los complejos que se forman en las condiciones de pH y de potencial redox que se establecen en la solución.

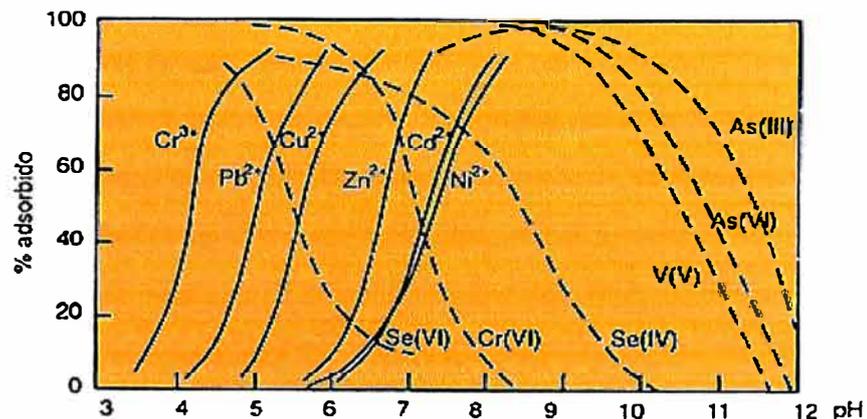
La actividad bacteriana juega también un rol importante en la cinética del proceso de disolución de los metales, en particular en la oxidación de la pirita.

La toxicidad de un agente contaminante no sólo va a depender de sí mismo sino de las características del suelo donde se encuentre. La sensibilidad de los suelos a la agresión de los agentes contaminantes va a ser muy distinto dependiendo de una serie de características.

2.3.1 Factores que Afectan la Acumulación y Disponibilidad de los Metales

pH – Es un factor esencial, la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido. Este es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos y en medios muy alcalinos pueden pasar nuevamente a la solución como hidrox-complejos.

La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo y por tanto también su solubilidad.



(Manziane y Merrill, 1969)

Figura N° 2- Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales y oxianiones metálicos sobre hidróxidos de Fe amorfo

Textura – La arcilla tiende a adsorber los metales pesados; por el contrario los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos.

Mineralogía de las arcillas – Cada especie mineral tiene determinados valores de superficie específica y descompensación eléctrica; ambas son responsables del poder de adsorción de los minerales.

Materia orgánica – Reacciona con los metales formando complejos y quelatos. La complejación por la materia orgánica de suelos es uno de los procesos que gobierna la solubilidad y la bio-asimilación de los metales pesados.

Capacidad de intercambio – Fundamentalmente es función del contenido de arcillas y materia orgánica; en general cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico, mayor será la capacidad del suelo de fijar los metales. El poder de adsorción de los distintos metales pesados depende de su valencia y el radio iónico hidratado; a mayor tamaño y menor valencia, quedan menos fuertemente retenidos.

Condiciones redox – El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido. Los diagramas Eh-pH se utilizan para mostrar la estabilidad de compuestos de metales pesados y proporciona información para predecir el comportamiento de los metales pesados frente a un cambio en las condiciones ambientales. Por ejemplo en condiciones reductoras el Fe^{3+} pasa a Fe^{2+} y estos iones reducidos son más solubles. Por otro lado las condiciones redox pueden afectar indirectamente la movilidad de metales.

La tabla que Plant y Raiswell (1983) desarrollaron es muy ilustrativa, se muestra a continuación.

Tabla N °1 – Movilidad de los metales pesados y elementos asociados en función de las condiciones de pH y Eh.

Movilidad relativa de los metales pesados según el Eh y pH del suelo				
Movilidad	Oxidante	Acido	Neutro y alcalino	Reductor
Alta	Zn	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au		

Media	Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd	Cd	Cd	
Baja	Pb	Pb	Pb	
Muy baja	Fe, Mn, Al, Sn, Pt, Cr, Zr	Al, Sn, Pt, Cr	Al, Sn, Cr, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd, Pb

Salinidad – El aumento de la salinidad puede incrementar la movilización de metales pesados por dos mecanismos. Los cationes asociados con las sales (Na, K) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de adsorción y los aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como Cd, Zn y Hg.

2.4 Contaminación Química

Este tipo de contaminación ocurre cuando algunos agentes químicos (tales como el cianuro y el ácido sulfúrico, utilizados por compañías mineras para la separación del material deseado, del mineral en bruto) se derraman, gotean, o se trasladan del sitio minero a un cuerpo de agua cercano. Estos químicos pueden ser también altamente tóxicos para los humanos y la fauna.

2.5 Erosión y Sedimentación

El desarrollo minero perturba el suelo y las rocas en el transcurso de la construcción y mantenimiento de caminos, basureros y excavaciones a la intemperie. Por la ausencia de prevenciones adecuadas y estrategias de control, la erosión de la tierra expuesta puede transportar una gran cantidad de sedimentación a arroyos, ríos y lagos. La sedimentación excesiva puede obstruir riveras, la delicada vegetación de estas y el hábitat para la fauna y organismos acuáticos.

Después de que la roca de desperdicio es removida y el mineral en bruto extraído, este último debe ser procesado para separar el mineral deseado de las porciones sin valor. Una vez que los minerales han sido procesados y recuperados, la roca sobrante se vuelve otra forma de desperdicio minero llamado relave. Los relaves mineros usualmente contienen los mismos metales pesados tóxicos y formaciones de ácido mineral que produce el desecho de roca. También pueden contener agentes químicos usados para el procesamiento del mineral en bruto, tales como cianuro o ácido sulfúrico. Los relaves son usualmente colocados en la superficie, en áreas de contención o en lagunas de oxidación, y en un número creciente de operaciones bajo tierra, donde el desecho es usado como relleno para las áreas que fueron excavadas. Si no son asegurados apropiadamente, los contaminantes de los desechos mineros pueden lixiviar hacia la superficie o a los mantos de agua subterránea causando una contaminación seria que puede perdurar durante muchas generaciones.

2.6 Ensayos para la Caracterización de Residuos Sólidos.

Existen procedimientos de laboratorio para el análisis de residuos sólidos y evaluar en un corto plazo la extracción de los constituyentes más solubles por lixiviación, por ejemplo las pruebas de toxicidad TCLP y SPLP que se describen más adelante. Sin embargo, en general estos procedimientos no permiten determinar la cinética de los procesos involucrados ya que no toman en cuenta las características específicas de los residuos mineros y metalúrgicos ni la variabilidad de las condiciones ambientales en los lugares de disposición de estos residuos a lo largo del tiempo.

Existen otros procedimientos desarrollados para obtener el potencial de generación de drenaje ácido de estos residuos, llamadas pruebas estáticas

debido a que no brindan información sobre las velocidades y el desarrollo de los procesos de generación de drenaje ácido y la neutralización de estos por la presencia de compuestos como los carbonatos .

Los estudios realizados para desarrollar los ensayos que se describen adelante fueron desarrollados en otros países, con otros tipos de residuos mineros y para condiciones ambientales muy distintas a las que tenemos en Perú.

2.6.1 Ensayo ABA Acid/base Accounting–Pruebas estáticas.

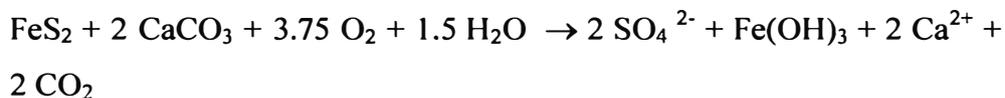
El ABA, consiste en la medida de la generación de ácido y del potencial de neutralización del ácido de una muestra de la roca. Reporta las medidas del potencial máximo de acidez (MPA) y del potencial de neutralización (NP), estos a la vez se restan para obtener el potencial neto de neutralización (NNP), o el llamado equilibrio neto Ácido-Base de la roca:

$$\text{Potencial neto de neutralización (NNP)} = \text{NP} - \text{MPA}$$

Los resultados se reportan en toneladas equivalentes de carbonato de calcio por mil toneladas material, tCaCO₃/1000t.

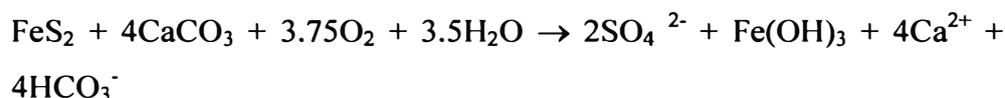
Los parámetros del ABA son referidos también por otros términos equivalentes. Las siglas APP son equivalentes a MPA, ANC son equivalentes a NP y NAPP son equivalentes a NNP.

Las medidas y los cálculos de NP, de MPA, y de NNP se basan en las siguientes reacciones estequiométricas (Cravotta y otros., 1990):



De acuerdo a esta reacción por cada mol de la pirita oxidada, se requieren dos moles de calcita para la neutralización ácida. También por cada gramo de sulfuro presente, se requieren 31.25 gramos de calcita para la neutralización ácida. Cuando se expresa en partes por mil, por cada 10 ppt de sulfuro presente (1 % de sulfuro), se requiere 31.25 ppt de calcita para la neutralización ácida.

Cravotta y otros (1990) han propuesto que hasta cuatro moles de calcita pudieron ser necesarias para la neutralización ácida como sigue:



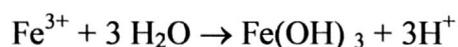
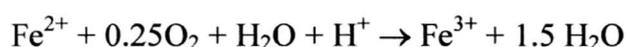
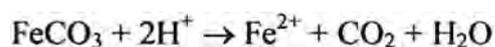
Esta ecuación estequiométrica demuestra que se requiere el doble de calcita para la neutralización ácida. Por cada 10 ppt del sulfuro presente, son necesarias 62.5 toneladas de calcita para la neutralización ácida en mil toneladas de sobrecarga.

De forma experimental (Brady y otros., 1994) se llega a la conclusión que el factor de 31.25 equivalencias era más exacto para los cálculos, y predecía más acertadamente los resultados en 31 de 38 minas (el 82%), mientras que el factor 62.5 predijo correctamente 22 de 38 (el 58%). Los resultados diversos de este y otros estudios subrayan los procesos geoquímicos complejos en el trabajo y el carácter único de cada lugar de la mina.

La base de la experiencia de la interpretación del ABA se ha construido en gran parte utilizando el factor 31.25, y siguen esta convención en la mayor parte de la literatura encontrada.

Potencial de la neutralización (NP) - El potencial de neutralización proporciona un índice de neutralizadores ácidos disponibles en la roca. El procedimiento no discrimina entre formas de neutralizadores y no representa un valor máximo teórico para NP.

Los carbonatos minerales son la fuente más importante de NP, y la calcita es el carbonato más importante encontrado en Pennsylvania, donde se realizaron estos ensayos. La dolomía, un carbonato mineral de calcio-magnesio está a veces presente y se disuelve más lentamente (Stumm, 1992). La siderita (FeCO_3), es un mineral secundario que no proporciona neutralización ácida neta (Williams y otros., 1982) según lo ilustrado abajo:



La disolución inicial de la siderita y la oxidación ferrosa del hierro consumen el ácido y pueden proporcionar la neutralización temporal. Sin embargo, la hidrólisis del hierro genera en última instancia una acidez igual a la consumida inicialmente, dando por resultado ninguna neutralización neta.

Potencial Máximo de Acidez (MPA) - Está basado en una medida de contenido de azufre en la roca. La presunción es que esto representa con exactitud la cantidad de ácido que genera los minerales de azufre. El azufre proviene del sulfito, sulfato, o formas orgánicas encontradas. La pirita es la principal fuente de generación ácida y la forma dominante del azufre (Smith, et al., 1976). Para los cálculos se asume que todo el azufre esta presente como pirita.

El azufre del sulfato existe en muchos minerales como el yeso (sulfato de calcio), jarosita (sulfato de hierro-potasio), y alunita (sulfato de aluminio-potasio). Los minerales de sulfato pueden estar presentes en cantidades significativas sólo en algunas zonas. Sales alcalinas de sulfato de la tierra, tales como el yeso no son formadoras de ácido. Sales metálicas de sulfato, sin embargo, son productos intermedios de la oxidación de la pirita, y representan "acidez almacenada". Estos minerales pueden sufrir disolución e hidrólisis con generación ácida. El azufre del sulfato no puede ser excluido como una fuente potencial ácida a no ser que se conozca la mineralogía, y los procedimientos de laboratorio comunes no identifican el aporte de azufre de minerales específicos.

Cálculo del Potencial Neto de Neutralización (NNP) - Los métodos de cálculo del NNP implican que la generación ácida de MPA y la neutralización ácida de NP ocurren simultáneamente y en velocidades iguales. De hecho, la generación ácida puede continuar más rápidamente, y es catalizado por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*. Las solubilidades de productos ácidos son tal que la acidez total puede extenderse de cientos a unos miles de mg/L. La disolución de mineral de carbonato es una función del pH y la presión parcial de dióxido de carbono (Plummer et al., 1978) y no ocurre tan rápidamente. La alcalinidad en el agua de las minas

raras veces es mayor a 400 mg/L debido a la solubilidad limitada de calcita y otros minerales de carbonato.

pH en pasta- Este se mide preparando una pasta con determinadas proporciones de agua des-ionizada y la muestra triturada, la muestra se ajusta hasta lograr una consistencia pastosa; finalmente se mide introduciendo un electrodo de pH. Esta medida fue incluida por Smith y colegas como uno de los parámetros ABA. Muestra el estado de acidez corriente de la muestra y proporciona una indicación preliminar de la generación neta de ácido asociada con una muestra, ya que el pH es un control fundamental tanto para el desarrollo de las reacciones como de la solubilidad del mineral.

Metales - La concentración de metales y componentes disueltos como el sulfato en el drenaje no son directamente predecible del análisis ABA. El procedimiento ABA cuantifica grupos minerales y no elementos individuales o la especie química. El comportamiento de metales individuales u otros componentes disueltos es el mejor evaluarlo con consideración del pH, el estado redox, y otras consideraciones de solubilidad.

2.6.2 Ensayo en Celdas de Humedad–Pruebas cinéticas.

Este procedimiento por lo general es conocido como un procedimiento de desgaste acelerado porque es diseñado para acelerar la velocidad de desgaste natural de muestras que son potenciales generadores de ácido y reducir el tiempo durante el cual el ensayo debe ser controlado. Las celdas son operadas bajo condiciones reguladas.

Los ensayos cinéticos contemplan lo siguiente:

- Sometimiento de la muestra a lixiviación periódica.
- Colección del drenaje para análisis.
- Cálculo de la velocidad de generación ácida y agotamiento de la capacidad de neutralización.
- Cálculo de la velocidad de liberación de componentes metálicos.
- Predicción de la calidad del agua.

Las celdas de humedad, han variado bastante en dimensiones desde el inicio de su uso. Sin embargo los laboratorios que actualmente realizan este ensayo para la industria minera ahora han adoptado un grado de estandarización con el uso de la norma ASTM D5744-96 reprobada el 2001 (*Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Modified Humidity Cell*).

Las celdas de humedad toman importancia debido a que la producción del drenaje ácido es un proceso que depende del tiempo; la química del agua de drenaje cambiará a lo largo del tiempo, pasando de ligeramente alcalina, hasta casi neutra y finalmente ácida y con concentraciones crecientes de metales. Este ensayo busca establecer un perfil de este proceso y estimar el tiempo que debe pasar para la generación de ácido de una muestra.

Una celda de 203 mm de altura (8.0 pulgadas) y 102 mm de diámetro (4.0 pulgadas) es especificado para muestras de 6.3 mm Ø, y una celda de 102 mm de altura (4.0 pulgadas) y 203 mm de diámetro (8.0 pulgadas) es especificado para muestras de 150 µm Ø. En ambos casos la masa de la

muestra es 1 Kg, cantidad que típicamente da una profundidad de cama de aproximadamente 80-120 mm en una celda de 102 mm de diámetro y 20-40 mm en una célula de 203 mm de diámetro, dependiendo de la densidad de la muestra. Los investigadores Soregaroli y Lorenzo (1998) han realizado el ensayo con 3 Kg de muestra en celdas de 102 mm de diámetro y 15 Kg de muestra en celdas de 254 mm de diámetro, y han obtenido resultados comparativos con aquellos obtenidos en celdas de 1 Kg de muestra y de 102 mm de diámetro.

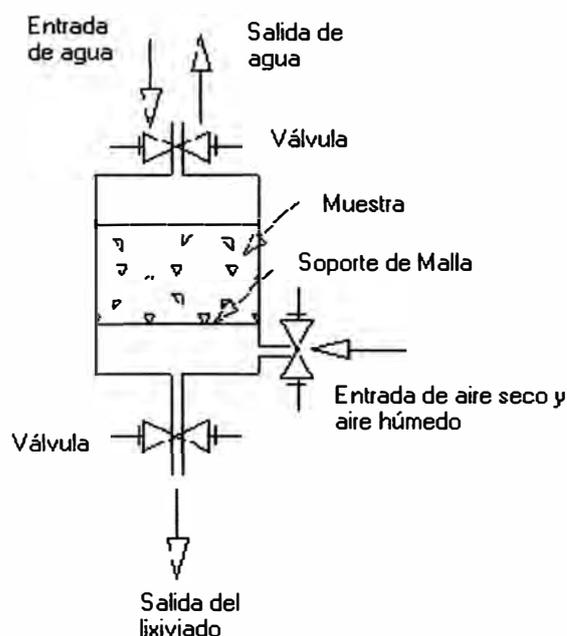


Figura N° 3 - Disposición Esquemática de la Celda de Humedad

Se hace pasar por un lecho fijo de muestra, un volumen de agua de una pureza especificada (1L) y la parte solubilizada es recogida y analizada semanalmente. Esta lixiviación es realizada a una muestra sólida de 1 Kg, durante un período mínimo de 20 semanas. La prueba es realizada en una célula cilíndrica para cada muestra, se pueden arreglar múltiples celdas en paralelo; esta configuración permite pruebas simultáneas de muestras

diferentes. El procedimiento de prueba es por ciclos semanales comprendidos por el bombeo de aire seco durante tres días (humedad relativa menor del 10%) y tres días de aire saturado (aproximadamente 95% de humedad), el aire es pasado por encima de la muestra y seguida de un lixiviación con agua durante el día 7.

Se debe tener en cuenta que este ensayo no es conveniente para algunos materiales que contienen plásticos, polímeros o metales refinados y tampoco ha sido probado para sustancias orgánicas y volátiles. Tampoco se trata de recrear condiciones climáticas específicas.

Un ensayo en celdas de humedad por lo general determinará si una muestra dada "será generadora de ácido", pero debemos tomar en cuenta que la operación de la celda de humedad ha acelerado la oxidación de mineral de sulfuro. Asimismo la velocidad acelerada de oxidación y la producción ácida causará una velocidad acelerada de generación de productos de oxidación como metales disueltos y/o compuestos metálicos. Es decir las concentraciones metálicas en el lixiviado semanal (ciclo de lavado) probablemente es más alto que aquellos generados en el campo. Antes de someter una muestra a la celda de humedad, esta debe ser pesada, además es muy útil su caracterización por el ensayo ABA, el análisis de metales por ICP (inductively couple plasma) y el examen mineralógico. En particular es importante que el Potencial de Generación Ácido (AP) y el Potencial de Neutralización (NP) de las muestras iniciales y finales sean determinados usando métodos idénticos. También es importante que las muestras iniciales y finales sean caracterizadas mineralógicamente, porque algunas muestras sufren cambios complejos mineralógicos durante el largo período de una prueba cinética. Los

resultados y la información mineralógica del "antes" "y después" sirven para evaluar los datos cinéticos del ensayo.



Figura Nº 4 - Celdas de Humedad

Terminología

Potencial de Neutralización (NP).- Es el potencial de una muestra de material sólido para neutralizar el efluente ácido producido por la oxidación de minerales de hierro-azufre, basados en la cantidad de carbonato presente en la muestra. El NP también es presentado en términos de $tCaCO_3/1000t$ (toneladas de equivalente de carbonato de calcio por 1000 toneladas de material sólido). Es calculado por digestión del material sólido con un exceso de ácido estandarizado y titulación con una base estandarizada para medir y convertir el consumo ácido a equivalentes de carbonato de calcio.

Potencial de producción de ácido (AP).- Es el potencial de una muestra de material sólido para producir un efluente ácido, basado en el porcentaje

de azufre contenido en la muestra de mineral de hierro-azufre (por ejemplo pirita).

El AP comúnmente es convertido a la cantidad de carbonato de calcio requerido para neutralizar la cantidad de efluente ácido producido por la oxidación de hierro contenido minerales de azufre; es expresado como $tCaCO_3/1000t$ (toneladas equivalentes de carbonato de calcio por 1000 toneladas de material sólido). El AP es calculado multiplicando el porcentaje de azufre contenido en la muestra por un factor estequiométrico de 31.25.

Parámetros analizados en el lixiviado

Los productos que pueden ser analizados incluyen lo siguiente: la acidez y alcalinidad por titulación semanalmente, las concentraciones de cationes y aniones convertidos a velocidad de liberación respectivas (ejemplo, la liberación promedio de $\mu gSO_4^- /g$ de muestra sólida /semana, durante un período de 20 semanas).

El número de los años esperado de producción de efluente ácido puede ser estimado de esta comparación bajo condiciones de desgaste acelerado en el laboratorio. Los años de desgaste acelerado requerido para agotar el NP de determinada muestra es calculado de modo similar, determinando la liberación media semanal del calcio y magnesio y dividiendo NP de la muestra por la suma de aquellas tarifas.

2.6.3 Prueba de toxicidad TCLP (EPA1311) y SPLP (EPA1312)–Pruebas de lixiviación.

Esta prueba de toxicidad consiste en el procedimiento de lixiviación para encontrar las características de toxicidad de sólidos residuales. Esta metodología fue desarrollada inicialmente para estimar la movilidad de inorgánicos específicos y orgánicos contaminantes en residuos que serían destinados para la disposición en rellenos municipales.

La prueba TCLP (EPA1311) es realizada sometiendo el material a una lixiviación que simula el proceso en un relleno sanitario. El ácido acético fue elegido como el líquido de extracción porque es el componente principal de los lixiviados municipales típicos. El pH de la solución extractora se mantiene en 4.93. Esta mezcla de la muestra y ácido acético se sujeta a 18 horas de extracción ayudado por un equipo que realiza movimientos rotatorios a 30 rpm aproximadamente, diseñada para acelerar el efecto de la exposición del material en un relleno al pasar de los años, pero logrando esto en el tiempo más corto posible. Después de la extracción, el líquido que resulta puede ser sujeto al análisis de una lista de 39 contaminantes que contienen en su lista el TCLP del EPA. Estos contaminantes incluyen ocho metales, once compuestos orgánicos volátiles, doce compuestos orgánicos semi-volátiles, seis pesticidas, y dos herbicidas.

Los metales son analizados por la espectroscopia de Plasma-Atómica inductivo y el mercurio por espectroscopia atómica con vapor frío. Los otros parámetros inorgánicos se analizan según los métodos analíticos apropiados.

La prueba SPLP (EPA1312) se utiliza para evaluar el potencial para lixiviar los metales de las aguas sub-terráneas y superficiales. Este método proporciona un resultado más realista de la movilidad del metal bajo condiciones reales del campo, es decir qué sucede cuando llueve (o las nieves). El líquido de la extracción simula las precipitaciones al Este y al Oeste del río de Misisipi; al Este se refleja los impactos de la contaminación atmosférica por la gran industrialización del carbón y en general hay un mayor desarrollo industrial, por lo tanto el líquido de extracción tiene pH 4.20; al Oeste del río Misisipi se tiene menos industrialización y densidades demográficas más pequeñas, por lo tanto el líquido de extracción tiene pH 5.00. En el Perú debido a la poca industrialización suele escogerse pH 5.00 para el líquido de extracción a utilizar.

El SPLP es un método de opción para evaluar el transporte de metales de residuos que no son dispuestos en rellenos municipales.

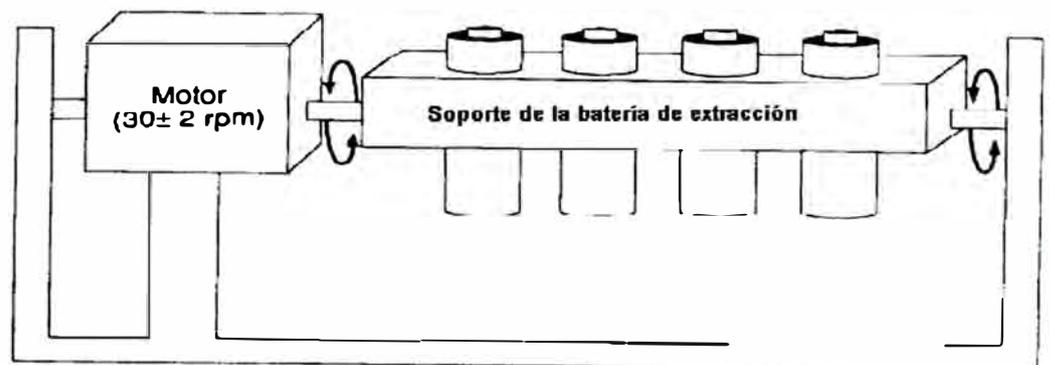


Figura N° 4 - Aparato de extracción

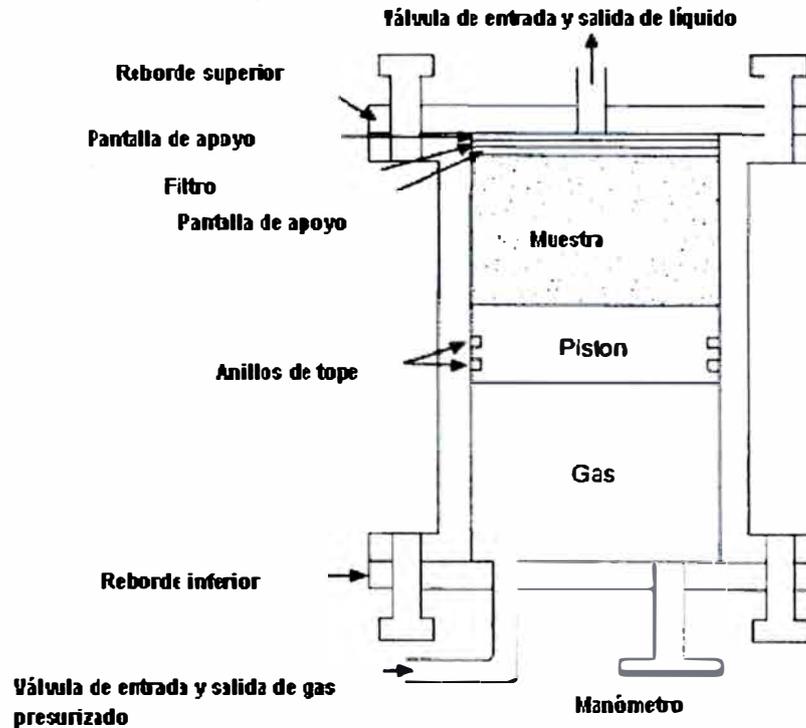


Figura N° 5 - Extractor

2.6.4 Análisis Instrumental de Metales por ICP

El ICP que son las iniciales en inglés de *Inductively Couple Plasma* y que en español se entiende como *Plasma de Acoplamiento Inductivo* es una técnica analítica usada para la detección de rastros de los metales en muestras ambientales. La meta fundamental del ICP es emitir una luz de la longitud de onda característica de cada elemento para medir su contenido. El hardware del ICP está diseñado para generar el plasma, que es un gas en el cual los átomos están presentes en un estado ionizado. Un ICP consiste básicamente en tres tubos concéntricos, hechos a menudo de sílica; estos tubos componen la antorcha del ICP, la cual se sitúa dentro de un generador de la radiofrecuencia de bobina, refrigerada por agua.

Mientras que los gases son introducidos en la antorcha, se activa el campo de radio frecuencia y el gas se hace eléctricamente conductos en la región de la bobina. Esta secuencia de eventos forma el plasma.

Un ICP requiere que los elementos a ser analizados estén en solución. El nebulizador transforma la solución acuosa en un aerosol y la luz emitida por los átomos de un elemento en el ICP se debe convertir a una señal eléctrica que se pueda medir cuantitativamente, esto es logrado descomponiendo la luz por medio de una rejilla de difracción y después midiendo la intensidad de luz a la longitud de onda específica para cada elemento.

La luz emitida por los átomos o los iones en el ICP es convertida a señales eléctricas, la intensidad de la señal del electrón se compara con las intensidades de concentraciones conocidas del elemento y se calcula una concentración.

A menudo, el ICP se utiliza conjuntamente con otros instrumentos analíticos, tales como la espectrofotometría de emisión óptica (OES) y la espectrometría de masas (MS).

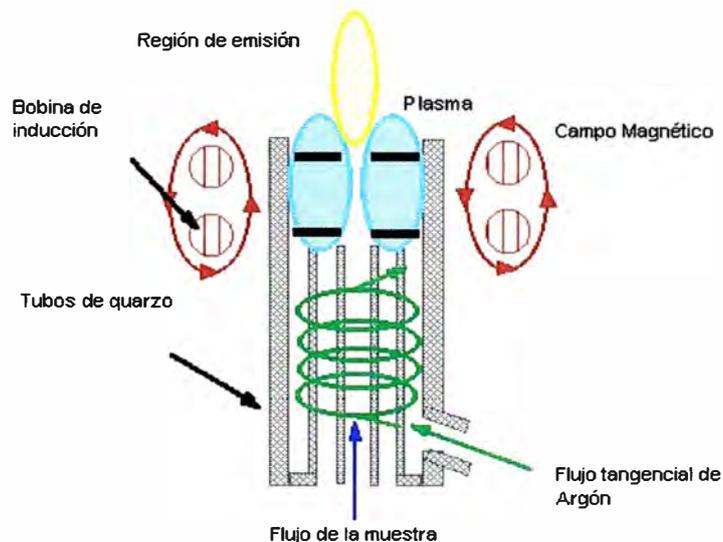


Figura N° 6 – Diagrama esquemático de un sistema de ICP

3. DESARROLLO DEL TEMA

3.1 Criterios para la Interpretación de Resultados.

Cálculo ABA – Los requisitos fundamentales para la generación ácida son:

1. Minerales del sulfuro
2. Agua o una atmósfera húmeda
3. Un oxidante (generalmente oxígeno bajo la forma de O₂)

Los factores primarios que determinan el índice de la generación ácida son:

1. pH
2. Temperatura
3. Contenido en oxígeno de la fase de gas, si la saturación es menos de 100%
4. Concentración de oxígeno en la fase del agua
5. Grado de saturación con agua
6. Actividad química de Fe³⁺
7. Área superficial del sulfuro expuesto del metal
8. Energía de activación química requerida para iniciar la generación ácida
9. Actividad biológica (tal como bacterias que oxidan del hierro)

El cálculo ABA representa un grupo de parámetros que sirven como instrumentos interpretativos para predecir impactos de minería a sistemas hidrológicos. La experiencia acumulada, desarrollada en más de 15 años de usar ABA en lugares como Pensilvania, muestra que las interpretaciones más importantes vienen de la evaluación colectiva de varios factores. Esto incluye datos ABA, el funcionamiento histórico, la calidad de agua, la geología, los sistemas de flujo de aguas subterráneas, efectos de desgaste, así como el tipo de minería propuesta y el plan de recuperación. Una predicción de la calidad de

drenaje de la mina es resultado de una evaluación integrada de todos estos factores.

Se han definido algunos criterios numéricos o niveles de importancia para clasificar los resultados del ABA y el comportamiento esperado de la roca. Estos criterios numéricos han tomado la forma de fronteras sobre valores del NNP; las proporciones de NP al MPA; fronteras sobre valores para NP o MPA. Algunos de estos criterios, y sus usos geológicos y geográficos, son presentados a continuación:

Tabla N °2 – Criterios para la Interpretación del Cálculo ABA

CRITERIO	REFERENCIA
Rocas con NNP menores de -5 ppt CaCO_3 son consideradas potencialmente tóxicas.	Smith et al., 1974, 1976; Surface Mine Drainage Task Force, 1979; Skousen et al., 1987
Rocas con pH en pasta menor de 4.0 son consideradas ácidas.	Smith et al., 1974, 1976; Surface Mine Drainage Task Force, 1979 Miller and Murray, 1988
Rocas con contenido de azufre mayor del 0.5% puede generar acidez significativa.	Brady and Hornberger, 1990 Miller and Murray, 1988
Rocas con NP mayor de 30 ppt CaCO_3 y "burbujeo" son fuentes significativas de alcalinidad.	Brady and Hornberger, 1990
Rocas con NNP mayor de 20 ppt CaCO_3 producen drenaje alcalino.	Skousen et al., 1987; British Columbia Acid Mine Drainage Task Force, 1989; Ferguson and Morin, 1991
Rocas con NNP menor de -20 ppt CaCO_3 producen drenaje ácido.	British Columbia Acid Mine Drainage Task Force, 1989; Ferguson and Morin, 1991
Rocas con NNP mayor de 0 ppt CaCO_3 no producen acidez. Relaves con NNP menor de	Patterson and Ferguson, 1994; Ferguson and Morin, 1991

0 ppt CaCO ₃ producen drenaje ácido.	
La relación NP/MPA ratio menor de 1 probablemente resulta en drenaje ácido.	Patterson and Ferguson, 1994; Ferguson and Morin, 1991
La relación NP/MPA es clasificada como menor de 1, entre 1 y 2, y mayor de 2.	Ferguson and Robertson, 1994
Teóricamente la relación NP/MPA de 2 es necesaria para la neutralización completa de la acidez.	Cravotta et al., 1990
El uso de los valores de NP y MPA así como la proporción es para representar la capacidad buffer del sistema.	Filipek et al., 1991

(1) Los Criterios de esta tabla fueron desarrollados para la clasificación de muestras de roca individuales

TCLP y SPLP

La prueba de TCLP se limita a determinar si un residuo puede ser dispuesto en un relleno municipal.

El procedimiento de TCLP se puede aplicar mal de dos maneras. Primero, el análisis de los compuestos no incluidos en el desarrollo de los métodos o la regla final de TCLP puede proporcionar resultados técnico inválidos. Un ejemplo de esto sería la utilización de la extracción de TCLP para el cianuro. El procedimiento mismo de la extracción dará lugar a la pérdida de complejos simples del cianuro, representando la forma más tóxica de cianuro.

La segunda manera que se aplica mal el TCLP está por medio del procedimiento para los materiales que no son destinados para los terraplenes donde está probable la interacción con el ácido acético. En estos casos un procedimiento alternativo, el SPLP, (procedimiento de precipitación sintética que lixivia) el método 1312 de EPA SW-846 puede ser apropiado. Este

procedimiento es aplicable para los materiales donde se determinará el potencial de lixiviación debido a la precipitación normal. En vez del lixiviado del terraplén que simula la mezcla del ácido acético, se utilizan los ácidos nítricos y sulfúricos en un esfuerzo de simular las lluvias ácidas resultando de los óxidos nítricos y sulfúricos aerotransportados.

Tabla N° 3 - TCLP 1311 vs. SPLP 1312

TCLP método 1311	SPLP método 1312
Acido acético / Hidróxido de sodio	Acido nítrico / Acido sulfúrico / Agua
Volátiles	Volátiles
<ul style="list-style-type: none"> ❖ pH 4.93 ❖ ZHE 18+/- 2 horas 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Agua desionizada ❖ ZHE 18+/- 2 horas
Semi-volátiles / Metales	Semi-volátiles / Metales
<ul style="list-style-type: none"> ❖ #1 pH 4.93 (>5) ❖ #2 pH 2.88 (<5) ❖ Extracción rotacional 18+/- 2 horas 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ #1 pH 4.20 (Este del río Misisipi) ❖ #2 pH 5.00 (Oeste del río Misisipi) ❖ Extracción rotacional 18+/- 2 horas

Característica de Toxicidad.

Usando el Procedimiento de Lixiviación EPA1311, puede determinarse las características de toxicidad de una muestra, el extracto de esta muestra representativa que contenga cualquiera de los contaminantes catalogados en la siguiente tabla, de concentración igual a o mayor que el valor respectivo dado en esta.

Tabla N° 4 – Límite de Concentración de Metales

EPA HW #	Constituyente Regulatorio	mg/L
D004	Arsénico	5.0

D005	Bario	100.0
D005	Cadmio	1.0
D008	Plomo	5.0
D009	Mercurio	0.2
D010	Selenio	1.0
D011	Plata	5.0

La Regla de Características de Toxicidad, primero propuesta en junio de 1986 por la Agencia Estadounidense de Protección de Medioambiente, estableció el TCLP como el marco regulador para definir materiales peligrosos. Hacia marzo de 1990, cuando se firmó la regla final, el TCLP se había hecho la prueba de definición para la identificación de componentes riesgosos por su toxicidad.

El procedimiento del TCLP ofreció ventajas significativas debido a su reproducibilidad mejorada y la facilidad relativa de funcionamiento. Sin embargo la desventaja fue la premisa hecha por el Ministerio Estadounidense del Medioambiente, en la cual se consideraba que estos residuos tóxicos podrían ser eliminado en terraplenes municipales. El TCLP fue desarrollado para simular la lixiviación de sustancias químicas por ácidos orgánicos desarrollados por la interrupción biológica de basura municipal.

La industria minera también solicitó la aceptación del otro método SPLP, argumentando que con mayor probabilidad ocurre sobre el sitio la filtración de lluvia ácida que el desarrollo de ácidos orgánicos. Por lo tanto, el SPLP, que usó ácidos inorgánicos en niveles de pH diseñados para simular la lluvia ácida, simula mejor las condiciones de campo esperadas.

Aceptando este argumento, se comenzó a requerir el empleo de SPLP como prueba para la industria minera.

3.2 Criterios para la Elección de Ensayos y Parámetros de Análisis

En la elección de los ensayos a realizar para la caracterización de los residuos sólidos, se tiene en cuenta los objetivos que se quieren alcanzar con la caracterización de estos residuos.

Por ejemplo un programa de pruebas de predicción del comportamiento y efectos que pueden tener estos residuos sobre el lugar donde han sido depositados, depende principalmente del tipo de mina y de su etapa de operación. Los objetivos son:

- La caracterización geoquímica de la roca, para identificar el potencial de generación de ácido y/o de lixiviación; y
- La predicción de la calidad y características del agua de drenaje.

La predicción puede ser realizada a una gran variedad de materiales y a través de distintos métodos, tales como estudios mineralógicos detallados, comparaciones con otros sitios, monitoreo del drenaje, pruebas de laboratorio estáticas, pruebas de laboratorio cinéticas y pruebas de campo en el sitio minero. La selección del método más apropiado, el muestreo y la interpretación de los datos, debería basarse en las necesidades del proyecto y en los requisitos específicos del sitio (geoquímica y mineralogía del depósito, entorno regulatorio y ambiental del lugar y métodos de manejo y control en uso o planificados).

En la actualidad, los ensayos ABA son ampliamente difundidos para predecir el drenaje ácido, básicamente por que dan resultados en muy corto tiempo, son relativamente baratos y existen pautas ya establecidas para la interpretación de

los resultados, como consecuencia, este ensayo se puede escoger como el primer paso en un programa de pruebas de predicción de drenaje ácido, ya que nos dan el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido (minerales sulfurosos reactivos) y aquellos potencialmente consumidores de ácido en la muestra (carbonatos, hidróxidos, silicatos y arcillas).

Adicionalmente las pruebas de mineralogía y geológicas son utilizadas para apoyar colateralmente los resultados de las pruebas estáticas. También es frecuente que a la vez se ensaye la prueba de toxicidad SPLP, la cual es rápida. Sin embargo las pruebas estáticas son útiles solo para predicciones cualitativas y no pueden utilizarse para predecir la calidad de agua de drenaje a largo plazo.

Otra limitación de las pruebas estáticas es que son instantáneas, es decir no proveen información directa sobre las velocidades de los procesos o las velocidades de liberación de los productos del intemperismo.

Por otro lado los ensayos cinéticos aún no son muy frecuentes debido al tiempo de duración, mínimo 20 semanas, lo que los hace más caros; a pesar de esta limitación es recomendable el uso de estas pruebas para determinar específicamente la cinética de las reacciones de oxidación, neutralización y lixiviación de los metales. Los resultados obtenidos en estos ensayos cinéticos necesitan de modelos matemáticos cuantitativos para la extrapolación confiable de los resultados, mas allá del momento de la prueba.

Muchos tipos de rocas tienen constituyentes fácilmente solubles, disponibles para la lixiviación inmediata, totalmente independiente de cualquier generación de ácido que pudiera ocurrir, para lo cual se debe utilizar las pruebas de extracción de lixiviado de corto plazo, las cuales tienen como objetivo cuantificar la movilidad de los contaminantes y a partir de eso permitir la

clasificación del material y escoger el método adecuado de disposición y contención de estos desechos. Escoger adecuadamente el pH del líquido de extracción es muy importante ya que debemos tener en cuenta que la solubilidad de las especies tiene estrecha relación con el pH al que se realice el ensayo.



Figura N° 7 – Esquema para la selección de ensayos

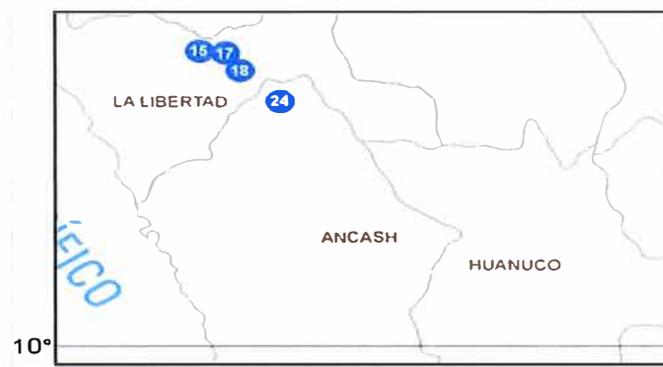
No se puede dejar de mencionar que estos ensayos de laboratorio son realizados bajo condiciones ideales (condiciones constantes y conocidas), las cuales generalmente difieren sustancialmente de las condiciones del sitio.

3.3 Resultados Obtenidos en la Aplicación de los Ensayos

3.3.1 Proyecto N° 1 Magistral

Datos geográficos:	Distrito	Conchucos
	Provincia	Pallasca
	Departamento	Ancash
	Coordenadas	Longitud Oeste 77°46'13"O
		Latitud Sur 08°13'03"S

Figura N° 8 – Mapa de Ubicación del Proyecto Magistral



Magistral: Punto 24 en el mapa

Información del Yacimiento

Tipo de Yacimiento	Pórfido y Skarn de Cu-Mo
Contenido Metálico	Cu, Mo
Geometría	Cuerpos irregulares de skarn, disseminaciones, venillas y stockwork.
Tamaño	El cuerpo principal tiene la forma de una silla de montar con 1,200m de largo, 150m de ancho y una profundidad comprobada de por lo menos 350m.
Roca Huésped	Secuencia de calizas masivas, en estratos potentes, de la Fm. Jumasha (Cretáceo superior) intruida por dos

	stocks cilíndricos de granodiorita (San Ernesto y Sara) con un "plunge" de 60°NO.
Otras litologías asociadas	Rocas carbonatadas (calizas, margas y limolitas) de las formaciones Pariahuanca, Chulec y Pariatambo (Cretáceo superior).
Estructuras	Magistral se encuentra en la zona de inflexión de las estructuras NO-SE que vienen del sur y pasan a ser NNE-SSO hacia el norte. Las estructuras son pliegues kilométricos que afecta a la secuencia del Cretáceo y fallas sobre todo inversas (sobre-escurrimientos con buzamiento al O). A escala del distrito la estructura es complicada y está dominada por una serie de fallas y sobre-escurrimientos de rumbo N-S, buzando al O (40°) y que habrían estado activas antes, durante y después del emplazamiento de los intrusivos y la alteración-mineralización.
Alteración	La geometría del depósito está caracterizada por un zonamiento de la alteración-mineralización: 1) la parte central con los pórfidos San Ernesto y Sara contienen alteración-mineralización hidrotermal de tipo pórfido (potásica y argílica intermedia). 2) Zona de contacto caracterizada por endo y exo skarn (granate-piroxeno) con numerosos diques porfiríticos. 3) zona externa de skarn constituida por granate-piroxeno libre de diques porfiríticos y 4) Finalmente la zona de mármol en las calizas Jumasha. Los granates están zonados respecto al contacto con el pórfido, los granates marrón oscuro se presentan en el contacto con el pórfido, mientras que los granates y piroxenos verde amarillentos se ubican lejos de él.
Mineralización	La mineralización ocurre en dos ambientes bien definidos, la relacionada con el pórfido San Ernesto consiste en mineralización asociada al stockwork y vetas (tipo B) de cuarzo-calcopirita-molibdenita dentro de la alteración potásica (0,5-0,7% Cu y 0,04-0,06% Mo) y luego la mineralización asociada al skarn progrado con calcopirita, pirrotita y magnetita (>1% Cu y 0,03% Mo). Por otro lado se ha encontrado vetas de filiación epitermal de tipo alta sulfuración: Cu-As con tetraedrita, enargita, arsenopirita, estibina,

estibiolumonita y abundante pirita en vetas de cuarzo-sericita y baja sulfuración: rico en Cu con calcopirita en vetas de cuarzo-adularia-calcita.

Edad de la Mineralización	Mioceno medio (15-13 Ma)
Reservas	Reservas indicadas 190 Mt con 0,83% Cu y 0,062% Mo.
Producción	En caso de prosperar el proyecto, éste produciría 100,000 t de Cu.

Información del Proyecto

Inversiones	Durante el año 2000 se completaron 6,000 metros de perforación, geoquímica y geofísica, sumando una inversión de US\$ 2,1 millones. Para el año 2001 se tenía previsto invertir US\$ 3 millones para continuar con las exploraciones y llegar a los 14,000m de perforaciones. El compromiso total de inversión es de US\$ 200 millones.
Comentarios	Magistral se ubica en la cordillera de Pelagatos, callejón de Conchucos, y a 100 km al este del puerto de Chimbote. Magistral fue explorado por la Cerro de Pasco Copper Corporation entre los años 1950 y 1973, luego pasa a manos de la empresa Compañía Minera Magistral hasta 1991. A finales de 1999 la CEPRI de Centromin/Minero Perú subastó la propiedad y fue adjudicado a la empresa Ancash Cobre S.A. (Inca Pacific Resources) luego de cumplir con los requisitos que exigía el proceso de privatización. Conjuntamente con Anaconda inician un programa agresivo de exploraciones.

Se realizaron ensayos estáticos (ABA) y cinéticos (celdas de humedad) de muestras de rocas tomadas en Junio del 2005 de la zona del proyecto minero Magistral de Inca Pacific Resources Inc. en el departamento de Ancash. Los ensayos se encargaron a un laboratorio acreditado. Los resultados que se presentan a continuación son tomados en el presente informe para realizar el análisis interpretativo.

Las muestras analizadas son rocas acumuladas como producto del proceso de perforación en la zona del proyecto.

Identificación de la muestra	Peso de la muestra Kg.
Magistral-001	4.04
Magistral-002	2.46
Magistral-003	6.18

Ensayos ABA

Las muestras fueron ensayadas en el mes de Julio del 2005. Para el ensayo en el laboratorio se utilizó la referencia: Sobek, AA, Schuller, WA, Freeman, JR and Smith, RM -1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils, EPA 600/2-78-054, 203 pp.

Tabla N° 5 – Resultados del Ensayo ABA, Proyecto Magistral

Identificación de la muestra		Magistral-001	Magistral-002	Magistral-003
Matriz		Roca	Roca	Roca
MPA	tCaCO3/1000t	17.5	45.6	24.7
NP	tCaCO3/1000t	50	141	172
NNP	tCaCO3/1000t	32.5	95.4	147.3
pH-Pasta		9.0	8.5	8.3
NP/MPA		2.86	3.1	7.0
Sulfato HCL	% S	0.02	0.08	<0.01
Sulfuro	% S	0.54	1.38	0.79
Azufre Total	% S	0.56	1.46	0.79

De acuerdo a los criterios sugeridos para la interpretación de esta prueba estática puedo afirmar lo siguiente:

- Las rocas podrían generar acidez significativa debido a su contenido de Azufre mayor de 0.5%.

- Dado que tienen NP mayor de 30 son fuentes significativas de alcalinidad y del resultado del NNP podemos decir que estas producen drenaje alcalino.
- El pH en pasta de las muestras, mayor de 8 indica que probablemente contienen carbonatos reactivos.

Paralelamente se analizó el contenido de metales en las muestras de rocas con un equipo de ICP-OES. El análisis fue llevado a cabo utilizando un procedimiento adaptado del SW-846 (Test Methods for Evaluating Solid Waste) EPA 3050B, la muestra es homogenizada manualmente y una sub-muestra representativa seca es pesada para luego ser sometida a digestión utilizando una solución de ácido nítrico y clorhídrico 1:1, finalmente para el análisis instrumental de los metales se utiliza un equipo de plasma de acoplamiento inductivo de espectrofotometría de emisión óptica (ICP-OES).

Tabla N° 6 – Resultados del Análisis de metales, Proyecto Magistral

Metal (Unidades)	Magistral-001	Magistral-002	Magistral-003
Arsénico (ppm)	121	279	132
Fierro %	1.36	4.01	16.80
Cobre (ppm)	1540	2490	862
Plomo (ppm)	6	22	<2
Zinc (ppm)	40	87	70
Calcio %	2.12	9.16	21.7
Magnesio %	0.67	0.79	1.23

Ensayos en Celdas de Humedad

Se somete las muestras al proceso de intemperismo en celdas de humedad, para verificar la calidad del agua de drenado con el paso del tiempo, para lo cual se hacen análisis de varios parámetros en el líquido de drenaje de estas. Como es sugerido el ensayo se lleva a cabo durante 20 semanas, la primera muestra de

agua de drenaje es tomada en la semana 0, es decir antes de someter las muestras al intemperismo.

El ensayo se inició en Marzo del 2006. Las celdas de humedad utilizadas están elaboradas de acuerdo a la norma ASTM D5744-96.

Parámetros analizados en el extracto:

- pH (frecuencia semanal)
- Conductividad eléctrica (frecuencia semanal)
- Alcalinidad (frecuencia semanal)
- Acidez (frecuencia semanal)
- Sulfatos (frecuencia semanal)
- Metales disueltos: arsénico, cobre, plomo y zinc por ICP-MS (semanas en que se analizó: 0, 1, 2, 5, 10, 15 y 20)

Los análisis en el líquido drenado han sido realizados con métodos estandarizados. Los análisis fueron realizados en el líquido drenado recolectado y previamente filtrado.

Tabla N° 7 – Resultados del Análisis del Extracto de la Celda de Humedad de la muestra Magistral 001

Parámetros	Semana N°										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pH	7.16	7.12	7.61	8.02	8.06	7.72	7.81	7.96	7.8	7.77	7.31
Conductividad (uS/cm)	420	193	174	152	142	133	125	132	123	126	122
Acidez (mg CaCO3/L)	8	7	4	3	1	2	2	2	2	2	3
Alcalinidad total (mg CaCO3/L)	57	36	38	40	41	40	38	41	36	39	36
Peso de Líquido (g)	734	912	928	920	930	910	930	920	910	920	930
Sulfato (SO4) (mg/L)	128	49	38	26	22	20	16	17	20	21	20
Sulfato (SO4) (mg)	94.0	44.7	35.3	23.9	20.5	18.2	14.9	15.6	18.2	19.3	18.6
Sulfato Acumulado (mg)	94.0	138.6	173.9	197.8	218.3	236.5	251.4	267.0	285.2	304.5	323.1
Arsénico (As) (mg/L)	0.079	0.203	0.2	---	---	0.169	---	---	---	---	0.150
Cobre (Cu) (mg/L)	0.0065	0.004	0.0037	---	---	0.0036	---	---	---	---	0.0057
Plomo (Pb) (mg/L)	0.0013	<0.0010	<0.0010	---	---	<0.0010	---	---	---	---	<0.008
Zinc (Zn) (mg/L)	0.0473	0.0085	0.0064	---	---	0.0083	---	---	---	---	0.0153
Parámetros	Semana N°										
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
pH	7.45	7.87	7.63	7.9	7.96	8.14	7.22	7.48	7.29	7.49	
Conductividad (uS/cm)	122	116	116	113	115	110	113	108	107	109	
Acidez (mg CaCO3/L)	2	3	2	1	2	1	2	2	3	3	
Alcalinidad total (mg CaCO3/L)	39	36	40	40	39	39	31	36	37	38	
Peso de Líquido (g)	950	940	950	950	950	940	950	970	960	950	
Sulfato (SO4) (mg/L)	19	17	13	16	17	12	16	13	14	14	
Sulfato (SO4) (mg)	18.1	16.0	12.4	15.2	16.2	11.3	15.2	12.6	13.4	13.3	
Sulfato Acumulado (mg)	341.2	357.2	369.5	384.7	400.9	412.2	427.4	440.0	453.4	466.7	
Arsénico (As) (mg/L)	---	---	---	---	0.107	---	---	---	---	0.0876	
Cobre (Cu) (mg/L)	---	---	---	---	0.0055	---	---	---	---	0.0039	
Plomo (Pb) (mg/L)	---	---	---	---	0.0017	---	---	---	---	<0.0010	
Zinc (Zn) (mg/L)	---	---	---	---	0.0165	---	---	---	---	0.0135	

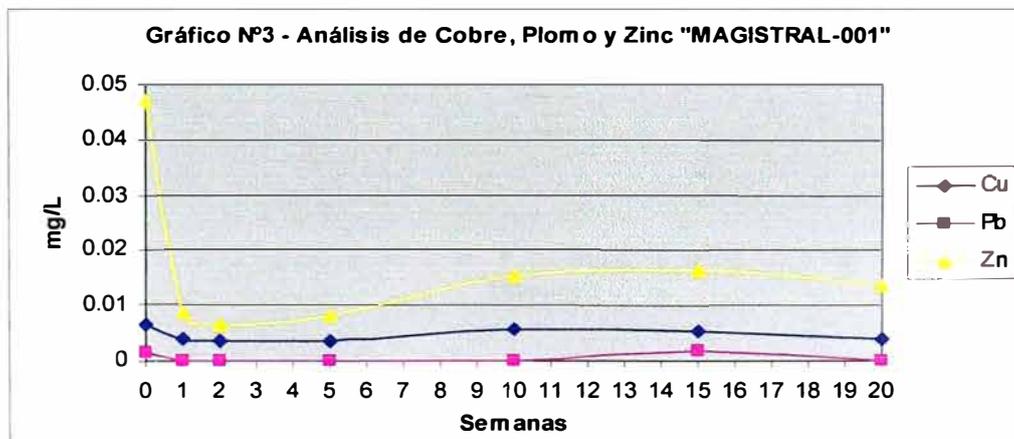
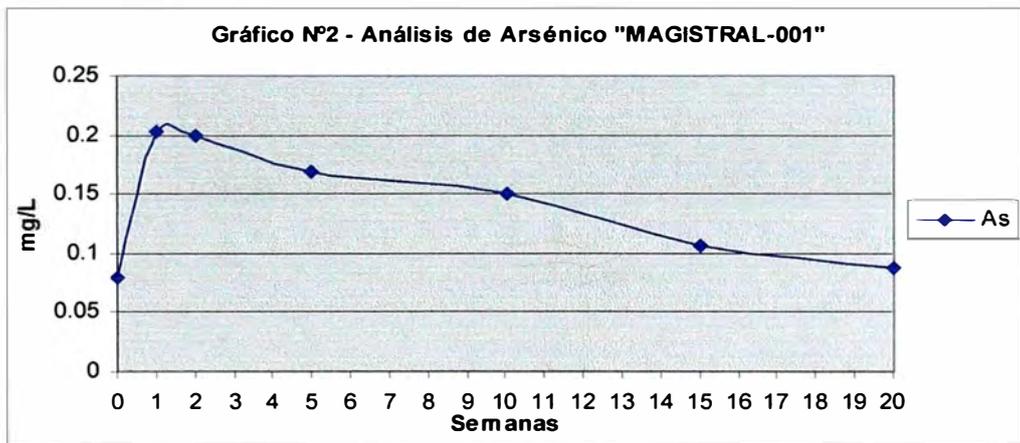
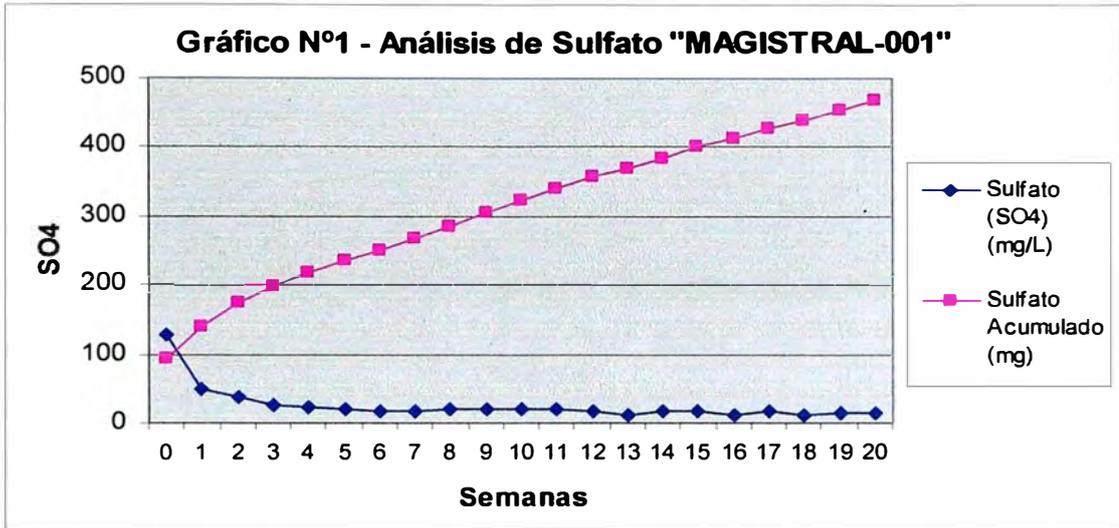
Tabla N° 8 – Resultados del Análisis del Extracto de la Celda de Humedad de la muestra Magistral 002

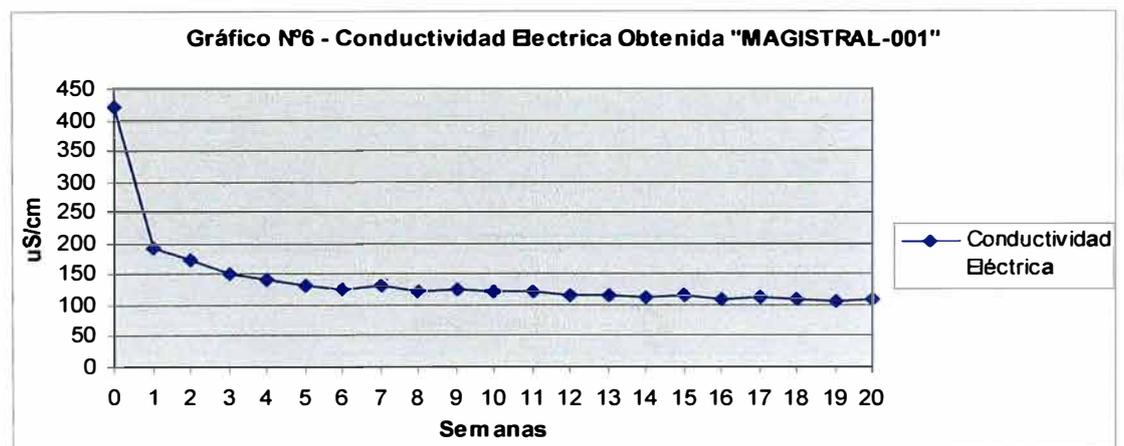
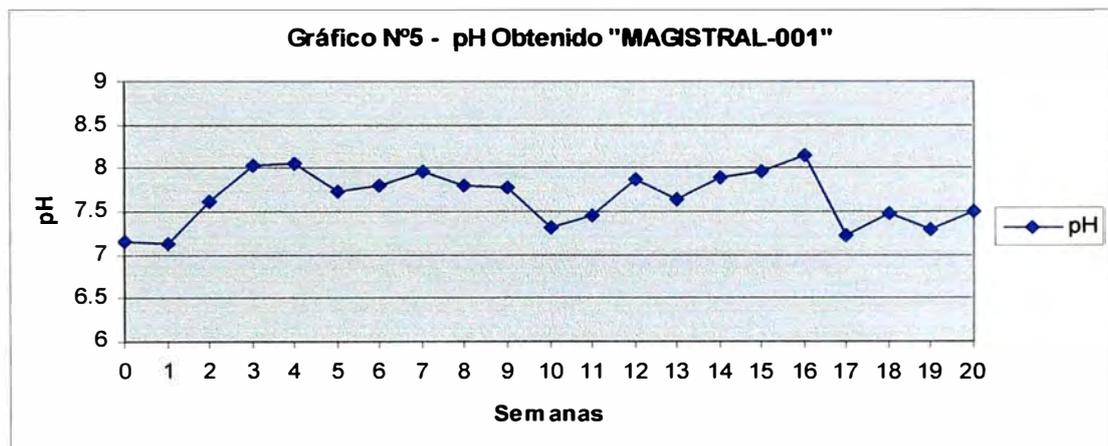
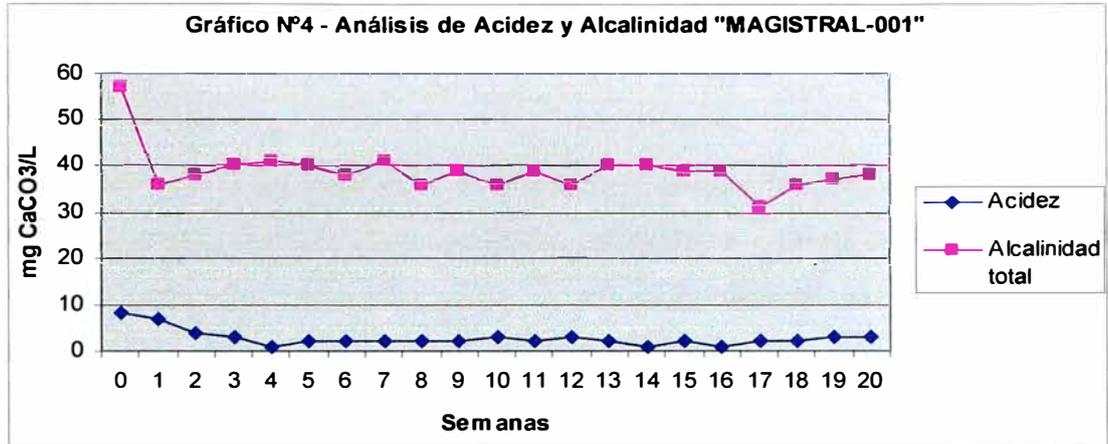
Semana N°											
Parámetros	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	7.81	7.51	7.78	8.14	8.27	7.5	7.75	8.17	7.88	7.97	7.38
pH	205	191	203	212	176	190	147	126	125	139	126
Conductividad (uS/cm)	3	3	2	2	<1	2	1	<1	<1	2	2
Acidez (mg CaCO3/L)	31	25	31	25	26	27	28	26	30	31	28
Alcalinidad total (mg CaCO3/L)	794	902	822	820	900	910	920	920	900	910	900
Peso de Líquido (g)	51	56	58	68	44	53	33	23	26	29	27
Sulfato (SO4) (mg/L)	40.5	50.5	47.7	55.8	39.6	48.2	30.4	21.2	23.4	26.4	24.3
Sulfato (SO4) (mg)	40.5	91.0	138.7	194.4	234.0	282.3	312.6	333.8	357.2	383.6	407.9
Sulfato Acumulado (mg)	0.0377	0.0535	0.0599	---	---	0.088	---	---	---	---	0.120
Arsénico (As) (mg/L)	0.0081	0.0049	0.0038	---	---	0.0038	---	---	---	---	0.0078
Cobre (Cu) (mg/L)	0.0019	<0.0010	<0.0010	---	---	<0.0010	---	---	---	---	0.0056
Plomo (Pb) (mg/L)	0.0089	0.005	<0.005	---	---	0.0165	---	---	---	---	0.0080
Zinc (Zn) (mg/L)	0.0473	0.0085	0.0064	---	---	0.0083	---	---	---	---	0.0153
Semana N°											
Parámetros	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
pH	7.18	8.3	7.71	7.88	8.15	8.14	7.42	7.56	7.59	7.66	
Conductividad (uS/cm)	133	129	124	121	131	116	123	122	116	119	
Acidez (mg CaCO3/L)	1	<1	<1	1	1	1	<1	1	2	2	
Alcalinidad total (mg CaCO3/L)	35	40	38	37	44	35	35	37	39	43	
Peso de Líquido (g)	880	880	870	900	890	910	880	900	910	870	
Sulfato (SO4) (mg/L)	25	20	21	25	22	16	19	16	17	18	
Sulfato (SO4) (mg)	22.0	17.6	18.3	22.5	19.6	14.6	16.7	14.40	15.5	15.7	
Sulfato Acumulado (mg)	429.9	447.5	465.8	488.3	507.9	522.5	539.2	553.6	569.1	584.8	
Arsénico (As) (mg/L)	---	---	---	---	0.196	---	---	---	---	0.193	
Cobre (Cu) (mg/L)	---	---	---	---	0.0137	---	---	---	---	0.0069	
Plomo (Pb) (mg/L)	---	---	---	---	0.0012	---	---	---	---	<0.0010	
Zinc (Zn) (mg/L)	---	---	---	---	0.0106	---	---	---	---	0.0160	

Tabla N° 9 – Resultados del Análisis del Extracto de la Celda de Humedad de la muestra **Magistral 003**

Semana N°											
Parámetros	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pH	7.19	6.87	7.57	7.98	7.92	7.43	7.49	7.93	7.69	7.85	7.3
Conductividad (uS/cm)	526	229	209	172	154	128	129	119	121	118	113
Acidez (mg CaCO3/L)	4	8	3	2	2	2	2	1	1	2	2
Alcalinidad total (mg CaCO3/L)	41	20	31	31	35	28	31	29	32	34	31
Peso de Líquido (g)	820	976	933	900	950	930	950	940	930	940	910
Sulfato (SO4) (mg/L)	130	71	61	46	27	25	23	20	21	22	20
Sulfato (SO4) (mg)	106.6	69.3	56.9	41.4	25.7	23.3	21.9	18.8	19.5	20.7	18.2
Sulfato Acumulado (mg)	106.6	175.9	232.8	274.2	299.9	323.1	345.0	363.8	383.3	404.0	422.2
Arsénico (As) (mg/L)	0.0139	0.0281	0.0239	---	---	0.0199	---	---	---	---	0.0172
Cobre (Cu) (mg/L)	0.0049	0.0038	0.0024	---	---	0.0026	---	---	---	---	0.0058
Plomo (Pb) (mg/L)	0.0016	0.0012	<0.0010	---	---	0.0017	---	---	---	---	<0.0010
Zinc (Zn) (mg/L)	0.025	0.0085	0.006	---	---	0.0051	---	---	---	---	0.0091
Semana N°											
Parámetros	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
pH	7.27	8.06	7.68	7.62	7.96	8.09	7.44	7.27	7.28	7.41	
Conductividad (uS/cm)	113	111	109	109	106	109	112	108	108	109	
Acidez (mg CaCO3/L)	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	
Alcalinidad total (mg CaCO3/L)	33	34	36	37	34	36	32	35	35	35	
Peso de Líquido (g)	920	910	930	930	930	910	930	940	940	930	
Sulfato (SO4) (mg/L)	21	15	14	16	16	13	17	14	15	15	
Sulfato (SO4) (mg)	19.3	13.7	13.0	14.9	14.9	11.8	15.8	13.6	14.1	14.0	
Sulfato Acumulado (mg)	441.5	455.1	468.2	483.0	497.9	509.7	525.5	538.7	552.8	566.8	
Arsénico (As) (mg/L)	---	---	---	---	0.0121	---	---	---	---	0.0119	
Cobre (Cu) (mg/L)	---	---	---	---	0.0074	---	---	---	---	0.0039	
Plomo (Pb) (mg/L)	---	---	---	---	<0.0010	---	---	---	---	<0.0010	
Zinc (Zn) (mg/L)	---	---	---	---	0.0107	---	---	---	---	0.0079	

Gráficos de los resultados obtenidos Muestra MAGISTRAL-001

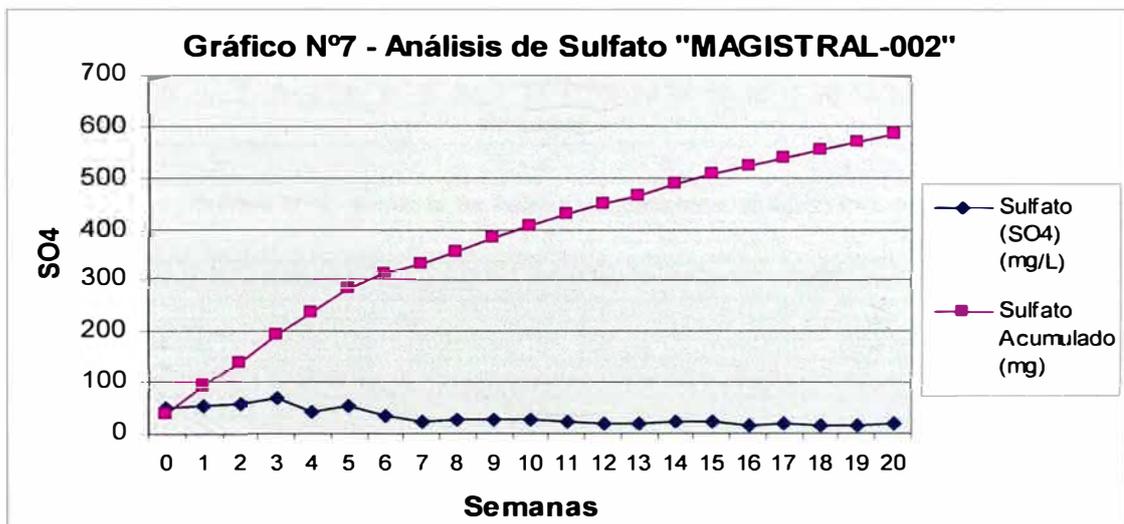


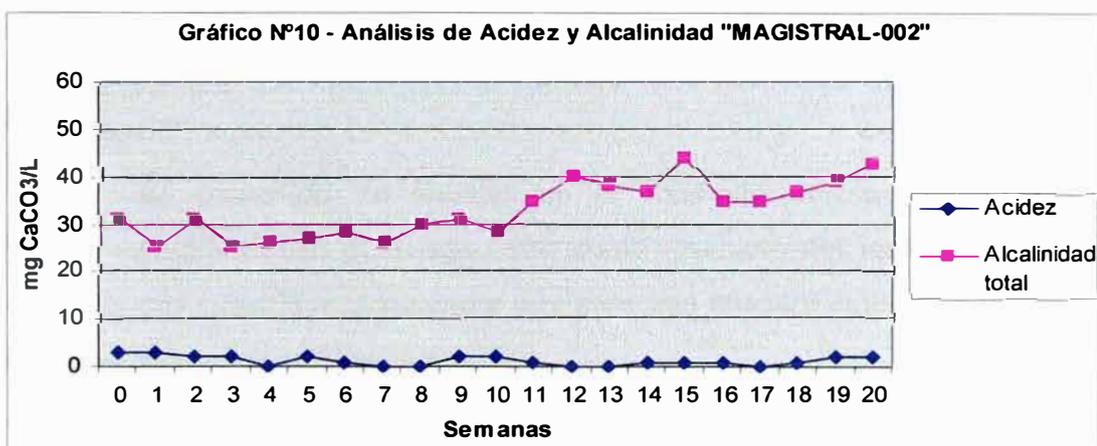
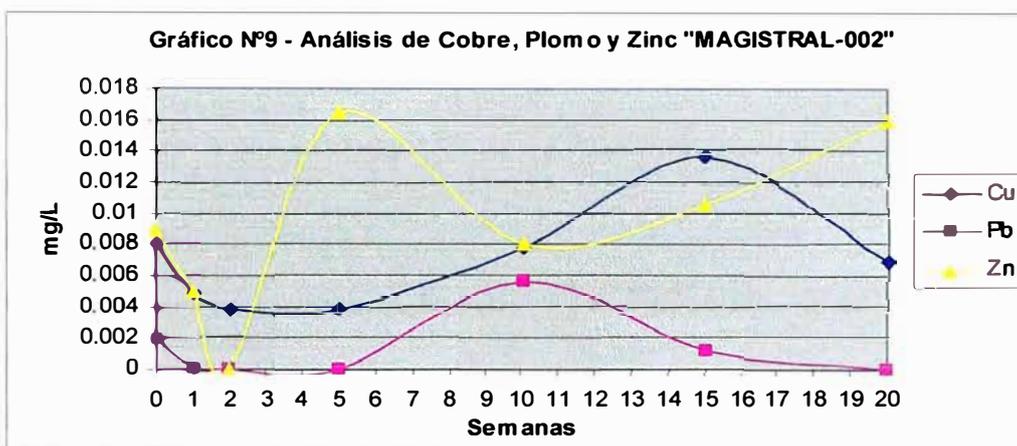
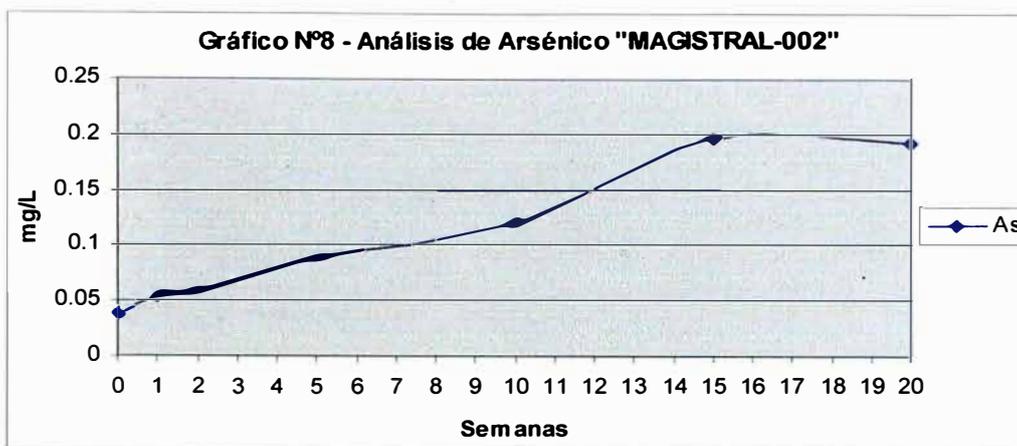


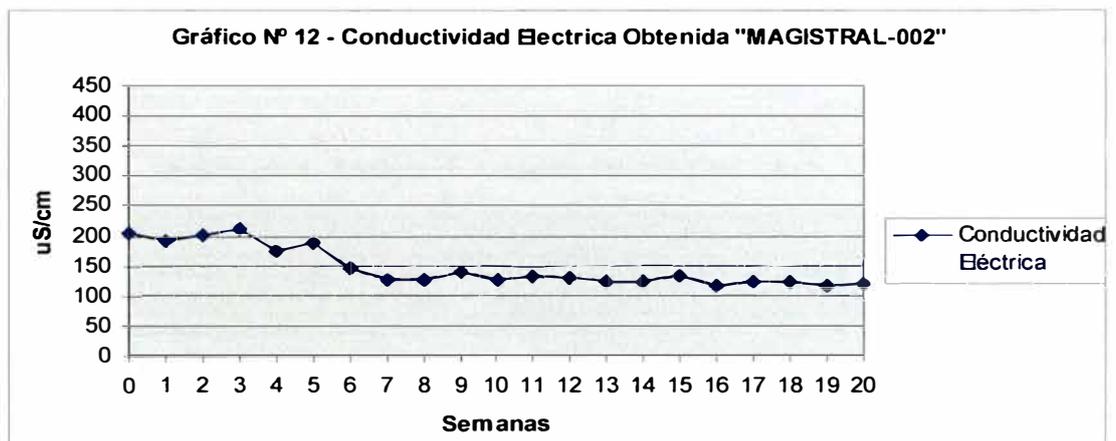
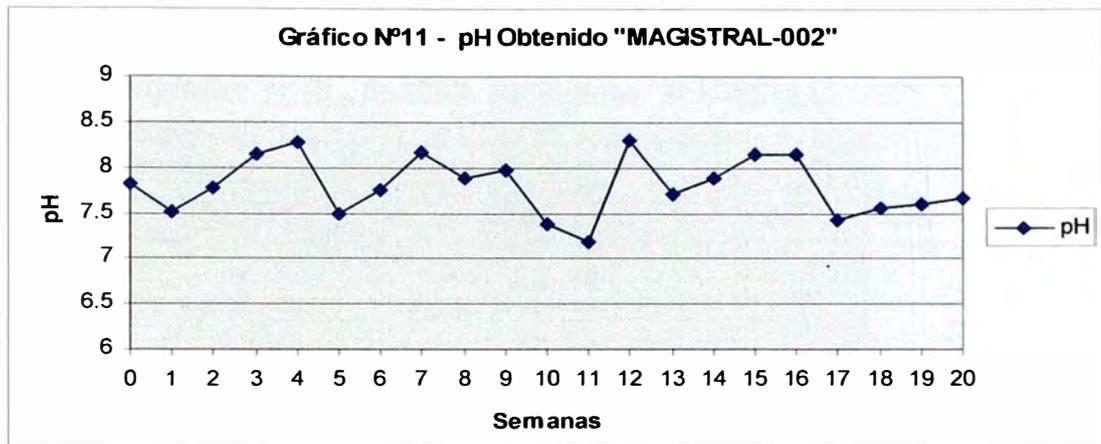
De los gráficos obtenidos para la muestra **MAGISTRAL-001** se observa lo siguiente:

- Se obtuvo un contenido de metales y demás analitos mayor en las primeras semanas. Esto podemos atribuirlo a compuestos fácilmente solubles en el corto plazo y no dependientes del proceso de intemperismo aplicado en las celdas de humedad.
- Se comprueba que la alcalinidad en el lixiviado es mayor que la acidez en el transcurso del tiempo del ensayo, además el pH se mantiene por encima de 7 y debajo de 8.5 lo que confirma el carácter básico de la muestra.

Gráficos de los resultados obtenidos Muestra MAGISTRAL-002



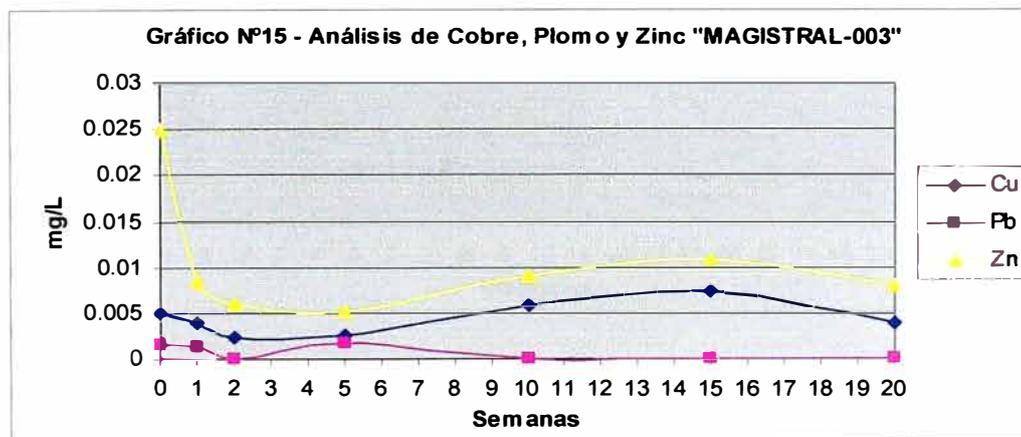
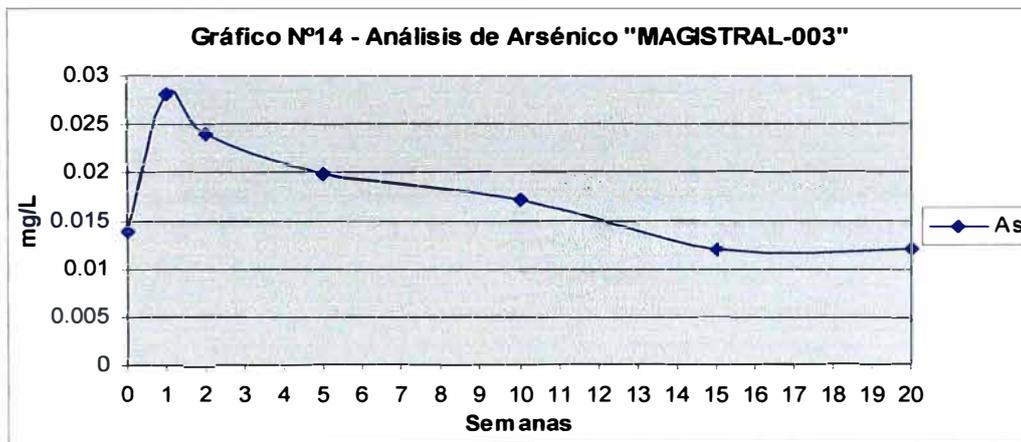
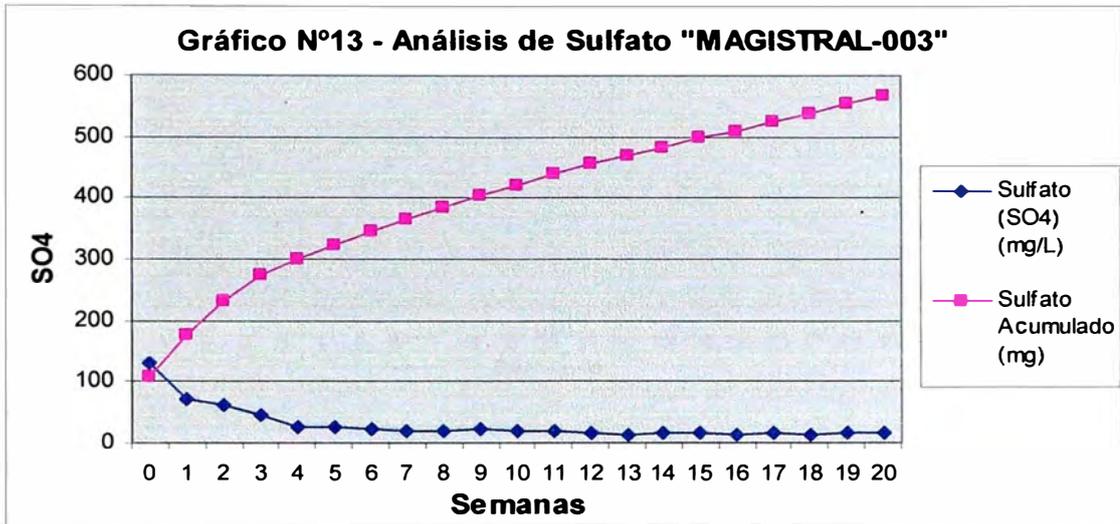


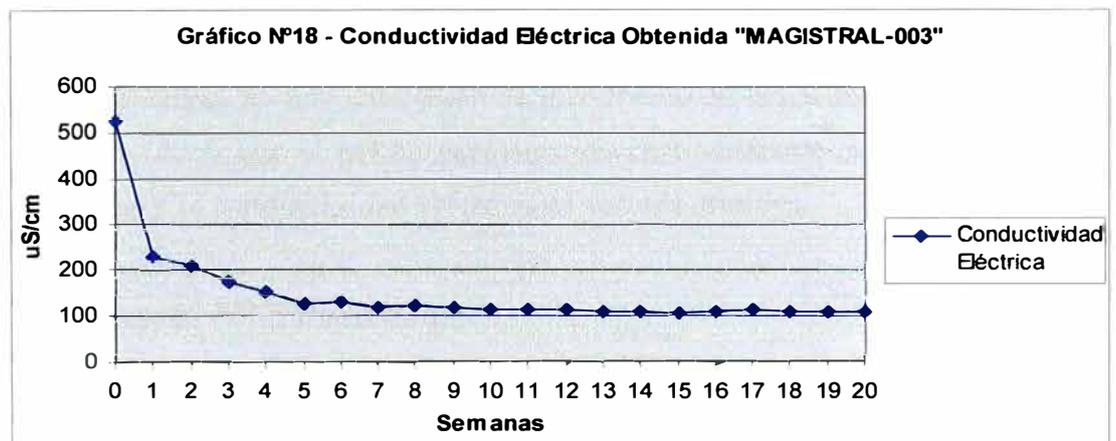
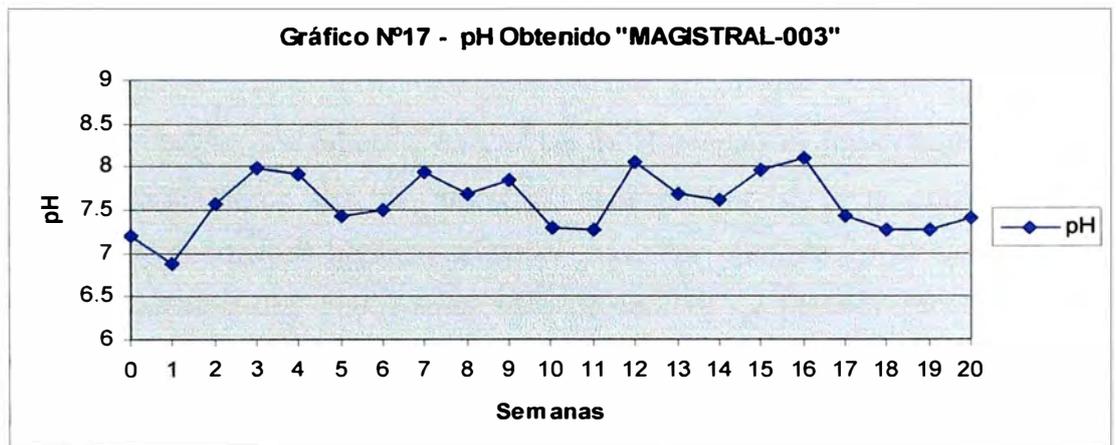
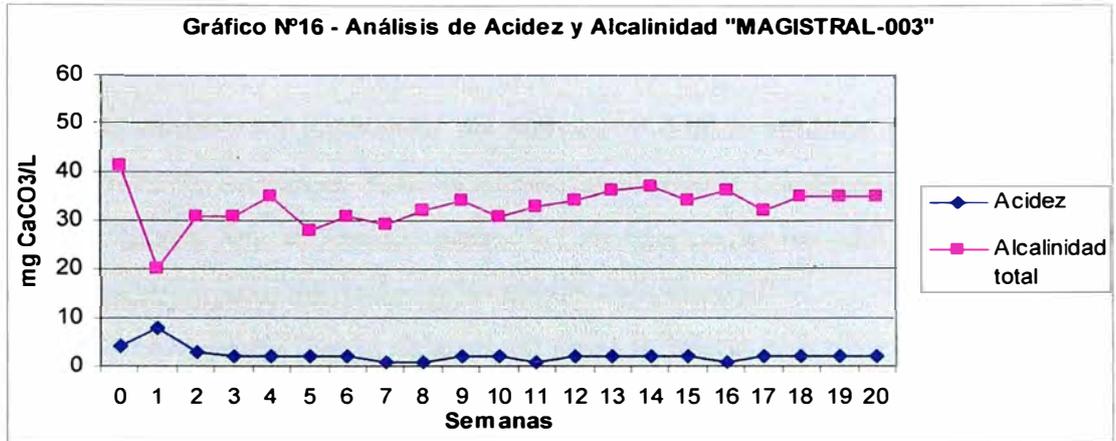


De los gráficos obtenidos para la muestra **MAGISTRAL-002** se observa lo siguiente:

- El contenido de metales en el lixiviado muestra una tendencia creciente con el tiempo, esto como producto del intemperismo, esto nos llevaría a recomendar que para esta muestra el análisis de metales se realice semanalmente.
- Se comprueba que la alcalinidad en el lixiviado es mayor que la acidez en el transcurso del tiempo del ensayo, además el pH se mantiene por encima de 7 y debajo de 8.5 lo que confirma el carácter básico de la muestra.

Gráficos de los resultados obtenidos Muestra MAGISTRAL-003





De los gráficos obtenidos para la muestra **MAGISTRAL-003** se observa lo siguiente:

- Se obtuvo un contenido de metales y demás analitos mayor en las primeras semanas. Esto podemos atribuirlo a compuestos fácilmente solubles en el corto plazo y no dependientes del proceso de intemperismo aplicado en las celdas de humedad.
- Se comprueba que la alcalinidad en el lixiviado es mayor que la acidez en el transcurso del tiempo del ensayo, además el pH se mantiene por encima de 6.5 y debajo de 8.5 lo que confirma que el drenaje de la muestra no es ácido.

Antes de culminar los ensayos en Celdas de Humedad es importante revisar los comportamientos de las muestras para decidir si sería conveniente seguir las operando por algunas semanas más. Por ejemplo en el caso de la muestra Magistral-002 cuyos resultados de análisis de metales generan para algunos metales curvas de tendencia creciente, puede mantenerse la celda para verificar si la tendencia continúa.

Por otro lado durante el transcurso del ensayo no se ha evidenciado la generación ácida, no hay indicación de incremento en la producción de sulfato y se puede decir que el pH ha permanecido casi constante en el rango de la neutralidad y la conductividad eléctrica en valores estables.

3.3.2 Proyecto N° 2 Purísima

Ubicación Geográfica

Se encuentra al NW del cerro Conchudo, en los parajes de las pampas de Génova, en el distrito Bella Unión, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa. Se encuentra a altitudes de entre 1,500 y 1,725 msnm.

El territorio que ocupa hace un total de 1,513 Hectáreas, entre 513 concesionadas y 1,000 de peticitorio.

Figura N° 9 – Mapa de Ubicación del Proyecto Purísima



Información del Proyecto

El distrito minero de Acarí tiene un potencial cuprífero interesante, destacando el área reconocida, la veta Cuchilla 1. Se ha estimado un potencial de 345,000 TM, que proyectaría posibles recursos de hasta 115,000 TM. La ley estimada promedio para planta sería mayor de 4% Cu para los óxidos y sulfuros secundarios (sector mixto) y 3-4% para el mineral primario.

Se realizaron ensayos estáticos (ABA) y de lixiviación (SPLP) de muestras de rocas de desmonte tomadas en Acarí en Junio del 2006, de la zona del proyecto minero Purísima de Minera Huallanca en el departamento de Arequipa. Los ensayos se encargaron a un laboratorio acreditado. Los resultados que se

presentan a continuación son tomados en presente informe para realizar el análisis interpretativo.

Ensayos ABA

Las muestras fueron analizadas en el mes de Julio del 2006 y la referencia utilizada en el laboratorio es:

Sobek, AA, Schuller,WA, Freeman, JR and Smith, RM -1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils, EPA 600/2-78-054, 203 pp.

Tabla N° 10 - Resultados del Ensayo ABA, Proyecto Purísima

Identificación de la muestra		PURISIMA-001	PURISIMA-002	PURISIMA-003	PURISIMA-004
Matriz		Roca de desmonte	Roca de desmonte	Roca de desmonte	Roca de desmonte
MPA	tCaCO3/1000t	120.0	1.6	2.5	4.4
NP	tCaCO3/1000t	13	15	92	19
NNP	tCaCO3/1000t	-107	13.4	89.5	14.6
pH-Pasta		5.9	8.1	8.1	8.0
NP/MPA		0.11	9.38	36.80	4.32
Sulfato HCL	% S	0.44	0.03	0.05	0.12
Sulfato Na2CO3	% S	0.43	0.03	0.05	0.11
Sulfuro	% S	3.41	0.02	0.03	0.03
Azufre Total	% S	3.84	0.05	0.08	0.14

De acuerdo a los criterios sugeridos para la interpretación de esta prueba estática puedo afirmar lo siguiente:

- La muestra PURISIMA 001 al tener NNP menor de -5 sería considerada potencialmente tóxica, y puede generar acidez significativa.
- La muestra PURISIMA 003 al tener NNP mayor de 30 produciría drenaje alcalino, es una fuente significativa de alcalinidad.

- Las muestras PURISIMA 002 y PURISIMA 004 al tener NNP entre -20 y +20 podemos decir que se encuentran en el rango de incertidumbre, sin embargo al revisar los valores de NP/MPA mayores de 2 pueden ser consideradas como consumidoras de ácido.

Ensayos SPLP

Para verificar el contenido de metales fácilmente solubles de estas muestras fueron sometidas a la prueba estándar SPLP según la norma EPA 1312, dado que la zona en la que permanecen no es altamente industrializada se decidió utilizar el líquido de extracción con pH 5. Los metales del extracto filtrado fueron analizado por ICP-OES, pero el mercurio es analizado por absorción atómica con la técnica de vapor frío.

Adicionalmente se analizaron las muestras de roca por ICP-OES y el mercurio por absorción atómica con vapor frío para tener una referencia de su contenido de metales.

Tabla N° 11 - Resultados del Ensayo SPLP, Proyecto Purísima

Identificación de la muestra		PURISIMA-001	PURISIMA-002	PURISIMA-003	PURISIMA-004
Matriz		Roca de desmonte	Roca de desmonte	Roca de desmonte	Roca de desmonte
% Humedad		0.78	2.76	2.05	5.70
Metales Totales					
Antimonio (Sb)	mg/Kg seco	<40	<20	<20	<20
Arsénico (As)	mg/Kg seco	270	880	400	170
Bario (Ba)	mg/Kg seco	6.4	66.3	125	196
Berilio (Be)	mg/Kg seco	<1.0	0.58	1.95	2.47
Cadmio (Cd)	mg/Kg seco	<4.0	<2.0	<2.0	<2.0
Cromo (Cr)	mg/Kg seco	<4.0	8.6	<2.0	2.8
Plomo (Pb)	mg/Kg seco	<100	448	361	103
Mercurio (Hg)	mg/Kg seco	0.0369	0.0644	0.0179	0.0143
Niquel (Ni)	mg/Kg seco	62	9.0	6.1	9.1
Selenio (Se)	mg/Kg seco	<100	<50	<50	<50

Plata (Ag)	mg/Kg seco	<4.0	<2.0	<2.0	14
Talio (Tl)	mg/Kg seco	<100	<50	<50	<50
Metales Extractables					
Antimonio (Sb)	mg/L	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
Arsénico (As)	mg/L	<0.20	<0.20	<0.20	0.34
Bario (Ba)	mg/L	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50
Berilio (Be)	mg/L	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Cadmio (Cd)	mg/L	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
Cromo (Cr)	mg/L	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050
Plomo (Pb)	mg/L	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050
Mercurio (Hg)	mg/L	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010
Niquel (Ni)	mg/L	0.108	<0.050	<0.050	<0.050
Selenio (Se)	mg/L	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
Plata (Ag)	mg/L	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050
Talio (Tl)	mg/L	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20

Se puede afirmar que el contenido de metales en las muestras no fueron fácilmente lixiviables ya que el análisis de metales extractables arroja resultados por debajo de los límites de detección del ICP-OES aplicado. Esto permite afirmar que el potencial de movilidad de los metales de estas muestras de rocas no generará efectos inmediatos.

Por otro lado al revisar los resultados del ensayo ABA se puede afirmar que es recomendable someter a la muestra PURISIMA-001 a ensayos cinéticos como las celdas de humedad.

3.4 Análisis e Interpretación de Resultados.

Para poder visualizar mejor el panorama que nos entrega los resultados obtenidos en cada una de las muestras analizadas a continuación un cuadro con el resumen de resultados.

Tabla N° 12 – Resumen de resultados

	Ensayos Estáticos	Ensayos de Lixiviación	Ensayos Cinéticos
Muestra	ABA	SPLP	Celdas de Humedad
MAGISTRAL-001	* No producirá drenaje ácido	---	* Extracto alcalino y con baja concentración de metales.
MAGISTRAL-002	* No producirá drenaje ácido	---	* Extracto alcalino y con baja concentración de metales.
MAGISTRAL-003	* No producirá drenaje ácido	---	* Extracto alcalino y con baja concentración de metales.
PURISIMA-001	* Generadora de acidez significativa	* Metales en el lixiviado por debajo de los límites de detección.	---
PURISIMA-002	* NNP en el rango de incertidumbre, pero NP/MPA>2	* Metales en el lixiviado por debajo de los límites de detección.	---
PURISIMA-003	* No producirá drenaje ácido	* Metales en el lixiviado por debajo de los límites de detección.	---
PURISIMA-004	* NNP en el rango de incertidumbre, pero NP/MPA>2	* Metales en el lixiviado por debajo de los límites de detección.	---

Los ensayos estáticos tomados como punto de partida para la interpretación de resultados ponen a las muestras en dos categorías definidas:

Productoras de drenaje ácido

Productoras de drenaje alcalino

Y una tercera como rango de incertidumbre.

Hasta este momento si bien es cierto puedo afirmar algo acerca de la acidez o alcalinidad del agua de drenaje según este ensayo estático, no tengo ninguna idea de las demás características de esta, en este momento puedo detenerme a revisar que otros parámetros toman relevancia en este análisis. Pues dada la naturaleza de las muestras, que han sido tomadas de botaderos los cuales están expuestos a las precipitaciones (lluvias), existe la posibilidad de que con el paso del tiempo y al contacto con el oxígeno se produzca la oxidación de los minerales presentes y a la vez la lluvia lixivie estos contenidos metálicos, haciendo que finalmente estos terminen en las aguas subterráneas.

Hay que tomar en cuenta que un ensayo de SPLP o TCLP en determinado momento puede dar como resultado un lixiviado con bajos contenidos de metales, sin embargo esto no asegura que en el transcurso del tiempo las condiciones del líquido de drenaje de un botadero por ejemplo no puedan cambiar ya que si hay una potencialidad de producir en algún momento acidez, esta misma facilitará la disolución de los metales.

Dado que no puedo afirmar en que momento un residuo que ha venido produciendo un drenaje alcalino va a cambiar y como se producirá este cambio, considero como alternativa la aplicación de los ensayos cinéticos para simular el paso del tiempo y analizar el contenido del líquido de drenaje semanalmente. Las gráficas en este caso mostraron condiciones iniciales (semana 0, 1) con contenidos mas altos y luego tendencias a permanecer estables casi en su totalidad, pero un estudio mas prolongado puede ser necesario dependiendo de cada muestra, para poder observar el cambio hacia la producción de acidez.

Y es aquí que comienza un nuevo reto, el cual es encontrar una equivalencia que permita hacer el paralelo entre el momento de cambio en las condiciones de

laboratorio y el momento en que este se dará en el campo. Cabe mencionar que en cada caso las condiciones de campo pueden ser diferentes, lo que hace que este estudio se vuelva muy particular.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La prueba estática ABA nos da el balance entre los materiales potencialmente generadores de ácido y aquellos consumidores, sin embargo el resultado de este balance NNP que predice las condiciones y calidad del agua de drenaje no se comprueban tan sencillamente debido a que la velocidad de generación y consumo de la acidez varían con el tiempo.
- Las pruebas de lixiviación de corto plazo sirven para conocer los compuestos fácilmente solubles en el corto plazo, sin embargo esta cuantificación es importante al inicio de pruebas cinéticas ya que los primeros lavados en las celdas de humedad pueden estar movilizandando la carga inicial de la muestra independientemente de cualquier generación de ácido que pudiera ocurrir por el intemperismo aplicado.
- Las pruebas cinéticas nos ayudan a confirmar el potencial de generación de ácido y predecir la calidad de agua de drenaje con el tiempo, sin embargo las condiciones de intemperismo aplicadas, no siempre serán semejantes con las existentes en el campo mismo, mas bien son condiciones controladas de laboratorio, que se rigen a la norma o estándar aplicado.
- Cada una de las pruebas examinadas no se excluyen una a las otras sino mas bien pueden ser aplicables en las diversas etapas de un programa de predicción y evaluación, midiendo no solo la magnitud de la movilidad de productos fácilmente

solubilizables sino también el potencial y la velocidad futura de contaminación que puede ser causada por botaderos, relaves u otros productos de la actividad minera.

- La preocupación por las descargas de contaminantes a cuerpos receptores (agua y aire) se manifiesta y entiende ya casi en todos los niveles de manera bastante aceptable, sociedad y estado están tomando acciones, sin embargo existe el problema del drenaje ácido cuyos estragos son fatales para la vida acuática y las poblaciones. Un problema que se comienza a manifestar después de muchos años pero para el cual es necesario aplicar medidas al inicio, es decir cada vez que una actividad va a iniciar.

5. BIBLIOGRAFIA

- Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Modified Humidity Cell, ASTM D 5744-96 (Reapproved 2001).
- Toxicity Characteristic Leaching Procedure, EPA Method 1311, Revision 0, July 1992.
- Synthetic Precipitation Leaching Procedure, EPA Method 1312, Revision 0, September 1994.
- Sobek A.A., Schuller W.A., Freeman J.R. and Smith R.M. 1978, Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils, EPA Method 600/2-78-054, 203 pp.
- Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas, Ministerio de Energía y Minas del Perú, 1995.
- Guía Ambiental para la Elaboración de Planes de Cierre de Mina (2005), Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2005.
- Perello, J. (2001) The Magistral porphyry - skarn Cu-Mo deposit, Ancash, Peru.
- II Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores, ProExplo 2001, Instituto de Ingenieros de Minas y Petróleo, CD-ROM, 3 p.

- Instituto de Ingenieros de Minas del Perú (2001) Minería, 288, p. 14. Wilson, J. et al. (1967) Geología de los cuadrángulos de Pallasca, Tayabamba, Corongo, Pomabamba, Carhuaz y Huari. INGEMMET, Carta Geológica Nacional, revisión 1995, Serie A, 64 p.
- Inductively Coupled Plasma. ICP newsletter published since 1975.
- Larry Canter, Manual de Evaluación de Impacto Ambiental, impreso en 1998, Ed. Mc. Graw Hill, 2da edición.

6. APENDICE

6.1 Agua Subterránea

Los aspectos de la cantidad y calidad del agua subterránea están relacionados con su utilización y las posibles fuentes de contaminación de estas. Una de las fuentes de contaminación de las aguas subterráneas son los depósitos de residuos procedentes de la actividad minera.

A continuación se muestran un gráfico que muestra el trayecto de los contaminantes hacia el agua subterránea.

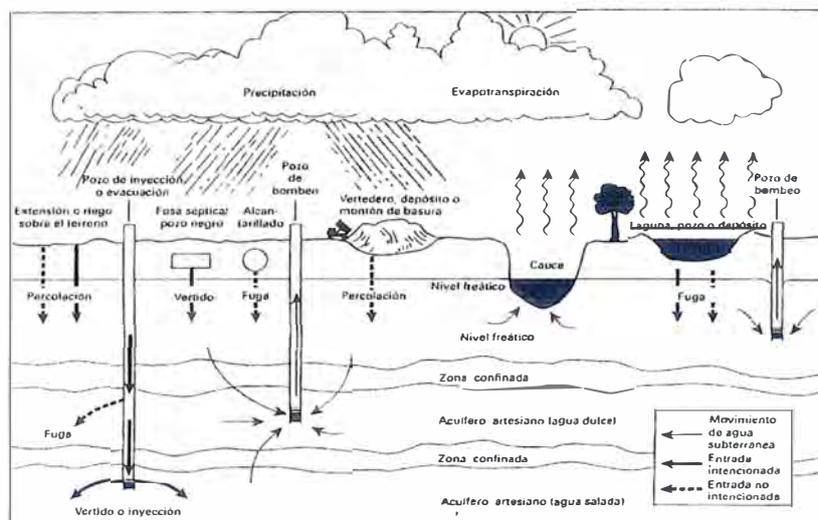


Figura Nº 10 – Ejemplos de Fuentes de Contaminación de Agua Subterránea (Franck y Brownstone, 1992)

6.2 Suelos contaminados

Una ruta de exposición del hombre a los contaminantes del suelo o residuos sólidos es el consumo de agua de bebida contaminada por los lixiviados del suelo contaminado o residuos sólidos; de forma similar la vida acuática se ve afectada por la exposición a estos lixiviados, ya que estos entran finalmente en un curso de aguas subterránea o superficial.

En el Perú hemos tenido un avance con respecto a legislación medioambiental que contempla la calidad del agua y aire, sin embargo aún no se ha establecido reglamentación para la determinación de suelos contaminados. En países como Estados Unidos, Canadá y otros del continente Europeo se ha establecido la concentración necesaria de contaminantes en suelos para asegurar que estos no están contaminados o se ha conseguido la eliminación de los contaminantes.

A continuación se muestra una tabla que refleja los objetivos medioambientales para la concentración de metales pesados en residuos sólidos y suelos establecida como promedio en Estados Unidos.

Se debe tomar en cuenta lo siguiente, debido a la atención prestada a la recuperación de suelos contaminados, se estableció la concentración necesaria de contaminante para asegurar que se ha conseguido su eliminación, se establecieron como niveles promedio MEG a ser utilizados en Estados Unidos (Fitchko, 1989). Los MEG para vertidos (DMEG) representan la concentración máxima aproximada de las emisiones que se dirigen al agua, atmósfera o suelo (a través de los residuos sólidos) que serían tolerables para exposiciones a corto plazo. Los MEG para el ambiente terrestre (expresados en miligramos por kilogramo) se basan en un sencillo modelo de lixiviado para residuos sólidos (en este caso se utiliza DMEG) y para suelo contaminado (en este caso se utiliza AMEG).

Tabla N° 13 – Objetivos Medioambientales promedio en EEUU

Metales pesados	Residuos sólidos (DMEG) Concentración en mg/Kg	Suelo (AMEG) Concentración en mg/Kg
Antimonio	620	8
Bario	180	100
Berilio	5.4	2.2
Boro	220	---
Cadmio	0.30	0.08
Cerio	2100	---
Cesio	2200	---
Cromo	44	10
Cobalto	130	10
Cobre	2.4	2.0
Oro	20	---
Hierro	1000	---
Lantano	3200	---
Plomo	0.76	---
Litio	75	15
Manganeso	104	4.0
Molibdeno	940	2.0
Níquel	56	0.4
Rubidio	280	---
Plata	0.12	---
Estroncio	2	---
Talio	40	---
Torio	2200	---
Estaño	120	---
Titanio	170	---
Tungsteno	2200	---
Uranio	56	20
Vanadio	20	15
Zinc	20	4.0

Fuente: Adaptado a partir de los datos de Fitchko, 1989, paginas 2.5a-2.5d

6.3 Niveles Máximos Permisibles (NMP) para Efluentes de Actividades Minero Metalúrgicas

Tabla N° 14 – R.M. N° 011-96-EM/VMM

Parámetro Contaminante	Primer Nivel		Nivel Final	
	Valor en cualquier momento	Valor promedio anual	Valor en cualquier momento	Valor promedio anual
pH	5.5 – 10.5	5.5 – 10.5	6.0 – 9.0	6.0 – 9.0
Sólidos suspendidos (mg/L)	100	50	50	25
Plomo (mg/L)	1	0.5	0.4	0.2
Cobre (mg/L)	2	1	1	0.3
Zinc (mg/L)	6	3	3	1
Fierro (mg/L)	5	2	2	1
Arsénico (mg/L)	1	0.5	1	0.5
Cianuro total (mg/L)	2	1	1	1