

ANEXO MINA V
GEOQUIMICA DE ROCAS DE MINA Y RELAVES

RESUMEN EJECUTIVO

Antamina es un extenso depósito de tipo skarn de Cu-Zn (500 millones de toneladas con una ley de corte equivalente a 0.7% de Cu) ubicado al este de la Cordillera Blanca de los Andes en el centro del Perú. En la preparación para la explotación de la mina, se han efectuado amplias investigaciones para evaluar el drenaje ácido de roca (DAR) y el potencial de lixiviación de metales en el yacimiento Antamina. En un inicio, el programa de evaluación DAR enfocó principalmente las características de los desechos mineros. Con el objetivo de cubrir las necesidades del plan de explotación de la mina que evoluciona rápidamente, se ha revisado constantemente el alcance del programa para incorporar trabajos de pruebas adicionales de manera que se ayude en la evaluación de potenciales impactos ambientales. Este informe presenta los hallazgos del trabajo hasta noviembre de 1997, para predecir la estabilidad química a largo plazo de los desechos de la mina.

En base a los estudios reportados sobre impactos ambientales de depósitos de tipo skarn, se anticipa que el Proyecto Antamina no generará mucho DAR ni causará una contaminación significativa con metal en las aguas. Esto es en parte sustentado por las excelentes condiciones ambientales de línea de base que prevalecen en el lugar a pesar de que las actividades mineras y de exploración previas han expuesto materiales ricos en sulfuro a la intemperie. Para dilucidar más detalladamente una posible formación de DAR y lixiviación de metales asociado con el Proyecto minero en perspectiva, se han recogido 242 muestras sometidas a varias pruebas. Esto incluye análisis de elementos principales y de traza, pruebas de mineralogía y petrografía, balance ácido-base (BAB) y pruebas de generación neta de ácidos (GNA), pruebas cinéticas de GNA y en celdas húmedas, pruebas de lixiviación y modelaje geoquímico. Para facilitar la predicción cuando sólo se encuentran disponibles datos limitados, se han derivado indicadores sustitutos de DAR teniendo como base relaciones establecidas entre el BAB y las características geoquímicas de la serie de muestras analizadas en forma completa.

En base a los resultados de la prueba estática geoquímica, la caliza, el mármol y la mayor parte de skarn verde granate, entre los seis tipos más importantes de desechos, son no generadores de ácido. Gran parte del skarn marrón granate y material de cubierta son generadores potenciales de ácido, mientras que más de la mitad de las rocas intrusivas monzoníticas presentan un incierto potencial para generar ácidos. El grueso de los relaves de la vida de la mina son también potenciales generadores de ácidos. Además de los minerales carbonatos, calc-silicatos como volastonita, diópsido y en un menor grado el granate, también contribuyen a la neutralización de ácidos en los desechos de la mina. Los carbonatos que contienen hierro tales como siderita y ankerita, por otro lado, son componentes de menor importancia.

Los resultados de las pruebas cinéticas indican que los desechos con 0.4 a 6% de sulfuro-S y relaves con aproximadamente 5% de sulfuro-S presentan un extenso intervalo de retardo para la generación neta de ácidos (29 a 102 años dependiendo de

la capacidad de neutralización de ácidos). Los relaves de mineral típico de Cu con 0.6% de sulfuro-S quizás nunca generarán ácido mientras que los de mineral de Cu-Zn con 10% de sulfuro-S quizás generarán DAR en 9 años. A pesar del intervalo de retardo en la generación neta de ácido, la lixiviación a diferente grado de elementos móviles como Mn, Mo y Zn es evidente. El hecho de que los metales puedan o no llegar a ser de interés ambiental dependerá mayormente del transporte de agua disponible y del volumen de dilución disponible en los cursos de agua receptores.

Correlacionando las características BAB de una muestra con sus constituyentes geoquímicos, se halla que la relación Fe/Ca por peso es un indicador sustituto funcional del potencial DAR para materiales geológicos de Antamina. Cualquier muestra con una relación de peso Fe/Ca mayor que 0.7 puede clasificarse como potencial generador de ácido y la que presente una relación menor que 0.7 puede considerarse como no generador de ácidos.

En la preparación para la operación de la mina, los trabajos futuros recomendados para complementar la evaluación realizada hasta la fecha incluyen lo siguiente:

- ▣ investigación de campo y laboratorio para cuantificar la lixiviación potencial de metales en caliza que contenga sulfuro;
- ▣ diseño y ejecución de un programa detallado de campo para evaluar la lixiviación de metales en las paredes del tajo abierto de Antamina y la química del agua del eventual lago del tajo;
- ▣ los trabajos de pruebas cinéticas adicionales con relaves ricos en sulfuro para definir el contenido de sulfuro crítico para la generación DAR y validar las predicciones basadas en pruebas cinéticas de GNA; y,
- ▣ derivación, donde sea posible, de indicadores de lixiviación potencial de metales y compilación de indicadores de campo para la generación de ácido con el objetivo de facilitar el manejo de los desechos mineros durante la operación.

INDICE

	Página
RESUMEN EJECUTIVO	I
V. DAR Y POTENCIAL DE LIXIVIACION DE METALES	V-1
V.1. Introducción.....	V-1
V.1.1. Reseña General y Geología del Yacimiento Antamina	V-2
V.1.2. Trabajo Previo	V-3
V.2. Reconocimiento de Campo	V-3
V.2.1. Observaciones.....	V-4
V.2.2. Comparación con Depósitos Similares.....	V-5
V.3. Muestreo - Filosofía y Objetivos.....	V-6
V.3.1. Conjunto de Muestras de Antamina para la Evaluación del DAR.....	V-6
V.3.2. Representación del Conjunto de Muestras	V-8
V.4. Analisis.....	V-8
V.4.1. Geoquímica de Elementos Principales y Trazas.....	V-9
V.4.2. Mineralogía y Petrografía	V-11
V.4.3. Pruebas Estáticas para la Predicción de Drenaje Acido de Roca (DAR).....	V-12
V.4.4. Pruebas Cinéticas para la Predicción de DAR.....	V-28
V.4.5. Pruebas de Lixiviación	V-37
V.4.6. Modelaje Geoquímico	V-39
V.4.7. Derivación de Indicadores Substitutos del DAR y Potencial de Lixiviación de Metales	V-41
V.5. Análisis.....	V-46
V.5.1. Reactividad de los Potenciales Desechos Propuestos de Antamina	V-46
V.5.2. Consideraciones para el Manejo de Desechos.....	V-49
V.5.3. Trabajos Posteriores Recomendados	V-50
V.6. Conclusiones	V-52
REFERENCIAS.....	V-55

TABLAS

Tabla V-1 Número y Variedad de Análisis Aplicados a los Principales Grupos de Materiales	V-9
Tabla V-2 Abundancia de Metales de Potencial Interés Ambiental en los Principales Grupos de Rocas de Antamina (todas las unidades en µg/g.)	V-10
Tabla V-3 Características BAB del Material Mineral Seleccionado en Antamina..	V-15
Tabla V-4 Resumen de Estadísticas sobre las Características BAB de los Desechos de Antamina	V-17

Tabla V-5	V-17
Tabla V-6 Comparación de los Resultados de las Pruebas de GNA y ABA sobre los Relaves de Antamina	V-23
Tabla V-7 Composición y Comportamiento Previsto de Intemperización de las Muestras de Antamina Sometidas a la Prueba de Celdas Húmedas.	V-26
Tabla V-8 Intervalo de Retardo Predecido para la Formación de Neta de Acidos con Relaves Empleando la Prueba Cinética de GNA.....	V-36
Tabla V-9 Parámetros de Interés Potencial Identificado en Lixiviados de Agua Destilada.....	V-37
Tabla V-10 Comparación de Metales Lixiviables (Seleccionados) con contenido de Metal de las Muestras.	V-38

FIGURAS

Figura V-1 Variaciones de Concentraciones de Metal Base con el pH de Agua Subterránea y de Superficie en el Distrito del Nuevo Mundo, Montana, USA, rico en Skarn (según Hammarstrom y otros, 1995).....	V-6
Figura V-2 Diagrama de Acidez Potencial Máxima (APM), frente al Potencial de Neutralización (PN) para Desechos de Antamina.	V-20
Figura V-3 Diagrama de PN de Carbonato. PN de Sobek para Desechos de Antamina	V-21
Figura V-4a Cambios Temporales en la Química de Lixiviados según la Prueba de Celdas Húmedas con Intrusivos	V-30
Figura V-4b Variacion Temporal en la Química de Lixiviados segun la Prueba de Celdas Humedas con Skarns	V-31
Figura V-5 Cambios Temporales en la Química de Lixiviados según la Prueba de Celdas Húmedas con Relaves de Antamina	V-32
Figura V-6 Comparación de Generación de Acidos y Disminución de PN en la Prueba de Celdas Húmedas de los Desechos de Antamina.....	V-33
Figura V-7 Comparación de Generación Acida y Disminución de PN en la Prueba de Celdas Húmedas de los Relaves de Antamina	V-34
Figura V-8 Atenuación del Transporte Acuoso de Cu y Zn mediante Adsorción en Goetita Secundaria Calculado por el Código de Modelaje Geoquímico PHREEQC	V-41
Figura V-9 Diagrama de la Relación de Potencial de Neutralización (RPN, =PN/APM) frente a la relación de Peso de Fe/Ca para la serie de Desechos de Antamina	V-44
Figura V-10 Plot of Neutralization Potential Ratio (NPR,= NP/MPA) versus Fe/Ca Weight Ratio for the Antamina Waste Rock Suite.....	V-45
Figura VI-1 Mapa de la Geología de la Propiedad Antamina.....	V-54
Figura V-3.1 Localización de Muestras de la Campaña de Muestreo de Junio de 1997	V-54

ATTACHMENTS

- Attachment I Compilation of test procedures, analytical methods and original data (mainly from International Metallurgical and Environmental Inc. and their sub-consultant, Chemex Laboratory)
- Attachment II Petrographic reports (by Harris Exploration Services)
- Attachment III Geochemical modelling report
- Attachment IV Technical memorandum on zinc leaching from limestone

V. DAR Y POTENCIAL DE LIXIVIACION DE METALES

V.1. Introducción

El drenaje ácido de roca (DAR) se deriva del intemperismo natural de metales de sulfuro. Generalmente se caracteriza por un pH bajo, alta acidez y elevadas concentraciones de metales disueltos y sulfato. Una vez desarrollado, es difícil detener el DAR y el tratamiento a largo plazo puede ser muy costoso. Debido a sus efectos adversos en el ecosistema del medio ambiente receptor, el DAR es considerado como uno de los problemas ambientales más serios y costoso que enfrenta la industria metal minera en la actualidad. La mayoría de las jurisdicciones en los países desarrollados ha formulado reglamentos estableciendo que debe efectuarse una completa evaluación del DAR antes de explotar la mina, de manera que guíe la incorporación de estrategias apropiadas en el plan de explotación de la mina para prevenir, controlar y tratar el DAR, si así se requiriera.

El yacimiento Antamina es un skarn de Cu-Zn formado para reacciones metasomáticas asociadas con la intrusión de cuerpos monzoníticos en caliza. En vista de que por lo general se reconoce que los yacimientos de tipo skarn están menos sujetos a desarrollar problemas de DAR que la mayoría de los yacimientos de metales enriquecidos con mineralización de sulfuro (Kwong, 1993; Hammarstrom y otros, 1995), la lixiviación preferencial de metales puede, no obstante, ocurrir bajo condiciones casi-neutrales. Un ejemplo de mecanismos posibles involucrados es la interacción galvánica que se da en un ensamble natural de sulfuros de contacto (Kwong, 1995; Kwong y otros, 1997; Lawrence y otros, 1997). Por lo tanto, el programa de evaluación DAR de la pre-mina Antamina, enfoca tanto el potencial de varios materiales geológicos alterados para generar ácido como su susceptibilidad a la lixiviación de metales.

Este informe resume los resultados del trabajo finalizado en noviembre de 1997, para predecir la estabilidad química a largo plazo de los desechos mineros a ser generados por el proyecto minero Antamina. Los tópicos que abarca el informe son los siguientes:

- ▣ revisión de la geología del yacimiento e investigaciones ambientales previas.
- ▣ descripción del diseño de muestreo y metodología empleada para evaluar el potencial para la generación de ácido y lixiviación de metales;
- ▣ resumen de las observaciones relevantes del campo y resultados de las pruebas;
- ▣ análisis de las implicancias de los resultados de pruebas; y,

- ▣ recomendaciones para trabajos posteriores.

V.1.1. Reseña General y Geología del Yacimiento Antamina

El yacimiento Antamina está ubicado al este de la Cordillera Blanca de los Andes, en el centro del Perú, aproximadamente a 480 km al norte de Lima. El yacimiento está situado en un valle glacial típico de alrededor de 2 km de ancho y a una altitud de 4,260 m sobre el nivel del mar. El clima del área puede dividirse en dos estaciones: la estación seca que dura de abril a octubre con temperaturas de aire que fluctúan entre 0°C y 12°C y una precipitación mensual promedio de 9 mm a 166 mm; y la estación húmeda que dura de noviembre a marzo con una temperatura que varía de 3°C a 9°C y una precipitación mensual promedio de 192 a 274 mm.

Antamina es un yacimiento polimetálico de contacto metasomático en origen. La mineralización de cobre, zinc y molibdeno (\pm plata en algunos lugares), fue emplazada en una formación extensiva de tipo skarn durante la intrusión de un stock monzonítico Terciario en caliza Cretácea. Las Figuras 1-2 y 1-2 (según CS First Boston and Macroinvest, 1996) (véase informe) muestran la geología y un par de secciones transversales geológicas de la propiedad Antamina. Así, litológicamente en área del Proyecto Antamina predomina la Caliza Machay Cretácea Inferior que presenta un plegamiento anticlinal poco pronunciado que cruza en dirección NO-SE la zona mineralizada. Las intrusiones monzoníticas afloran en el valle de Antamina a lo largo de una zona en dirección N-S de aproximadamente 15 km de largo.

El yacimiento Antamina es un cuerpo de skarn claramente definido localizado en la caliza en su contacto con el stock monzonítico. El cuerpo mineral del yacimiento plano (500 millones de toneladas con una ley de corte equivalente a 0.7% de Cu) varía en espesor de 100 a > 250 m y termina abruptamente en donde prevalece el mármol. Además de los ensambles de skarn típico dominados por granate con menor diópsido, volastonita, epidota, tremolita, actinolita, clorito y otros silicatos, el proceso de mineralización ha precipitado una variedad de minerales de sulfuro incluyendo piritita, calcopirita, esfalerita, molibdenita y, menos comúnmente, pirrotita. Estos minerales de sulfuro se presentan como disseminaciones, vetas pequeñas, rellenos de fractura y lentes masivos ocasionales. Por lo general, el lugar donde ocurre la mineralización de sulfuros masivos se asocia con una prominente fractura de dirección NO-SE.

Más en detalle, la mineralización de skarn en Antamina puede dividirse en dos tipos principales. Primero, exoskarn, formado por el reemplazo de sedimentos calcáreos, se caracteriza por la presencia de un granate de color verde y el predominio de mineralización de zinc sobre mineralización de cobre. Segundo, endoskarn, formado por el reemplazo de rocas intrusivas, se caracteriza por la presencia de granate color rojizo y el predominio de mineralización de cobre. De manera local, filones y mantos de la mineralización de sulfuros con abundante esfalerita \pm galena argentífera también ocurren en la caliza que rodea el skarn. Muchas de las intrusiones monzoníticas, por

otro lado, están enriquecidas con cantidades variables de cobre y molibdeno. En vista de que se ha observado que una alteración supergénica penetra a una profundidad de más de 60 m, una zona de óxidos dominada por minerales secundarios no se encuentra bien desarrollada. Donde se observa, ésta presenta una profundidad máxima de 10 a 20 m. Los minerales supergénicos predominantes que ocurren en Antamina, incluyen limonita, hematita, malaquita y con menor frecuencia, cuprita y calcosita.

V.1.2. Trabajo Previo

Antes del inicio de la intensa exploración y actividades de explotación minera, y poco después de que la Compañía Minera Antamina S.A. optara por el yacimiento Antamina de Centromín en 1996, Klohn Crippen - SVS S.A. fue contratado para efectuar una evaluación ambiental en el lugar, en parte como inspección preliminar y en parte para ayudar a desarrollar el alcance de las investigaciones sobre el impacto ambiental y línea de base requeridas para la explotación de la mina. Como parte de la campaña, los desechos de actividades mineras previas y el agua subterránea y de superficie que drena el lugar fueron muestreados y analizados (Klohn Crippen - SVS, 1996). La mitad de las veinte muestras de desechos resultó ser material de ley mineral, ricos de manera variada en Ag, Cu, Pb y Zn. Sin embargo, se probó que sólo siete de ellos eran potenciales generadores de ácidos. Ninguna de las muestras de agua recogidas de los 10 lugares (incluyendo tres antiguas galerías de exploración) presentó un pH ácido o una concentración de sulfato de más de 170 mg/L. Con excepción del contenido de manganeso disuelto, la calidad de agua de todas las muestras cumplía los criterios para usos de agua del Perú (es decir, abastecimiento doméstico y uso en la agricultura). La mitad de las muestras (incluyendo las tres de las antiguas galerías de exploración), excedía levemente los criterios para agua potable vigentes en Perú, en el caso del manganeso (0.1mg/L).

Cinco muestras de minerales de Antamina de 1 a 7% de Cu y 0.1 a 9% de Zn fueron analizados por Minera Metall Chile S.A. en 1995 para conocer sus propiedades de balance ácido-base. Los resultados de las pruebas (suministradas por INMET Chile en diciembre de 1995) demostraron que sólo una muestra era potencial generadora de ácido, otra era no generadora de ácido y el resto presentaba un incierto potencial de generación de ácido.

Del trabajo previo de evaluación ambiental, es aparente que minerales de ganga abundantes con significativa capacidad de neutralización de ácidos se encuentran estrechamente asociados con la mineralización en Antamina. Así, a pesar de las numerosas pilas pequeñas de material rico en sulfuro que se expusieron a la intemperie como resultado de las antiguas actividades mineras, el DAR no ha ocurrido y la lixiviación de metales del lugar es baja.

V.2. Reconocimiento de Campo

Para adquirir muestras para la evaluación DAR, el personal de Klohn Crippen - SVS realizó dos visitas breves al lugar de Antamina en octubre de 1996 y junio de 1997,

respectivamente. Parte de las actividades incluyeron reconocimiento del campo para encontrar evidencias sobre generación de ácidos y lixiviación de metales. En esta sección se resume y analiza las observaciones principales.

V.2.1. Observaciones

Como resultado de antiguas actividades de exploración y minería en el área, fácilmente pueden encontrarse evidencias de intemperismo químico de materiales geológicos alterados en Antamina. La mayor parte de la evidencia obtenida a partir de los productos de oxidación observados, indican que en donde se produce generación de ácido debido a la presencia de materiales ricos en sulfuros, no se ha observado lixiviación intensiva de metales en forma difundida. Las observaciones predominantes de campo que sustentan este argumento incluyen lo siguiente:

- ▣ Acumulación local de abundantes minerales ácidos eflorescentes (melanterita, rozenita y copiapita) en afloramientos de intrusivo rico en sulfuro que se convierten en skarn marrón granate (e.g., lado occidental del Lago Antamina)
- ▣ Medidas de pH ácido (4.0 a 5.5) en charcos de agua estancada en algunas galerías de exploración antiguas (e.g., galería de exploración en el extremo occidental del Lago Antamina adyacente a un afloramiento de intrusivo y otro en el área Rosita de Oro).
- ▣ Revestimiento de fracturas con oxihidróxido de hierro en la galería de exploración de 200 m de largo excavada para extraer muestras para pruebas metalúrgicas, pero el agua infiltrante permanece casi neutra (pH de 7.2 aproximadamente, ligeramente menor que el medido típicamente en agua saturada con calcita).
- ▣ Ocurrencia diseminada de malaquita ± azurita en áreas con mineralización de cobre expuesto (e.g., afloramientos de skarn en el lado este del Lago Antamina y en el área Usu Pallares) que indican precipitación de mineral en agua rica en carbonato e inmovilización efectiva de cobre lixiviado.
- ▣ Predominio de la alteración hematítica marrón rojiza, en lugar del producto amarillento de drenaje de ácidos mineros (Murad y otros, 1994) en el material de cubierta que refleja intemperismo en condiciones casi neutras hasta condiciones ligeramente básicas (Alpers y Brimhall, 1989).
- ▣ A pesar de la ocurrencia difundida de materiales geológicos ricos en sulfuros expuestos y enterrados en el lugar, hasta la fecha no se ha

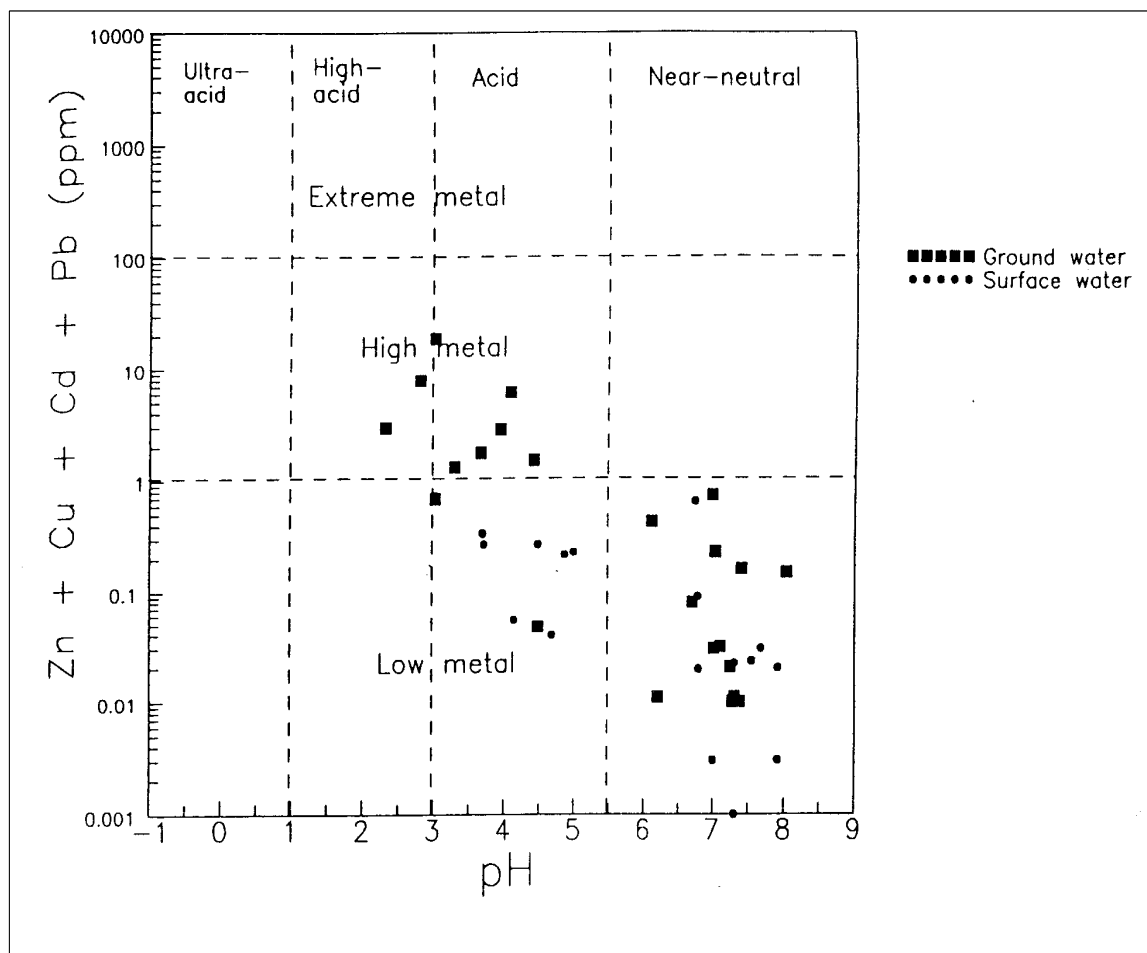
encontrado cursos de agua con pH ácido (<6.5) ni conductancia específica elevada.

V.2.2. Comparación con Depósitos Similares

Existen pocos estudios documentados sobre impactos ambientales de depósitos de tipo skarn (Hammarstrom y otros, 1995). Su rareza puede reflejar que la contaminación seria de metales no está generalmente asociada con la explotación de este tipo de mineralización. En realidad, ninguno de los 61 lugares de contaminación relacionados con la minería de la Lista de Prioridad Nacional (Superfondo) de la Agencia de Protección Ambiental (1995) de los EE.UU. es un depósito de skarn. Las pocas investigaciones ambientales reportadas sobre depósitos de skarn estaban relacionadas a los impactos por carga de sedimentos resultantes de relaves, e.g., Oki Tedi en Papua, Nueva Guinea (Salomons y Eagle, 1990) y Mina Mc Laren en el Distrito del Nuevo Mundo, Montana, USA (Meyer, 1995).

La química del agua subterránea y de superficie en el Distrito del Nuevo Mundo, Montana, que alberga abundantes depósitos de skarn rico en sulfuro similar al de Antamina, ha sido documentado por Hammarstrom y otros (1995). Su presentación gráfica de los datos disponibles se encuentra reproducido en la Figura V-1. Es evidente a partir del diagrama que las concentraciones altas de metal están estrechamente correlacionadas con un pH bajo tanto en muestras de agua subterránea como de superficie. La lixiviación de metales y el transporte acuoso de metales comunes son altamente limitados a un pH de aproximadamente 8. Por analogía, se espera que no ocurra una contaminación seria de recursos de agua con metales disueltos en el proyecto minero de Antamina, suponiendo que no se genera DAR en el proceso.

Figura V-1 Variaciones de Concentraciones de Metal Base con el pH de Agua Subterránea y de Superficie en el Distrito del Nuevo Mundo, Montana, USA, rico en Skarn (según Hammarstrom y otros, 1995)



V.3. Muestreo - Filosofía y Objetivos

El muestreo apropiado es un prerequisite para cualquier programa de evaluación ambiental. El objetivo de un programa de muestreo para la evaluación DAR es adquirir muestras representativas para pruebas detalladas de toda unidad geológica afectada por el plan de explotación de la mina. Para el propósito de la evaluación de DAR, una unidad geológica se define según el principio de la homogeneidad química y física. El objetivo del muestreo es asegurar que (a) todas las unidades geológicas se incluyan; y (b) que las muestras representen las diferentes áreas en el plan minero.

V.3.1. Conjunto de Muestras de Antamina para la Evaluación del DAR

En el yacimiento Antamina, la mayor parte de la mineralización de menas está albergada por varias fases de skarn formado entre intrusiones monzoníticas y caliza.

Los tipos de rocas más importantes a ser alterados en el proceso minero pueden agruparse como sigue:

- ☒ Materiales de cubierta;
- ☒ Rocas parcialmente oxidadas (óxidos);
- ☒ Intrusivo (Monzonita y Monzonita de Cuarzo);
- ☒ Skarn (endoskarn rico en Cu o Skarn marrón granate y exoskarn rico en Zn o skarn verde granate);
- ☒ Mármol;
- ☒ Caliza;

El personal de Klohn Crippen - SVS ha trabajado estrechamente con los geólogos de Antamina para asegurar que se tomaran muestras apropiadas para la evaluación DAR de la pre-mina. Hasta la fecha, se ha seleccionado un total de 242 muestras para varios análisis. Estas muestras incluyen lo siguiente:

- ☒ 31 muestras de mineral: 27 de tipo skarn, 2 intrusivos, 1 mármol y 1 caliza.
- ☒ 196 muestras de desechos con la siguiente distribución:

Materiales de cubierta	17
Oxidos	11
Caliza/mármol	65
Intrusivo	81
Skarn, de baja ley	22

15 muestras de relaves resultantes de pruebas metalúrgicas.

La mayoría de las muestras de desechos y mena han sido extraídas de los testigos de perforación. Cada muestra es típicamente un compuesto que representa un intervalo de 3 metros de una unidad geológica homogénea. El tamaño individual de las muestras varía de unos 0.5 hasta cerca de 12 Kg. Para asegurar una cobertura completa de todos los tipos de materiales geológicos a ser afectados en el proceso minero, un número pequeño de muestras aleatorias (17) también ha sido extraído de afloramientos de rocas en la propiedad Antamina. El tamaño de estas muestras aleatorias es generalmente de 1 a 2 Kg. De las muestras de materiales de cubierta, 9 son testigos de

perforación y 8 son compuestos de canales de depósitos de superficie. El tamaño de las muestras de compuestos de canales es generalmente de 2 a 4 Kg. Los lugares de muestreo para las muestras de compuestos de canales de material de cubierta y afloramientos se muestran en la Figura 3-1 (véase fin del informe). Los testigos de perforación muestreados (serie CMA) en junio de 1997 también se presentan. Otros testigos de perforación muestreados en octubre de 1996 y julio de 1997 se ubican en las cercanías del perímetro del Lago Antamina y de la mitad al sur del tajo abierto propuesto. Estos no se ilustran en la Figura 3-1 para evitar clasificaciones superpuestas.

V.3.2. Representación del Conjunto de Muestras

Mientras que los relaves fueron obtenidos del programa de pruebas metalúrgicas en la medida que estuvieron disponibles, las muestras de rocas fueron recogidas en 3 lotes. El primer lote de 67 muestras fue extraído en octubre de 1996, antes de que el cuerpo mineral fuera completamente delineado. El punto central del muestreo fue asegurar que todos los tipos de roca fueran examinados. El segundo lote de 40 muestras fue extraído en junio de 1997, para complementar el primer grupo de muestras y para ayudar a definir la variabilidad química en cada grupo importante de roca. El tercer lote de 121 muestras fue seleccionado en julio de 1997 por los geólogos residentes en Antamina con el propósito de representar todo tipo de desechos en el tajo final (de acuerdo con el plan de junio de 1997). En este grupo de muestras, el intrusivo está excesivamente representado en comparación con la caliza y el mármol debido a la mayor disponibilidad de muestras. Sin embargo, esta tendencia del muestreo se justifica por la gran incertidumbre respecto a la generación de ácido del intrusivo.

Entre los 15 relaves puestos a prueba, 13 se derivaron de la prueba de ciclo cerrado metalúrgico a escala piloto de las diferentes variedades de material mineral que existen en Antamina. Estos podrían no ser verdaderos representantes de la producción propuesta de relaves del Proyecto Antamina. Los dos restantes son relaves de la planta piloto que, según los metalurgistas, representan relaves típicos a ser producidos en la molienda de la mayoría de minerales de Cu y Cu-Zn del yacimiento Antamina. Trabajos de prueba adicionales con otros relaves de la planta piloto también han sido efectuados por Lakefield Research (Lakefield Research Limited, 1997).

V.4. Analisis

Con el objetivo de ayudar a predecir la estabilidad química de los desechos a producirse en el yacimiento Antamina, se sometieron muestras seleccionadas del lugar a una variedad de pruebas de laboratorio. Estas incluyen análisis de elementos principales y trazas para determinar la composición química de los desechos mineros, el análisis petrográfico para revelar la mineralogía y textura de los principales tipos de desechos, pruebas geoquímicas cinéticas y estáticas para evaluar su potencial de lixiviación de metales y de DAR y pruebas simples de lixiviación para estimar el peor grado de lixiviación de metales posible bajo diferentes condiciones. Para aumentar la

seguridad de las predicciones basadas en los resultados de las pruebas de laboratorio, se efectuó un modelaje geoquímico para asegurar que las predicciones fueran compatibles con los principios geoquímicos. Se derivaron indicadores sustitutos de DAR para permitir predicciones en ausencia de datos analíticos completos. El número y variedad de análisis aplicados a los principales tipos de desechos se resume en la Tabla V-1. Luego se presenta una descripción breve del alcance y propósito de los diferentes trabajos de prueba y los resultados obtenidos.

Tabla V-1 Número y Variedad de Análisis Aplicados a los Principales Grupos de Materiales

Tipo de Desechos	No. de Muestras	Rastreo de Metales ICP	Oxidos Principales	Petrografía	BAB	Prueba de NGA	Prueba de Humedad en Celdas	Prueba Cinética de NGA	Prueba de Lixiviación
Mineral	31	31			31				2
Roca de desmonte:									
Sobrecapa/óxidos	28	28	2	2	28				3
Intrusivos	81	81	5	5	81		2		3
Skarn	22	22	10	10	22		2		6
Caliza/mármol	65	65	3	3	65				
Relaves:									
Muestras Metcom	13	14	1	1	14	21	1	2	3
Cu de la Planta Piloto	1	8			8	8	1	8	
Cu-Zn de la Planta Piloto	1	8			8	8	1	8	

V.4.1. Geoquímica de Elementos Principales y Trazas

El propósito principal del análisis de elementos trazas por espectroscopía de plasma inductivamente acoplado (barrido de metales mediante equipo tipo ICP) a partir de la perspectiva de evaluación de DAR es identificar, si hubiera, concentraciones anómalas de metales potencialmente nocivos en los desechos mineros propuestos. El análisis por ICP ha sido realizado sobre todas las muestras. En el análisis con el equipo ICP, un peso conocido de una muestra pulverizada fue digerido toda una noche, en una mezcla de ácido nítrico-agua regia. Luego se midieron los constituyentes disueltos mediante la técnica de espectroscopía de plasma inductivamente acoplado que consistió en vaporizar el ácido lixiviado en el centro caliente de un plasma de argón (ICP-AES). Se reportó la concentración de una especie medida según el peso unitario de la muestra original y se lo comparó con su abundancia en la corteza terrestre. Se considera anómalo todo elemento que exceda diez veces a su abundancia en la corteza terrestre. Debe señalarse que los metales escondidos en fases de minerales refractarios no serán liberados mediante la técnica por el procedimiento de descomposición ni medidos mediante la técnica ICP-AES. Sin embargo, no es probable que estos metales puedan tampoco ser liberados al medio ambiente ya que la posibilidad que los

minerales emplazados puedan descomponerse bajo condiciones normales de intemperismo es menor que en la lixiviación con ácido fuerte.

Los datos del equipo para análisis para contenido de metales ICP se adjuntan en el Anexo 1. Empleando diez veces la abundancia en la corteza terrestre como criterio para identificar concentraciones metálicas anómalas, los elementos que pueden llegar a ser de interés en la excavación del yacimiento Antamina incluyen Cu, Mo, Zn y, en menor grado, As, Cd, Pb y Ni. La distribución de estos elementos en los grupos de rocas más importantes del lugar se resumen en la Tabla V-2. Ninguno de los otros elementos potencialmente nocivos como Ba, Cr, Hg, Sb, Ti, U y V se presentan en concentraciones suficientemente altas como para ocasionar preocupación ambiental. En comparación con las rocas estériles, las muestras mineralizadas de Antamina también son ricas en manganeso. La concentración de Mn más alta, sin embargo, no excede en 5 veces la abundancia en la corteza (Tabla V-2). La lixiviación de manera preferencial del Mn puede, no obstante, originar niveles ligeramente elevados de metal en el sistema de drenaje en Antamina en comparación con cursos de agua ubicados en áreas donde los niveles de manganeso que ocurren de forma natural en las rocas, son menores.

Debe señalarse que las estadísticas presentadas en la Tabla V-2 corresponden a los grupos de rocas más importantes sin considerar el contenido de metal. En otras palabras, los minerales y los desechos no se diferencian. El hecho de que las muestras del material de cubierta (incluyendo siete de los depósitos de superficie) están consistentemente enriquecidos de todos los metales, sugiere que muchos de ellos pueden en realidad ser desechos de minas dispuestos en el lugar por antiguas actividades mineras.

La composición de elementos principales de 16 muestras de desechos y mineral seleccionados y 5 muestras de compuestos empleados en la prueba de celda húmeda fue determinada mediante espectrometría fluorescente con rayos x (EFRX). Estos datos de análisis completos de rocas sirven para validar estimaciones visuales sobre abundancia de minerales en las muestras. Los datos son adjuntados en el Anexo V-I. Es de interés señalar que no todas las muestras de mármol identificadas estaban compuestas de caliza recristalizada. Algunas muestras contienen un porcentaje significativo de sílice confirmándose que la volastonita puede ser una fase mineral predominante en estas muestras.

Tabla V-2 Abundancia de Metales de Potencial Interés Ambiental en los Principales Grupos de Rocas de Antamina (todas las unidades en µg/g.)

	As	Cd	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
<i>Intrusivos (84)</i>								
Promedio	89	1	1662	231	357	70	58	393
Mediana	35	0.25	1030	125	168	7	12	49
Desviación Estándar	156	4	2102	308	885	149	180	1265
Máxima	846	29.5	12000	1730	7820	834	1195	9120
Mínima	1	0.25	10	10	0.5	0.5	1	4
<i>Skarn granate marrón (23)</i>								
Promedio	104	13	5391	731	144	134	61	4909
Mediana	16	2	4830	740	46	12	34	321
Desviación Estándar	356	22	4954	277	174	146	64	9187
Máxima	1730	72	21600	1225	738	406	254	28500
Mínima	6	0.25	42	231	3	1	6	32
<i>Skarn granate verde (31)</i>								
Promedio	77	9	6391	1137	414	122	205	3967
Mediana	34	2	6260	871	47	8	64	597
Desviación Estándar	175	27	5842	1080	1412	143	349	11476
Máxima	856	144	17800	5520	7930	394	1575	60100
Mínima	2	0.25	29	223	3	1	1	2
<i>Mármol (49)</i>								
Promedio	19	5	839	346	11	21	311	4648
Mediana	10	2	311	261	3	9	115	221
Desviación Estándar	29	9	1781	386	23	37	467	19596
Máxima	190	52	10600	2790	119	246	2380	136600
Mínima	1	0.25	7	70	0.5	0.5	1	2
<i>Caliza (21)</i>								
promedio	13	3	309	282	25	11	97	1264
Mediana	10	0.25	108	239	3	6	55.5	241
Desviación Estándar	13	7	512	221	77	11	99	2968
Máxima	55	32	2200	1190	357	37	325	13500
Mínima	1	0.25	8	95	1	0.5	4	32
<i>Sobrecapa (17)</i>								
Promedio	123	15	6533	687	209	68	445	6128
Mediana	74	3	5030	635	183	36	226	1285
Desviación Estándar	163	30	4569	288	185	73	507	13130
Máxima	710	120	13600	1325	820	194	2060	50000
Mínima	28	0.25	1025	190	20	1	70	156
<i>Total (225)</i>								
Promedio	69	5	2746	470	225	67	166	2782
Mediana	22	1	959	268	47	7	37	274
Desviación Estándar	170	16	4026	583	766	124	333	11226
Máxima	1730	144	21600	5520	7930	834	2380	136600
Mínima	1	0.25	7	10	0.5	1	1	2
<i>Abundancia en la Corteza (Levinson, 1980)</i>								
Promedio	1.8	0.2	55	950	1.5	75	12.5	70

V.4.2. Mineralogía y Petrografía

Informes petrográficos sobre 16 muestras de desechos y minerales seleccionados, así como materiales de prueba en las cinco celdas húmedas se presentan en el Anexo II.

Estas muestras incluyen sólo cuatro tipos de rocas: monzonita y monzonita cuarcífera, skarn verde granate, skarn marrón granate y mármol. Los resultados del examen petrográfico se resumen brevemente como sigue:

Las muestras de monzonita son típicamente porfirídicas con fenocristales de plagioclasa y menor cuarzo, feldespato-K y biotita incrustados en una base vidriosa del pórfido microgranular de los mismos minerales. La diferenciación entre las dos variedades de monzonita se basa principalmente en la abundancia relativa de fenocristales de cuarzo y aparentemente no es obvia de manera inmediata en una escala de sección delgada. El intrusivo típicamente contiene poco o nada de carbonato. Con algunas excepciones, es también bajo en sulfuros (aproximadamente 1% de pirita \pm calcopirita).

La mayoría de las muestras de skarn están compuestas de granate masivo con diópsido (como diseminaciones de grano fino en el granate) como mineral secundario principal. La diferenciación entre las dos variedades de skarn, que es factible en el campo, aparentemente no es evidente en una escala microscópica. Tanto los contenidos de carbonato como de sulfuro de las muestras de skarn son altamente variables. En las muestras examinadas, la mineralización asociada al skarn se distingue por una relativa abundancia de esfalerita (junto con pirita y calcopirita).

Las muestras de mármol presentadas para análisis son aparentemente monominerálicas con variedad granular de hasta calcitas minuciosamente micríticas. Algunas muestras, sin embargo, contienen sulfuros de 3-11%. En base a los resultados de pruebas geoquímicas, parte del mármol de Antamina puede contener una cantidad significativa de volastonita. Sin embargo, tales muestras pueden no haber sido incluidas en las pruebas sometidas a examen petrográfico.

Los sulfuros identificados en las muestras examinadas incluyen pirita, calcopirita, esfalerita y de vez en cuando pirrotita, molibdenita y galena. Generalmente se presentan como granos anhedrales diseminados sin orden en las diferentes matrices de rocas. En ocasiones también se observa fragmentos segregados y gruesos. Debe señalarse que la mineralización que se presenta como masas y lentes de sulfuro no ha sido incluida en la serie sometida a análisis.

V.4.3. Pruebas Estáticas para la Predicción de Drenaje Acido de Roca (DAR)

Se aplicaron dos pruebas estáticas geoquímicas para evaluar el potencial de DAR de los desechos mineros de Antamina. Todo la serie de muestras fue sometida al análisis de balance ácido-base (BAB) empleando un método modificado según Sobek y otros (1978) y las muestras de relaves también fueron sometidas a la Prueba de Generación Neta de Acidos (GNA), de Miller y otros (1997). Los procedimientos de las pruebas para los dos métodos se proporcionan en el Anexo V-I. Los resultados de las pruebas se resumen y presentan como sigue:

V.4.3.1. Balance Acido-Base (BAB)

El BAB es la prueba estática más popular actualmente aplicada para evaluar el potencial de materiales geológicos para generar ácidos. En el análisis se determinó el balance de la capacidad de una muestra para generar ácidos y su capacidad para la neutralización de ácidos como resultado de la intemperización de sus minerales constituyentes. El procedimiento común, tal como aquí se adoptó, es calcular la acidez potencial máxima (APM) basándose en el contenido de sulfato-azufre de la muestra, y determinar el potencial de neutralización (PN) por retitulación con una solución alcalina después de digerir un peso conocido de una prueba pulverizada con exceso de ácido a temperatura ambiental. Para determinar la capacidad fácilmente disponible de neutralización de ácidos y para ayudar a determinar el rol de los minerales de silicato en la neutralización de ácidos, el potencial de neutralización en el caso de los carbonatos (PN del Carbonato) se calcula también en base al contenido medido de carbonato de una muestra. Siguiendo la práctica actual en el Perú y la mayoría de otros países, los criterios aplicados para evaluar el potencial de DAR de las muestras son los siguientes:

- ▣ Una muestra se considera como no generadora de ácidos (NFA), si se aplica cualquiera de lo siguiente:

el contenido de sulfuro-azufre es menor que 0.3% en peso;

el potencial neto de neutralización PNN (=PN-APM), es mayor que el equivalente de 20 Kg/tonelada CaCO_3 y la relación de potencial de neutralización, RPN (=PN/APM), es mayor que 3.

- ▣ Se considera una muestra como potencial generadora de ácidos (FPA) si se aplica lo siguiente:

$\text{PNN} < -20$ Kg/Tonelada métrica CaCO_3 equivalente; o

$\text{RPN} < 1$

- ▣ Se considera que una muestra presenta un incierto potencial de generación de ácidos dadas las condiciones señaladas a continuación, en cuyo caso se requiere que las pruebas cinéticas determinen la conducta geoquímica a largo plazo de la muestra.

$20 > \text{PNN} > -20$ en Kg/tonelada métrica CaCO_3 equivalente; o,

$3 > \text{RPN} > 1$

Existe la preocupación de que el empleo de un contenido de sulfato-sulfuro de 0.3% en peso como discriminador del punto de equilibrio de ley para rocas no generadoras de ácidos pueda ser inapropiado. Sin embargo, el valor es uno de los criterios de pre-evaluación actualmente usado en muchas jurisdicciones incluyendo la Provincia de

Columbia Británica, Canadá (Price y otros, 1997). Además, el medio del skarn en el yacimiento Antamina (i.e., ensambles enriquecidos de minerales ácido-neutralizantes) justifica un valor discriminante mayor que 0.1 % en peso de sulfuro-azufre, que es el límite de detección de la mayoría de análisis de sulfuros. No obstante, en este estudio, la clasificación del potencial de DAR para los desechos propuestos de la mina Antamina, recae más en el criterio $PN/PA > 3$ que en cualquier otro. También se usó la relación de PN/PA para seleccionar las muestras para las pruebas de celdas húmedas.

El análisis BAB de todo el conjunto de muestras se presentan detalladamente en el Anexo V-I. Los datos resumidos sobre materiales de mineral, diferentes tipos de desechos y relaves se muestran en la Tabla V-3, Tabla V-4 y Tabla V-5, respectivamente. Algunas de las observaciones más interesantes también se describen en las Figuras 4-1 y 4-2.

Tabla V-3 Características BAB del Material Mineral Seleccionado en Antamina

Muestra#	Tipo de roca	pH de la pasta	Total-S %	sulfato-S %	Sulfuro-S %	APM kg/t CaCO3	PN kg/t CaCO3	PNN kg/t CaCO3	PN/APM**	PNCc kg/t CaCO3
11389	CA	8,01	3,32	0,01	3,31	103	57	-46	0,6	23
16703	hornfel/CL	6,73	2,43	0,005	2,43	76	26	-50	0,3	<1
7364	panizo/CL	7,16	4,53	0,01	4,52	141	23	-118	0,2	2
11171	CL	7,35	6,37	0,005	6,37	199	38	-161	0,2	24
16606	panizo/CL	7,53	1,98	0,005	1,98	62	20	-42	0,3	1
42925	CL	8,83	3,21	0,005	3,21	100	34	-66	0,3	12
50728	GB/ms	7,76	8,70	0,02	8,68	271	32	-239	0,1	10
10623	GB	7,77	1,50	0,005	1,50	47	75	28	1,6	46
10681	GB	7,82	1,23	0,005	1,23	38	74	36	1,9	45
10753	GB	7,93	3,34	0,02	3,32	104	78	-26	0,8	51
37605	GB	7,92	0,23	0,01	0,23	7	41	34	5,7	25
37702	GB	7,70	0,19	0,005	0,19	6	67	61	11,3	43
11860	GB	9,13	0,34	0,01	0,33	10	50	40	4,8	31
11383	GB	7,85	7,63	0,1	7,53	235	42	-193	0,2	22
42908	GB	7,72	6,36	0,07	6,29	197	61	-136	0,3	32
42941	GB	8,32	2,79	0,005	2,79	87	80	-7	0,9	46
10075	Caliza	8,45	0,55	0,005	0,55	17	866	849	50,4	710
11203	GG	4,40	10,06	0,21	9,85	308	14	-294	0,0	<1
37663	GG	8,31	1,85	0,005	1,85	58	40	-18	0,7	22
12932	GG	8,10	2,79	0,05	2,74	86	396	310	4,6	390
50752	GG	8,61	3,32	0,005	3,32	104	66	-38	0,6	40
11282	GG	8,57	2,40	0,02	2,38	74	62	-12	0,8	36

11927	GG	8,40	7,36	0,02	7,34	229	83	-146	0,4	57
15241	GG	7,25	10,70	0,06	10,64	333	16	-317	0,0	1
10765	GG	7,92	4,64	0,04	4,60	144	30	-114	0,2	17
50766	LM	8,23	0,45	0,005	0,45	14	852	838	60,6	560
12951	LM-GG	9,70	1,18	0,02	1,16	36	265	229	7,3	46
37829	MP	8,77	0,31	0,005	0,31	10	25	15	2,6	10
11339	MQ/mgte	7,78	13,50	0,05	13,45	420	73	-347	0,2	46
15240	PY	6,85	20,60	0,02	20,58	643	17	-626	0,0	6
15250	PY	6,31	21,25	0,04	21,21	663	17	-646	0,0	2
	promedio	7,84	5,00	0,03	4,98	155,6	116,8	-38,8	0,8	81,2
	mediana	7,92	3,21	0,01	3,21	100,3	50,0	-41,9	0,6	31,0
	máxima	9,70	21,25	0,21	21,21	662,8	866,0	848,8	60,6	710,0
	mínima	4,40	0,19	0,01	0,19	5,9	14,0	-645,8	0,0	1,0
	Desv. Est.	0,95	5,46	0,04	5,44	169,9	212,2	308,2	13,8	169,5

Nota: (para no alterar las iniciales de los minerales en la tabla se ha decidido mantenerlas en Inglés)

* CA=calcita en skarn; CL=clorita en skarn; GB=skarn granate marrón; GG=skarn granate verde;

LM=mármol; MP=monzonita;

MQ=monzonita cuárstica; PY=pirita masiva; ms=sulfuro masivo; mgte=rica en magnetita

** PN/APM promedio = PN promedio/APM promedio, todas las otras estadísticas se basan en la distribución actual de datos para los parámetros.

Tabla V-4 Resumen de Estadísticas sobre las Características BAB de los Desechos de Antamina

Rock Group	Paste pH	Total-S %	sulfate-S %	Sulfide-S %	MPA kg/t CaCO ₃	NP kg/t CaCO ₃	NNP kg/t CaCO ₃	NP/MPA*	CcNP kg/t CaCO ₃	
Brown-garnet skarn, all; n=11 (including oxidized material)	<i>mean</i>	6.89	7.09	0.08	7.02	219	44	-176	0.2	21
	<i>median</i>	7.55	4.99	0.03	4.83	151	31	-137	0.1	12
	<i>maximum</i>	8.90	23.80	0.45	23.75	742	172	128	4.0	84
	<i>minimum</i>	4.72	0.43	0.01	0.43	13	10	-732	0.0	0
	<i>std.dev.</i>	1.51	6.90	0.14	6.91	216	47	237	-	28
Brown-garnet skarn,oxidized; n=5	<i>mean</i>	5.43	8.22	0.15	8.07	252	13	-239	0.1	0
	<i>median</i>	5.05	4.99	0.07	4.83	151	12	-137	0.1	0
	<i>maximum</i>	6.30	23.80	0.45	23.75	742	20	-50	0.2	0
	<i>minimum</i>	4.72	2.06	0.03	1.99	62	10	-732	0.0	0
	<i>std.dev.</i>	0.72	8.82	0.17	8.87	277	4	279	-	0
Green-garnet skarn; n=17	<i>mean</i>	8.48	0.72	0.03	0.70	22	127	105	5.8	59
	<i>median</i>	8.20	0.47	0.02	0.47	15	119	112	11.0	43
	<i>maximum</i>	10.71	3.19	0.07	3.18	99	332	315	180.2	270
	<i>minimum</i>	6.35	0.04	0.01	0.03	1	7	-81	0.2	2
	<i>std.dev.</i>	1.24	0.82	0.02	0.82	26	98	112	-	72
Marble; n=47	<i>mean</i>	8.64	0.54	0.01	0.53	17	709	692	42.9	623
	<i>median</i>	8.56	0.38	0.01	0.38	12	758	738	60.2	660
	<i>maximum</i>	9.64	4.02	0.04	4.01	125	919	904	353.6	830
	<i>minimum</i>	7.82	0.03	0.00	0.03	1	179	149	2.5	95
	<i>std.dev.</i>	0.42	0.63	0.01	0.63	20	189	196	-	177
Limestone; n=21	<i>mean</i>	8.62	0.47	0.00	0.46	14	680	666	47.2	628
	<i>median</i>	8.61	0.35	0.00	0.34	11	788	776	40.3	650
	<i>maximum</i>	9.30	1.82	0.01	1.82	57	955	947	332.4	860
	<i>minimum</i>	8.12	0.09	0.00	0.09	3	19	11	2.4	69
	<i>std.dev.</i>	0.32	0.38	0.01	0.38	12	245	247	-	185
Monzonite; n=14	<i>mean</i>	8.17	0.70	0.01	0.70	22	22	0	1.0	8
	<i>median</i>	8.22	0.35	0.00	0.35	11	21	12	2.0	8
	<i>maximum</i>	9.10	3.73	0.03	3.73	116	47	41	59.8	22
	<i>minimum</i>	7.17	0.03	0.00	0.01	0	8	-93	0.1	0
	<i>std.dev.</i>	0.58	1.03	0.01	1.03	32	9	36	-	6
Quartz monzonite; n=69	<i>mean</i>	8.24	1.52	0.02	1.51	42	32	-11	0.7	17
	<i>median</i>	8.29	0.62	0.02	0.62	19	21	4	1.3	9
	<i>maximum</i>	9.45	11.75	0.04	11.75	367	359	335	17.9	310
	<i>minimum</i>	6.51	0.03	0.00	0.00	0	6	-352	0.0	0
	<i>std.dev.</i>	0.58	2.45	0.01	2.44	68	54	88	-	45
Overburden; n=17	<i>mean</i>	6.53	2.20	0.08	2.12	66	68	1	1.0	78
	<i>median</i>	6.44	1.43	0.05	1.33	42	16	-6	0.6	4
	<i>maximum</i>	8.42	11.30	0.24	11.25	352	425	423	209.2	440
	<i>minimum</i>	4.32	0.07	0.00	0.03	1	2	-193	0.1	1
	<i>std.dev.</i>	1.17	2.84	0.07	2.83	88	114	135	-	133

Note:

* Mean NP/MPA = mean NP/mean MPA; all other statistics have been calculated based on the actual data distribution for the parameter.

Tabla V-5

Sample #	Ore Type	Paste pH	Sulfide-S %	MPA kg/t CaCO ₃	NP kg/t CaCO ₃	NNP kg/t CaCO ₃	NP/MPA* kg/t CaCO ₃	Carbonate-NP kg/t CaCO ₃	ARD potential Classification*
<u>A) Bulk samples</u>									
Metcom 1	Skarn, low Zn	8.48	4.55	142	60	-82	0.4	42	PAF
Metcom 2	Skarn, avg.Zn	8.74	2.50	78	66	-12	0.8	42	PAF
Metcom 3	Intrusive,no Zn	7.11	6.13	192	41	-151	0.2	30	PAF
Metcom 4	Oxide	8.15	1.10	34	87	53	2.5	62	uncertain
Metcom 5	Partial Oxide	9.36	4.09	128	117	-11	0.9	74	PAF
Metcom 6	Skarn,high Zn	7.52	3.79	118	151	33	1.3	134	uncertain
Metcom 7	Lake Zone	8.08	1.79	56	25	-31	0.4	9	PAF
Metcom 8	Intrusive,high Py	6.40	22.49	703	50	-653	0.1	38	PAF
Metcom 9	Limestone	7.75	1.76	55	484	429	8.8	510	NAF
Metcom 10	Bornite	10.54	0.10	3	297	294	95	56	NAF
Metcom 11	N. Lake Zone	8.01	2.66	83	33	-50	0.4	32	PAF
Metcom 101	Cu-ore	8.28	9.92	310	23	-287	0.1	29	PAF
Metcom 102	Cu-Zn ore	9.94	8.98	281	37	-243	0.1	44	PAF
PP8, bulk	Cu ore	8.95	0.63	20	48	28	2.4	28	uncertain
PP29, bulk	Cu-Zn ore	8.21	4.78	149	125	-24	0.8	89	PAF
	mean	8.37	5.02	156.8	109.6	-47.2	0.7	81.3	
	median	8.21	3.79	118.4	60.0	-24.0	0.8	42.0	
	maximum	10.54	22.49	702.8	484.0	429.0	95.0	510.0	
	minimum	6.40	0.10	3.1	23.0	-652.8	0.1	9.0	
	std.dev.	1.05	5.61	175.3	125.4	245.4	24.3	122.4	
Metcom 1-10	Composite	8.82	4.76	157	165	8	1.0	100	uncertain
<u>B. Different size fractions of selected samples</u>									
PP8, >75um		8.37	0.40	13	32	20	2.6	17	uncertain
PP8, 25-75um		8.47	0.67	21	42	21	2.0	26	uncertain
PP8, <25um		8.37	0.77	24	79	54	3.3	50	NAF
PP29, >75um		8.05	1.93	60	107	46	1.8	96	uncertain
PP29, 25-75um		8.22	5.21	163	87	-76	0.5	65	PAF
PP29, <25um		8.00	5.71	178	172	-6	1.0	110	PAF

Notes:

* Mean NP/MPA = mean NP/mean MPA; all other statistics are based on actual data distribution for the parameter.

** PAF = potentially acid forming; NAF = non acid forming

La Figura V-2 es un diagrama de la acidez potencial máxima (APM) frente al potencial de neutralización (PN) para el grupo de roca de desechos. De acuerdo al diagrama es evidente que la caliza (LS), el mármol (LM) y la mayor parte de skarn verde granate (GG) no son generadores de ácidos. La mayor parte de skarn marrón granate (GB) y material de cubierta (OB, incluyendo algunos minerales oxidados) son generadores potenciales de ácidos. La mayor parte del intrusivo (MK, MQ) se encuentra en la categoría de incertidumbre, sin embargo, una porción significativa también contiene abundantes sulfuros y debe ser clasificada como generador potencial de ácidos.

La Figura V-3 es un diagrama del PN del carbonato frente a PN de las rocas de desechos propuestos de Antamina. Con pocas excepciones, el PN excede al PN de

carbonato en todos los tipos de rocas. El excedente no puede ser explicado por el error de medición (encerrado con líneas punteadas en el mapa incertado). De ahí que los minerales no carbonatos deban también contribuir en la capacidad significativa de neutralización de las rocas de Antamina. Basados en la serie de muestras geoquímicas y mineralógicas, los candidatos probables con PN adicional son los minerales calc-silicatos tales como volastonita, diópsido y, tal vez también, granate. El hecho de que algunas muestras presenten un PN de carbonato mayor que el PN de Sobek correspondiente sugiere que los minerales hierro-carbonatos como siderita y ankerita no son componentes significativos del yacimiento.

Tal como lo muestran los datos resumidos de la Tabla V-5, el potencial de generación de ácidos de los relaves varía con el tipo de mineral del que derivan los relaves. Los minerales altos en Cu y bajos en Zn albergados por el intrusivo y el skarn marrón granate, por lo general, originan relaves potencialmente generadores de ácidos, mientras que minerales altos en Zn albergados por el skarn marrón granate, mármol y caliza presentan un potencial bajo para la generación de ácidos a menos que también contengan abundante pirita (reflejada por un contenido alto en sulfuro-S, i. e., >5%). Los análisis de BAB de las fracciones de diferente tamaño de dos muestras seleccionadas indican que los sulfuros se concentran más en fracciones más finas. Sin embargo, la fracción fina (<25 μm) es también más rica en PN (se presume que se debe a que los minerales carbonatos asociados son suaves y más fáciles de pulverizar).

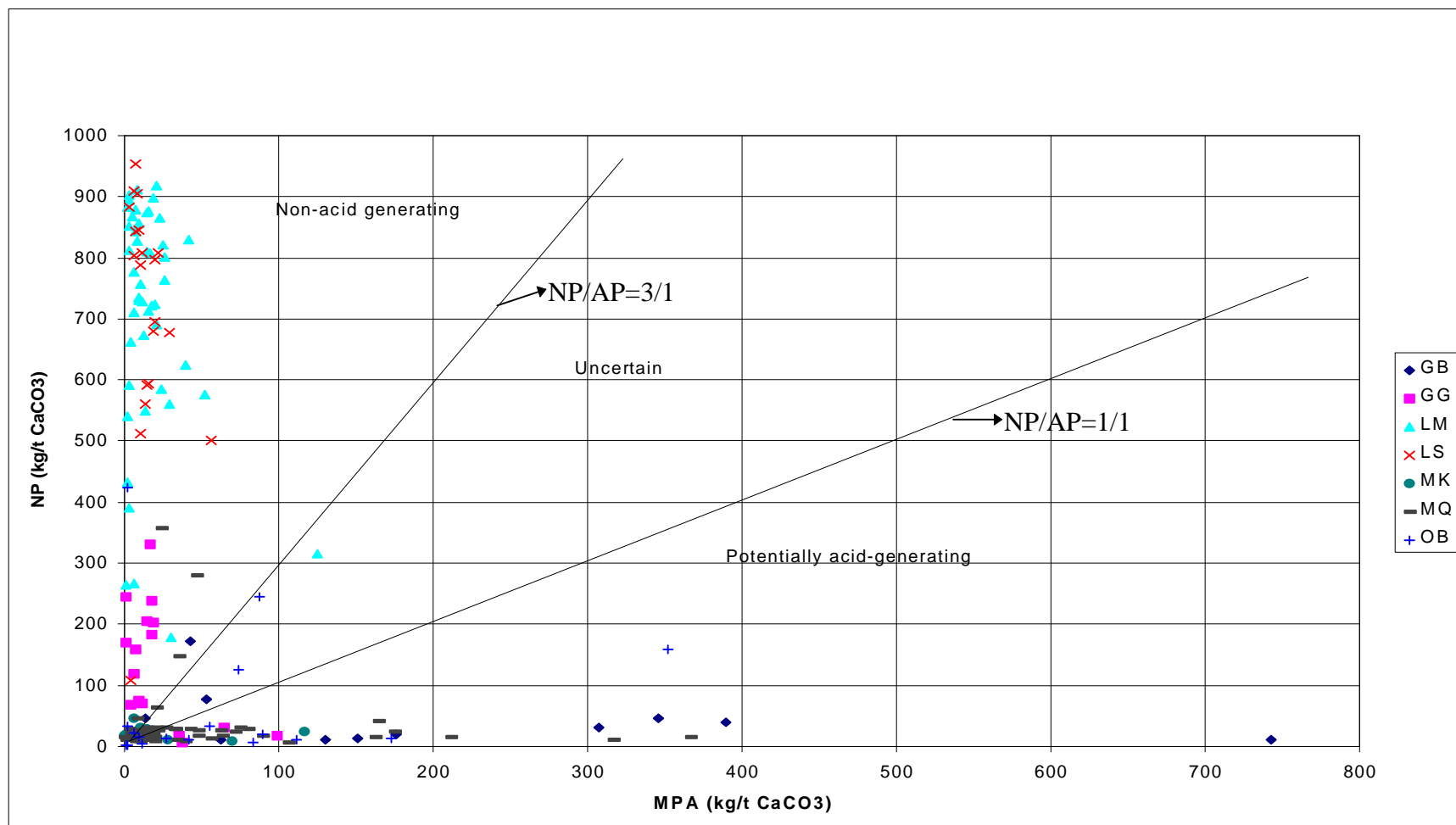


Figura V-2 Diagrama de Acidez Potencial Máxima (APM), frente al Potencial de Neutralización (PN) para Desechos de Antamina.

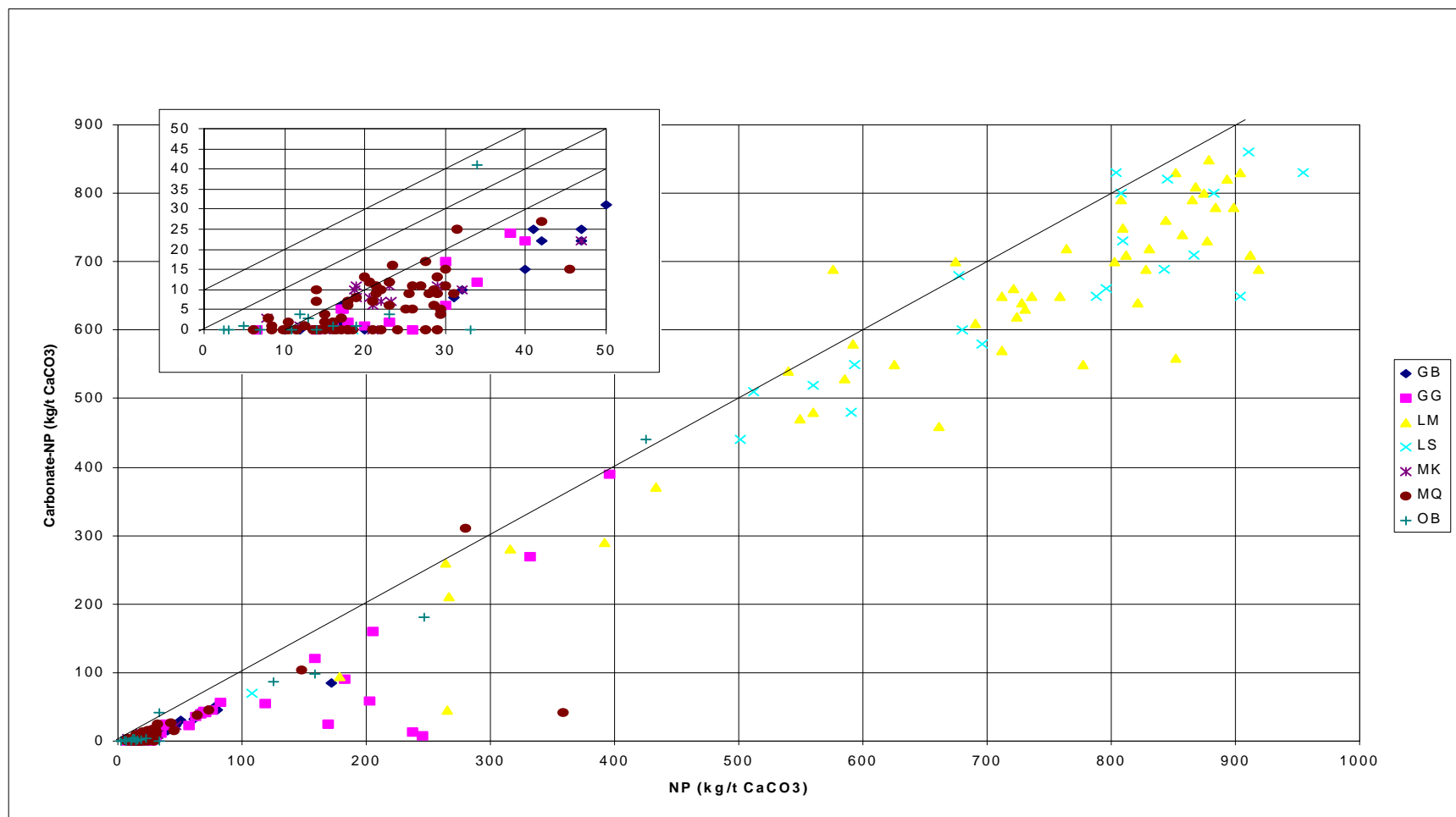


Figura V-3 Diagrama de PN de Carbonato. PN de Sobek para Desechos de Antamina

Esto deja a la fracción de rango medio (25-75 μ m) con la menor relación del potencial de neutralización (RPN=2.0 y 0.5 para los relaves de Cu y Cu-Zn, respectivamente) y la mayor susceptibilidad para generar ácidos.

V.4.3.2. Prueba de Generación Neta de Acido (GNA)

La prueba de GNA es una prueba estática independiente para evaluar el potencial de DAR de materiales geológicos. Es una modificación del procedimiento diseñado por Finkelman y Giffin (1986) para estimar el contenido de pirita reactiva del material de cubierta de minas de carbón (Miller y otros). El procedimiento de la prueba (detallada en el Anexo V-I) consiste en oxidar la pirita reactiva en una muestra de prueba con una solución de peróxido de hidrógeno con un pH inicial de aproximadamente 5. Después del término de la reacción entre el material sulfuroso y el peróxido de hidrógeno, se mide el pH de la solución. Una disminución del pH a un valor <4 indica que la muestra de la prueba es potencial generadora de ácidos, mientras que un pH >4 indica una muestra no generadora de ácidos. La retitulación de la solución a un pH de 4.5 proporciona la capacidad de GNA comúnmente reportada ($GNA_{pH\ 4.5}$) de la muestra de prueba. El valor de $GNA_{pH\ 4.5}$ indica la contribución del ácido libre, Al y Fe, mientras que el valor GNA_{pH7} (obtenido por retitulación a pH7) proporciona información adicional sobre acidez adicional debido a otros metales. La ventaja principal de la prueba de GNA es que el procedimiento involucrado consume menos tiempo que el análisis de ABA. Sin embargo, la prueba de GNA no proporciona información sobre la capacidad de neutralización de ácidos de la muestra de prueba.

Los resultados de la prueba de GNA para las muestras de relaves se resumen y comparan con los resultados en la Tabla V-6.

La Tabla V-7 presenta el comportamiento previsto de intemperización de las muestras de Antamina sometidas a la Prueba de Celdas Húmedas. Evidentemente, los dos métodos de prueba proporcionan predicciones cualitativas similares con respecto al potencial de generación de ácidos de una muestra de prueba. Sin embargo, el valor de GNA a un pH 4.5, por lo general, es menor que el valor de APM obtenido en los análisis de BAB, indicando que no todos los sulfuros se consumieron (oxidaron) en la prueba de GNA.

Tabla V-6 Comparación de los Resultados de las Pruebas de GNA y ABA sobre los Relaves de Antamina

Summary static test data on tailings samples from Antamina															
I. Static test results															
Modified Sobek Procedure											Net Acid Generation Test (Miller et al., 1997)***				Prediction** based on combined method
Sample #	Ore Type	Paste pH	Sulfide-S	MPA	NP	NNP	NP/MPA*	Carbonate-NP	ARD potential	NAGpH	Prediction**	NAGvalue,kg/t CaCO3			
			%	kg/t CaCO3	kg/t CaCO3	kg/t CaCO3		kg/t CaCO3	Classification**			NAGpH4.5	NAGpH7		
A) Bulk samples															
Metcom 1	Skarn, low Zn	8,48	4,55	142	60	-82	0,4	42	PAF	2,41	PAF	-45	-65	PAF	
Metcom 2	Skarn, avg. Zn	8,74	2,50	78	66	-12	0,8	42	PAF	5,25/2,75	NAF/PAF	0/-15	-10/-31	PAF, low capacity	
Metcom 3	Intrusive, no Zn	7,11	6,13	192	41	-151	0,2	30	PAF	2,52	PAF	-44	-89	PAF	
Metcom 4	Oxide	8,15	1,10	34	87	53	2,5	62	uncertain	5,5	NAF	0	-8	NAF	
Metcom 5	Partial Oxide	9,36	4,09	128	117	-11	0,9	74	PAF	5,29	NAF	0	-6	uncertain	
Metcom 6	Skarn, high Zn	7,52	3,79	118	151	33	1,3	134	uncertain	5,26	NAF	0	-7	NAF	
Metcom 7	Lake Zone	8,08	1,79	56	25	-31	0,4	9	PAF	2,66	PAF	-20	-38	PAF	
Metcom 8	Intrusive, high Py	6,40	22,49	703	50	-653	0,1	38	PAF	2,07	PAF	-186	-277	PAF	
Metcom 9	Limestone	7,75	1,76	55	484	429	8,8	510	NAF	5,19	NAF	0	-10	NAF	
Metcom 10 G & T	Bornite	10,54	0,10	3	297	294	95	56	NAF	6,23	NAF	0	0	NAF	
Metcom 11	N. Lake Zone	8,01	2,66	83	33	-50	0,4	32	PAF	2,31	PAF	-65	-92	PAF	
Metcom 101	Cu-ore	8,28	9,92	310	23	-287	0,1	29	PAF	2,68	PAF	-20	-38	PAF	
Metcom 102	Cu-Zn ore	9,94	8,98	281	37	-243	0,1	44	PAF	2,45	PAF	-73	-98	PAF	
PP8, bulk	Cu ore	8,95	0,63	20	48	28	2,4	28	uncertain	7,12	NAF	-	-	NAF	
PP29, bulk	Cu-Zn ore	8,21	4,78	149	125	-24	0,8	89	PAF	7,73	NAF	-	-	uncertain	
	mean	8,37	5,02	156,8	109,6	-47,2	0,7	81,3							
	median	8,21	3,79	118,4	60,0	-24,0	0,8	42,0							
	maximum	10,54	22,49	702,8	484,0	429,0	95,0	510,0							

	<i>minimum</i>	6,40	0,10	3,1	23,0	-652,8	0,1	9,0									
	<i>std.dev.</i>	1,05	5,61	175,3	125,4	245,4	24,3	122,4									
Metcom 1-10	Composite	8,82	4,76	157	165	8	1,0	100	uncertain								
B. Different size fractions of selected samples																	
PP8, >75um		8,37	0,40	13	32	20	2,6	17	uncertain	6,84	NAF	-	-				NAF
PP8, 25-75um		8,47	0,67	21	42	21	2,0	26	uncertain	6,74	NAF	-	-				NAF
PP8, <25um		8,37	0,77	24	79	54	3,3	50	NAF	7,07	NAF	-	-				NAF
PP29, >75um		8,05	1,93	60	107	46	1,8	96	uncertain	7,16	NAF	-	-				NAF
PP29, 25-75um		8,22	5,21	163	87	-76	0,5	65	PAF	7,14	NAF	-	-				uncertain
PP29, <25um		8,00	5,71	178	172	-6	1,0	110	PAF	6,98	NAF	-	-				uncertain
<i>Notes:</i>																	
* Mean NP/MPA = mean NP/mean MPA; all other statistics are based on actual data distribution for the parameter.																	
** PAF = potentially acid forming; NAF = non acid forming																	
***Miller, S; Robertson, A and Donohue, T. (1997)																	
II Kinetic test results																	
A. Humidity-cell testing																	
		Predicted time (years) for onset of ARD						Leached metal of concern / loading (mg/kg/wk)									
Metcom 1-10	Composite	91						Cu / 0.383 (initial wash); Mo / 0.326 (max), 0.076 (mean); Zn / 0.053 (max); 0.023 (mean).									
PP8, bulk	Cu ore	too early to tell						Cu / 0.172 (max); Mo / 0.059 (max); Zn / 0.013 (max). [NB. too early calculate mean values]									
PP29, bulk	Cu-Zn ore	too early to tell						Cd / 0.0027 (max); Cu / 0.073 (max); Mo / 0.022 (max); Zn / 0.291 (max), 0.077 (anticipated minimum mean value).									
B. Kinetic NAG test ^																	
PP8, bulk	Cu ore	indefinite (>18)						not applicable									
PP8, >75um		indefinite (>18)						not applicable									
PP8, 25-75um		indefinite (>18)						not applicable									
PP8, <25um		indefinite (>18)						not applicable									
PP29, bulk	Cu-Zn ore	indefinite (>66)						not applicable									
PP29, >75um		indefinite (>66)						not applicable									

PP29, 25-75um		indefinite (>66)			not applicable											
PP29, <25um		indefinite (>18)			not applicable											
Metcom 101	Cu-ore	15			not applicable											
Metcom 102	Cu-Zn ore	9			not applicable											
<i>Remarks:</i>																
^ Time of onset of ARD calculated based on equation given by Miller et al. (1997): Time to pH 4 in column test (weeks) = 2.4 x Time for 1 pH unit decrease in kinetic NAG test (minutes).																
Application of the equation to Antamina rocks requires further validation.																

Tabla V-7 Composición y Comportamiento Previsto de Intemperización de las Muestras de Antamina Sometidas a la Prueba de Celdas Húmedas

# de celdas y tipo de roca	1. Monzonita	2. Monzonita Cuarstica	3. Skarn granate marrón	4. Skarn granate verde	5. Relaves de Compuestos	6. Relaves sólo de Cu	7. Relaves de mineral Cu-Zn
Mineralogía	18% Cuarzo	20% Cuarzo	11% Cuarzo	4% Cuarzo	8.6% Cuarzo	no disponible	no disponible
	43% feldspato de K	45% Feldespato de K	14% Feldespato	1% Feldespato	1.1% Tremolitano		
	30% Plagioclasa	24% Plagioclasa	12% Plagioclasa	1% Albita	56% Granate		
	4% Biotita	5% Biotita	40% Granate	0.5% Clorita	6.3% Diópsido		
	3% Illita	3% Illita	12% Diópsido	60% Granate	2.3% Volastonita		
	0.5% Calcita	1% Clorita	0.5% Epidota	9% Diópsido	9.7% Calcita		
	0.6% Apatita	0.5% Calcita	3.5% Calcita	0.5% Epidota	2.9% Magnetita		
	0.5% Magnetita	0.5% Magnetita	0.5% Magnetita	10% Calcita	12% Pirita		
	0.5% Pirita	0.5% Pirita	0.5% Goethita	8% Pirita	0.34% Calcopirita		
	0.2% Calcopirita	0.4% Calcopirita	4% Pirita	2% Calcopirita	0.34% Pirrotita		
	0.06% Molibdenita	0.06% Molibdenita	1.61% Calcopirita	4% Esfalerita	0.01% Esfalerita		
	0.01% Esfalerita	0.01% Esfalerita	0.04% Esfalerita	0.04% Galena			
			0.02% Molibdenita				
% Total de zuffre	0,48	0,43	3,11	6,14	5,04	0,63	4,78
Azufre en sulfuros	0,48	0,43	2,91	6,12	4,86	0,56	4,51
NP kg/t CaCO3	22	13	54	59	137	48	125
Años para agotar todo el PN	37	29	35	43	102	36	32
Años para agotar todo el S	49	71	126	242	227	21	59
Nivel de carga de metales* (mg/kg desechos/wk)							
Cu	ND / ND	ND / ND	ND / ND	ND / ND	0.162 / ND	0.059 / ND	0.057 / 0.003
Mn	0.034 / 0.031	0.035 / 0.020	0.084 / 0.037	0.118 / 0.113	0.036 / 0.021	0.006 / 0.003	0.069 / 0.044
Mo	0.018 / 0.030	0.016 / 0.016	0.002 / 0.008	0.010 / 0.003	0.260 / 0.043	0.031 / 0.009	0.013 / 0.015
Zn	0.001 / 0.016	0.001 / 0.015	0.005 / 0.013	0.083 / 0.069	0.022 / 0.021	0.007 / 0.015	0.148 / 0.144

Cd	0.0013 / ND	0.0005 / ND	0.0008 / ND	0.0005 / 0.0005	ND / ND	ND / ND	0.0018 / 0.0006
Nota:							
*Niveles de carga correspondientes al lavado inicial seguidos por un subsecuente nivel promedio de carga ; ND= No Detectado							

V.4.4. Pruebas Cinéticas para la Predicción de DAR

Mientras que las pruebas estáticas como BAB y GNA indican si una muestra presenta o no potencial para generar ácidos, ninguna información sobre calidad de agua o tasa de variación es proporcionada por las pruebas. Así, si ocurre la oxidación de sulfuro tan lentamente que la pequeña cantidad de ácido generado es eficazmente neutralizada por cualquier cantidad pequeña de minerales neutralizadores de ácidos que se presente en la muestra de prueba, la generación neta de ácidos no se materializará a pesar del contenido de sulfuro original. Dos pruebas cinéticas, es decir la prueba de celda húmeda y la prueba cinética de GNA, se aplican a las muestras seleccionadas en Antamina para estimar el intervalo de retardo para el inicio de DAR, si ocurriera.

V.4.4.1. Prueba de Celdas Húmedas

Las pruebas de celda húmeda se llevaron a cabo para confirmar predicciones basadas en pruebas estáticas y para determinar las tasas de oxidación del sulfuro en los desechos de la mina. Cinco celdas (1 a 5) compuestas, respectivamente, de compuesto de monzonita, monzonita cuarcífera, skarn marrón granate, skarn verde granate y mezcla de relaves se construyeron poco después de que se recogiera el primer grupo de muestras. Dos celdas adicionales (6 y 7) conteniendo respectivamente relaves de la planta piloto de un mineral de Cu típico y un mineral de Cu-Zn típico fueron construidas posteriormente, cuando los materiales de prueba se encontraban disponibles. Las celdas de relaves contenían cerca de 2Kg del 80% del material de prueba que era menor que 75 μ m en tamaño de grano. Cada una de las cuatro celdas restantes contenían 2 Kg de desechos chancados a tamaño granular menor que 6 mm. Se simuló el intemperismo bajo condiciones húmedas durante todo un año pasando aire húmedo por las celdas excepto durante el corto episodio semanal de lixiviación de contenidos de 500 ml de agua destilada de-ionizada. La eliminación de ciclos de sequedad alternados en la prueba de celdas húmedas se asemeja más a las condiciones de intemperismo en un depósito de desechos, excepto posiblemente en y cerca a las superficies expuestas. Los lixiviados semanales fueron analizadas en cuanto a pH, Eh, conductividad eléctrica, acidez, alcalinidad, sulfuro y metales disueltos (Anexo V-I). El programa para la prueba de celdas húmedas fue diseñado para durar 40 semanas pero se terminó en 30 semanas, cuando las celdas de prueba parecían haber alcanzado un estado de equilibrio. Después de que transcurrieron 20 semanas, se efectuó la compilación de lixiviados y el análisis con una frecuencia de dos semanas y no de una semana.

Como parte del programa de prueba cinética se caracterizó todos los materiales de prueba con respecto a las características de BAB, mineralogía y geoquímica de elementos principales y de traza. Después del término del programa de prueba, el material gastado será analizado con los mismos parámetros para determinar los resultados netos del proceso de intemperismo simulado.

Hasta la fecha, los datos de las 30 semanas se encuentran disponibles para las cuatro celdas de desechos así como los datos de las semanas 26 y 6 de las celdas 5 y 6-7 de relaves, respectivamente (Anexo V-I). Los cambios temporales de los parámetros seleccionados (pH, conductividad, producción de sulfuro acumulativo y algunos metales disueltos) y medidos según los lixiviados obtenidos de cada celda son descritos en las Figuras V-4a, Figura V-4b y Figura V-5. Los grados relativos de generación de ácidos (en términos de producción acumulativa de sulfuro) y disminución de la capacidad de neutralización de ácidos (en términos de liberación de metales alcalinos y metales alcalinotérreos) se describen en la Figura V-5 y Figura V-6 para relaves y desechos, respectivamente.

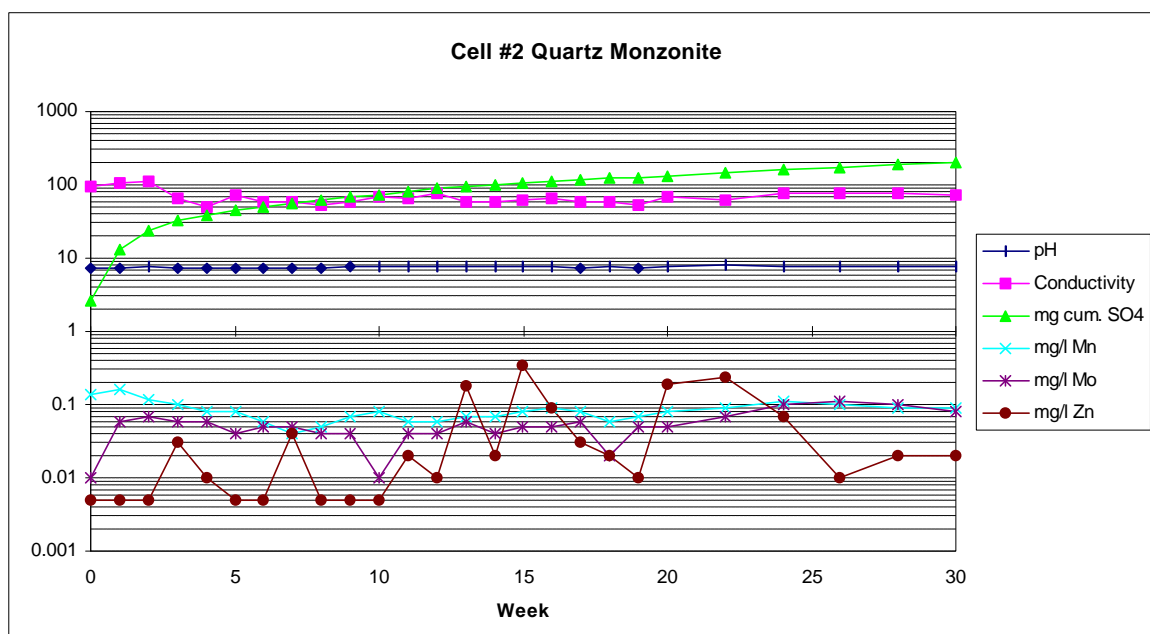
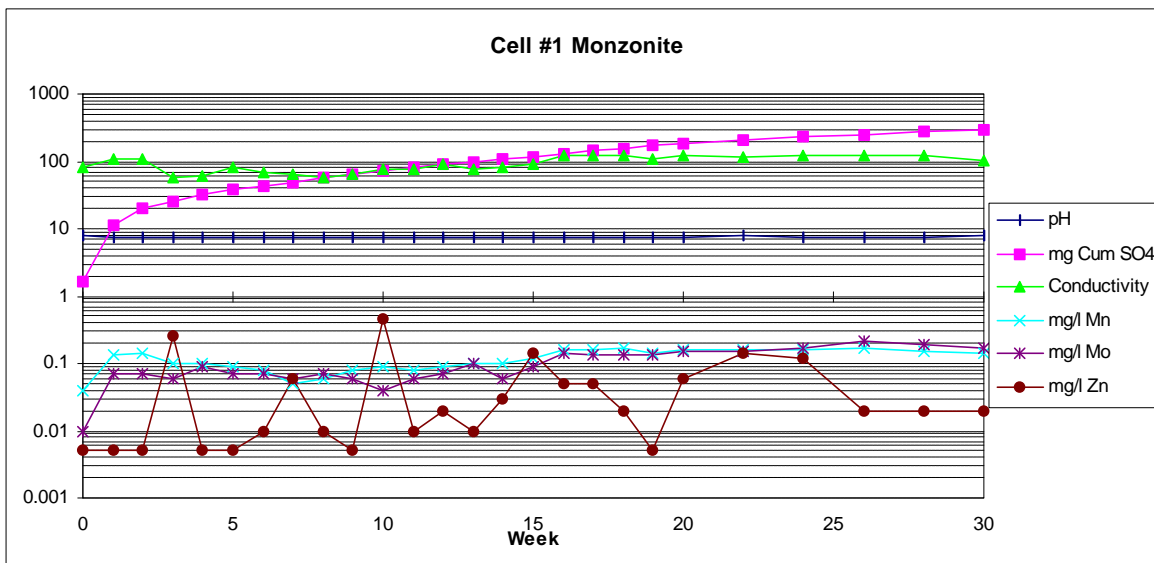


Figura V-4a Cambios Temporales en la Química de Lixiviados según la Prueba de Celdas Húmedas con Intrusivos

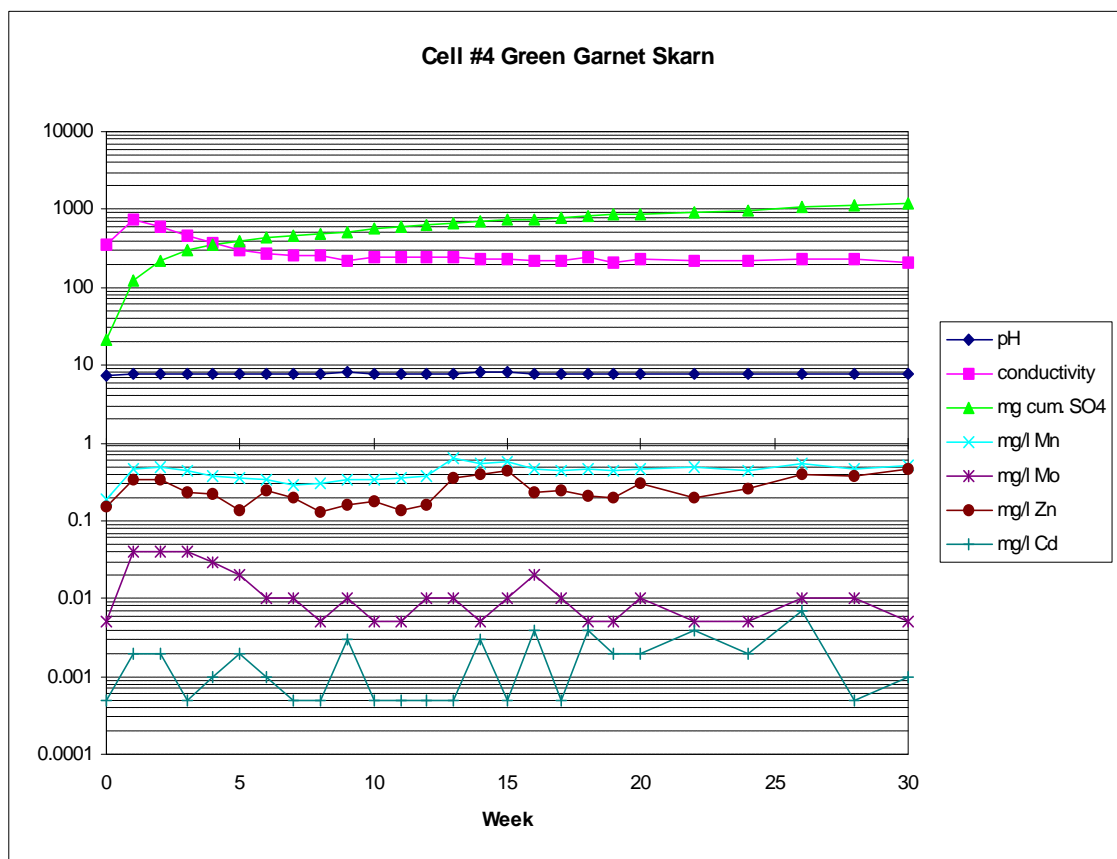
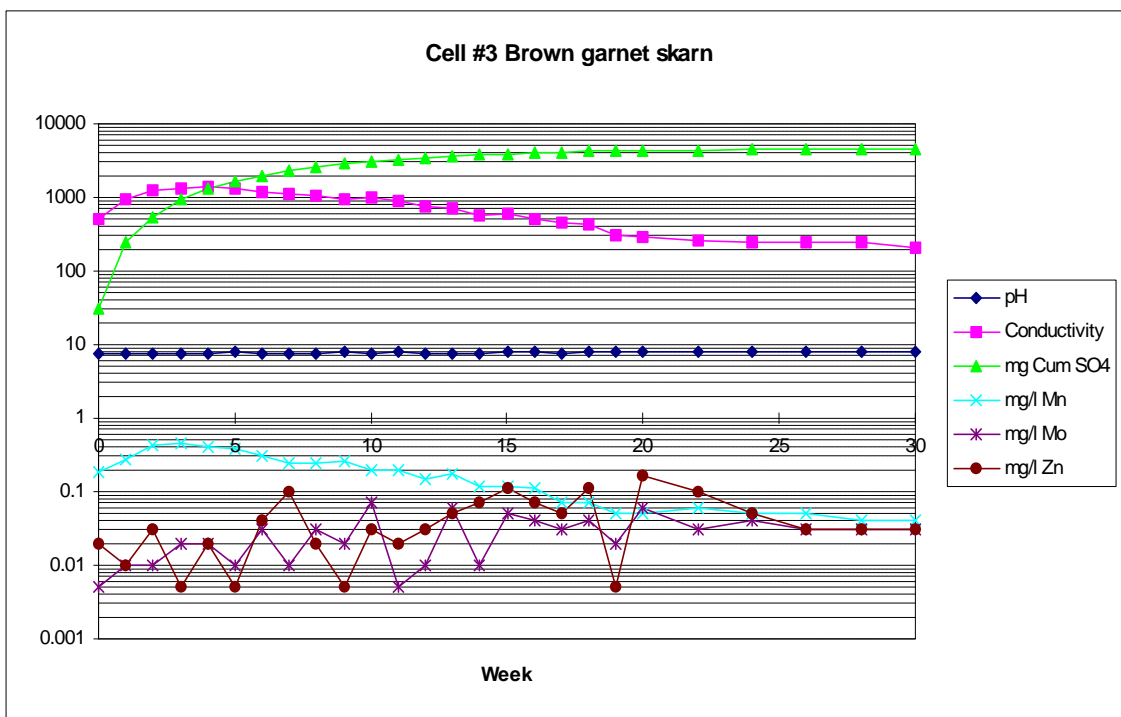


Figura V-4b Variación Temporal en la Química de Lixiviados según la Prueba de Celdas Húmedas con Skarns

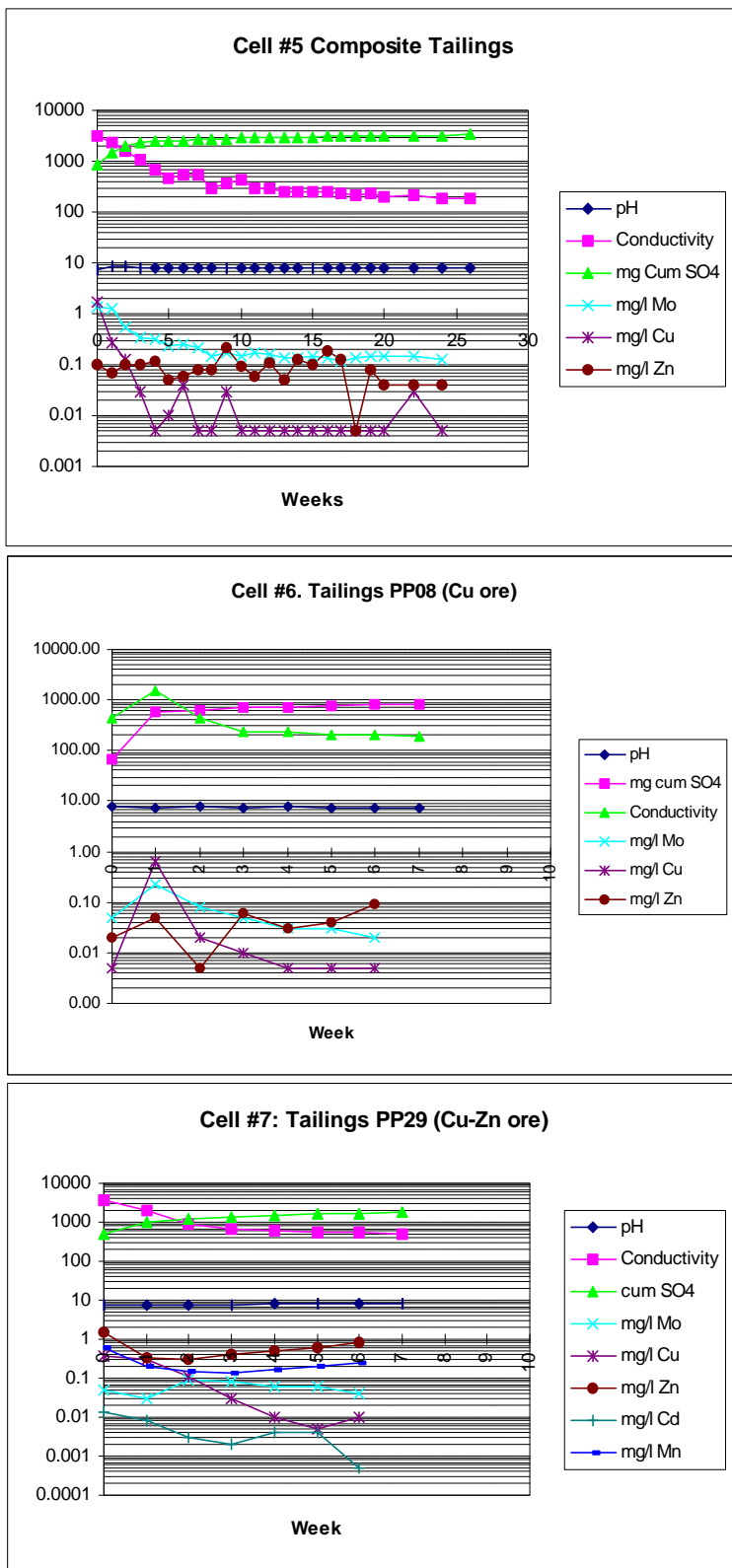


Figura V-5 Cambios Temporales en la Química de Lixiviados según la Prueba de Celdas Húmedas con Relaves de Antamina

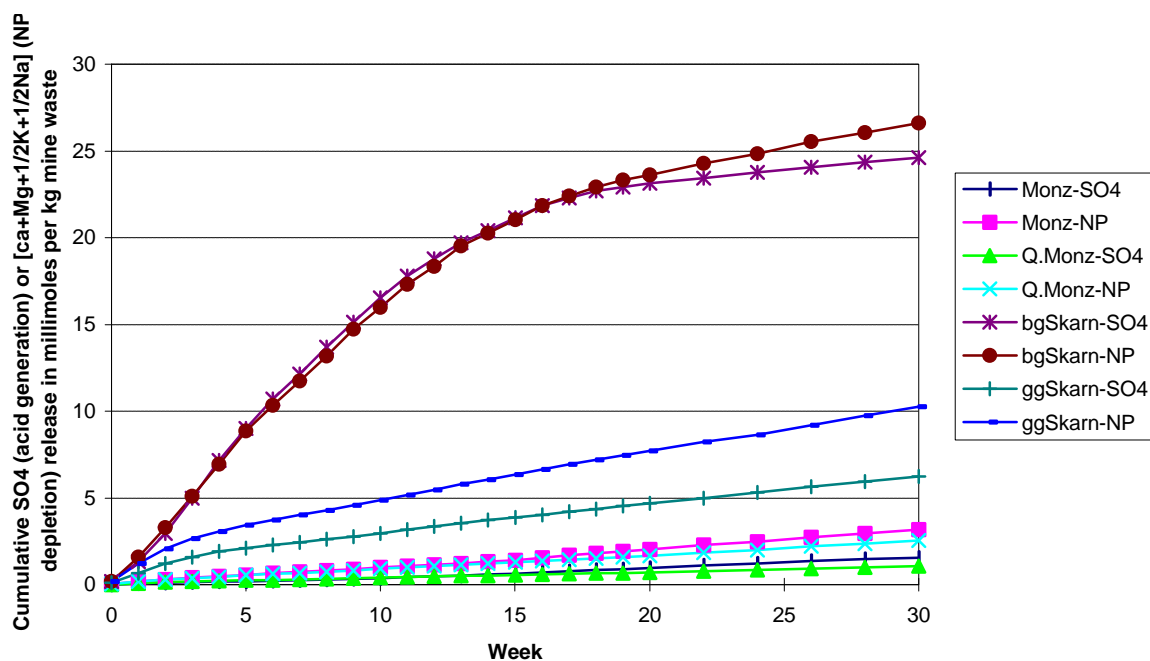


Figura V-6 Comparación de Generación de Acidos y Disminución de PN en la Prueba de Celdas Húmedas de los Desechos de Antamina

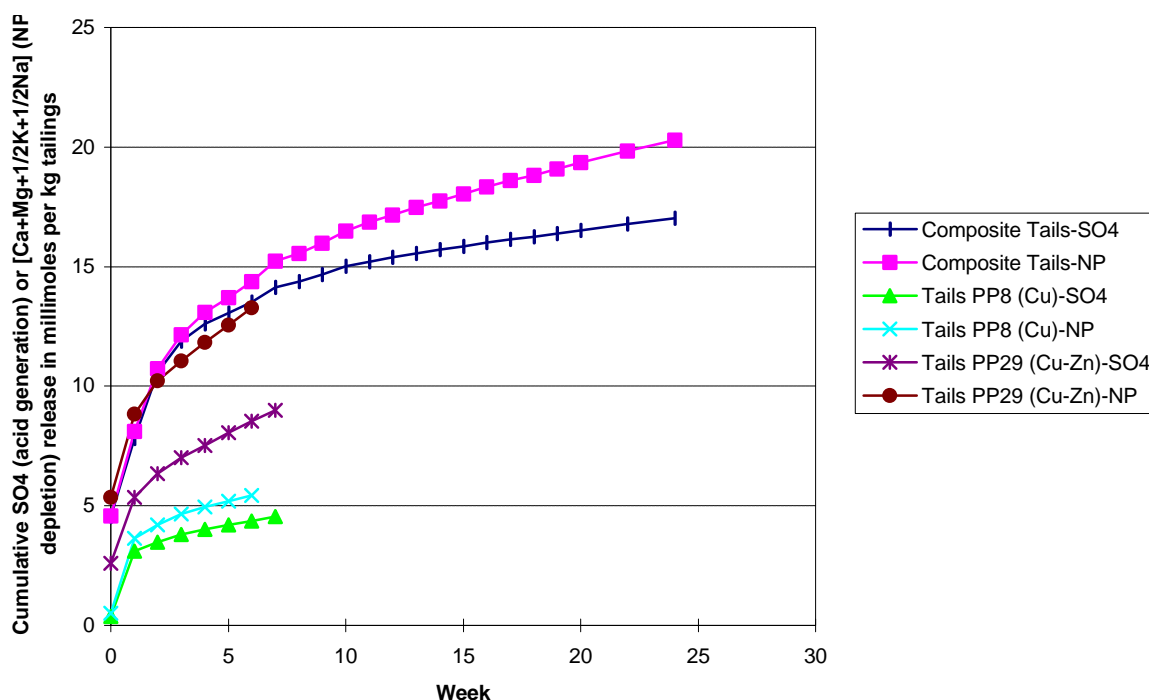


Figura V-7 Comparación de Generación Acida y Disminución de PN en la Prueba de Celdas Húmedas de los Relaves de Antamina

Ninguna de las celdas se transformó a condiciones ácidas y solamente niveles bajos (generalmente menores que 1mg/L o mucho menores) de metales de interés potencial han sido detectados en los lixiviados. Asumiendo que se mantiene la tendencia actual de las tasas de generación de ácidos y la disminución de alcalinidad, se predice que sólo los relaves de mineral de Cu con muy bajo contenido de sulfuro (0.56% de sulfuro-S) no conducirá a la generación neta de ácidos, mientras que a todas las otras muestras les tomará de 29 a 102 años en convertirse en ácidos (Tabla V-7). Debido a que el grado de disminución de PN excede al de la disminución de sulfuro en todos los casos, excepto en el de los relaves de mineral de Cu bajo en sulfuro, existe la posibilidad de que al final ocurra la generación neta de ácidos con la mayoría de las celdas. Sin embargo, las posibilidades para la generación neta de ácidos en cualquiera de las siete celdas son consideradas remotas. Las dos razones principales son las siguientes:

- ▣ En todas las celdas, excepto durante el enjuague inicial, los porcentajes tanto de la disminución de PN como la oxidación de sulfuro disminuyeron con el tiempo. Si las pruebas de celdas fueran extendidas

a más de 30 semanas, la recopilación posterior de datos podría originar un tiempo de disminución de PN más prolongado que el estimado en base a datos recogidos durante 30 semanas o menos. En ese momento, los sulfuros reactivos serán probablemente revestidos con productos secundarios de oxidación que después dificultarán la oxidación de sulfuro. Esto ocasionará un retraso posterior en la aparición de condiciones ácidas o convertir la cantidad de ácidos generados en muy insignificante para producir un severo impacto ambiental. Aunque podría efectuarse el revestimiento de minerales ácido-neutralizantes con prolongado intemperismo, el DAR no ocurrirá mientras que el grado de liberación de PN sea igual al de la oxidación de sulfuro.

- ▣ El contenido total de sulfuro-S de una muestra ha sido empleado para estimar el tiempo de disminución de sulfuro. En realidad, algunos de los sulfuros, especialmente los de desechos, pueden ser ocluidos y no ser fácilmente accesibles para el intemperismo. Por otro lado, el PN de la muestra determinada por el método Sobek modificado (descomposición de ácido frío durante una noche) incluye sólo la fracción ácido-soluble de los metales alcalinos y alcalinotérreos contenidos en una muestra. Dada a una tasa lenta de generación de ácidos, el rol de los minerales de lenta reacción en la neutralización de ácidos no puede ser ignorado. Así, las predicciones actuales basadas en los datos disponibles sobre celdas húmedas son muy conservadoras en cuanto al hecho de que la oxidación de sulfuro ha sido sobre enfatizada y el grado de neutralización ácida posiblemente subestimado.

Las tasas de carga calculadas de metales de potencial interés ambiental también son indicadas en la Tabla V-8. Cabe señalar que, a pesar de las cantidades muy bajas de molibdenita y esfalerita en muchas muestras (<0.1%), cantidades detectables de Mo y Zn son frecuentemente medidas en los lixiviados de celdas húmedas. En contraste, a pesar del contenido de calcopirita, el cobre disuelto detectable sólo puede ser medido en el enjuague inicial en celdas de relaves. Esto sugiere que se genera complejos residuales de cobre-cianuro relacionados con las muestras de relaves. Esta observación también es sustentada por la correlación observada de cobre disuelto con cianuro en los análisis de agua en el proceso de relaves (Anexo V-I).

V.4.4.2. Pruebas Cinéticas de GNA en Relaves

La prueba cinética de GNA es una continuación de la prueba estática de GNA en donde la variación de pH y temperatura asociada con la reacción entre la solución de peróxido de hidrógeno y sulfuros en una muestra de prueba es monitoreada de manera continua. Efectuando las pruebas de columnas y pruebas cinéticas de GNA con una serie de muestras de rocas que presentan diferente contenido de sulfuro y minerales

ganga, Miller y otros (1997) han identificado una relación entre la cinética de la reacción de GNA y el período de retardo en columnas de lixiviación para materiales potenciales generadores de ácidos. La relación es dada por la siguiente ecuación:

- ☒ Tiempo (semanas) para que el pH de lixiviados de columnas disminuya a un valor de 4
- ☒ = 2.4 x tiempo (minutos) para que el pH de la solución de la prueba de GNA cinética disminuya en 1 unidad.

Así, si la relación establecida es universalmente aplicable a todos los tipos de rocas, el tiempo para la aparición de condiciones ácidas puede predecirse con un experimento que necesite sólo 24 horas para completarse en lugar de algunos meses. Sin embargo, en la actual etapa de desarrollo de este tema, la prueba cinética de GNA no proporciona información alguna sobre la rapidez y cantidad de liberación de metales.

Para entender la posible conducta de los relaves de Antamina durante el intemperismo, se efectuó la prueba cinética de GNA a dos muestras de sólidos totales de relaves de la planta piloto y tres fracciones de tamaño seleccionado de cada uno así como también dos compuestos metalúrgicos ricos en sulfuro. Los resultados se resumen en la Tabla 4-8. Tanto los relaves totales como las fracciones de diferente tamaño del mineral de cobre de bajo contenido de sulfuro (PP8, 0.63%S) y mineral Cu-Zn (4.78%) se predice que serán no generadores de ácidos. Sin embargo, si se permite que la intemperización actúe libremente el mineral de Cu alto en sulfuro (Metcom 101, 9.92%S) y el mineral Cu-Zn (Metcom 102, 8.98%S) conducirían a la generación de ácidos netos en 15 a 9 años, respectivamente. Las estimaciones de tiempo para la aparición de condiciones ácidas se calculan en base a la relación identificada por Miller y otros (1997) para la interpretación de los resultados de la prueba cinética de GNA.

Tabla V-8 Intervalo de Retardo Predecido para la Formación de Neta de Ácidos con Relaves Empleando la Prueba Cinética de GNA

Descripción de la Muestra	Tiempo de Retardación Pronosticado (en años) para el DAR
PP8, bulk (sólo Cu)	Indefinido (es decir, no generador de ácidos)
PP8, >75 µm	Indefinido (es decir, no generador de ácidos)
PP8, 25-75 µm	Indefinido (es decir, no generador de ácidos)
PP8, <25 µm	Indefinido (es decir, no generador de ácidos)
PP29, bulk (Mineral de Cu-Zn)	Indefinido (es decir, no generador de ácidos)
PP29, >75 µm	Indefinido (es decir, no generador de ácidos)
PP29, 25-75 µm	Indefinido (es decir, no generador de ácidos)
PP29, <25 µm	Indefinido (es decir, no generador de ácidos)
Metcom 101, sólo Cu	15
Metcom 102, Mineral de Cu-Zn	9

V.4.5. Pruebas de Lixiviación

Dos pruebas de lixiviación, con agua destilada y ácido diluido (0.1N HCl) como medios de lixiviación, se han aplicado a 13 muestras simples y compuestas no incluidas en la prueba de celda húmeda. Las pruebas se completaron según el "Procedimiento para la Extracción de Lixiviados Modificada por Reg. 63/88" recomendada por el Ministerio del Medio Ambiente de Columbia Británica para la evaluación de desechos sólidos, salvo que se usara una relación sólida a líquida de 1 a 10. La química de los lixiviados en agua destilada podrá dar una indicación de la calidad del agua procedente de la precipitación natural después de reaccionar con los depósitos de desechos de Antamina. Los resultados de la prueba de lixiviación en ácido diluido indicarán la cantidad máxima posible de metales que pueden ser movilizados en DAR con un pH de 1.

Los resultados completos de las pruebas de lixiviación se proporcionan en el Anexo V-I. Los parámetros de interés potencial identificados en la prueba de lixiviación de agua destilada se dan en la Tabla V-9 y la cantidad de metales que pueden ser movilizados de las muestras de prueba bajo diferentes condiciones de lixiviación se encuentran en la Tabla V-10. Como algunas de las muestras sometidas a prueba son enriquecidas en sulfuro soluble en ácidos, los correspondientes lixiviados de ácidos muestran contenidos muy altos de metales disueltos. Contenidos anómalos de metales disueltos en los lixiviados de agua destilada con pH casi-neutro, por otro lado, sugieren la presencia de productos solubles del intemperismo como sulfatos, carbonatos hidróxilos, etc. en las muestras de prueba.

De acuerdo con los datos resumidos en la Tabla V-9 y Tabla V-10, es evidente que el Cu, Zn, Cd y Mn constituyen la serie principal de metales pesados que pueden ser fácilmente liberados al medio ambiente como resultado de la lixiviación de metales. Debido al nivel extremadamente bajo de Ni permitido por los criterios de calidad de agua del Perú (2µg/L), el Ni puede también convertirse en un elemento de interés, especialmente si el drenaje se vuelve ácido. El Mo es aparentemente móvil en condiciones alcalinas, aunque no existen todavía criterios reglamentarios establecidos en el Perú para este elemento. A pesar de que el Pb y el Se ocasionalmente se detectan en los lixiviados, sus concentraciones son tan bajas que cualquier dilución in-situ los convertiría en inofensivos. Mientras que algunas muestras de prueba presentan un contenido elevado de As, el elemento aparentemente no es fácilmente lixiviado.

Tabla V-9 Parámetros de Interés Potencial Identificado en Lixiviados de Agua Destilada

<u>Descripción de las Muestras</u>	<u>Parámetros de Posible Interés</u>
1. Compuesto de 4 sobrecapas	Cu, Mn, Ni
2. Sobrecapa con alto PN	Mo
3. Compuesto de 3 skarns granate marrón oxidados	Cd, Ni, Se

4. Compuesto de 2 skarns granate verde oxidados	Cd, Cu, Mn, Ni, Se
5. Compuesto de 2 muestras de sulfuro masivo	Mn, Ni, Zn
6. Monzonita rica en magnetita	ninguno
7. Mármol con alto PN no carbonatado	pH (demasiado alto)
8. Compuesto de 5 skarns retrógrado	Mn, Ni
9. Compuesto de 2 skarns clorito	Mn
10. Compuesto de 2 óxidos/sobrecapa	pH (demasiado alto), Cu, Mn, Ni
11. Mezcla de un skarn y una sobrecapa	Mn, Ni, Se
12. Mineral oxidado (Metcom 4, alimentación en el banco de celdas)	Mn, Ni, Cd, Mo, Se
13. Mineral oxidado (Metcom 5, alimentación en el banco de celdas)	Mn

Después de una lectura cuidadosa de los datos presentados en la Tabla V-10, es evidente que la lixiviabilidad del metal no se correlaciona necesariamente con la concentración de metal en una muestra. El modo de ocurrencia del metal de interés y la matriz mineral de una muestra son factores más importantes que controlan la lixiviabilidad del metal. Por ejemplo, aunque el mármol con un alto PN no carbonato (Muestra 7) contiene 13.7% de Zn, sólo una fracción muy pequeña es soluble en agua (0.3µg/g). En contraste, los sulfuros masivos con 2.6% de Zn (Muestra 5) presenta un contenido de Zn soluble en agua dos órdenes de magnitud más alto (70µg/g). A pesar de que la mayoría de los materiales oxidados contienen una concentración relativamente alta de metales lixiviables, no se encuentran comúnmente concentraciones elevadas de metal disuelto en el drenaje actual del lugar. El drenaje del agua de las actuales galerías de exploración, al extremo sur de la Laguna Antamina, tampoco es enriquecido con metales disueltos. Estas observaciones sugieren que las pruebas de lixiviación han sido efectuadas en condiciones más agresivas que las que existen en el campo. Así, los resultados de las pruebas de lixiviación, probablemente representa el peor escenario con respecto a la lixiviación potencial de metal asociado al proyecto minero.

Tabla V-10 Comparación de Metales Lixiviables (Seleccionados) con contenido de Metal de las Muestras.

DESCRIPCION DE LAS MUESTRAS		SOLUBLE EN AGUA	0.1 N HCL EXTRAIBLE	AGUA REGIA EXTRAIBLE
		µg/g	µg/g	µg/g
1. Compuesto de 4 sobrecapas	Cu	18.1	1810	6546
	Mn	5.3	133	761
	Zn	44.1	120	630
2. Sobrecapa con alto PN	Cu	0.09	143	3700
	Mo	1.6	0.02	203
	Zn	0.4	371	5820
3. Compuesto de 3 skarns granate marrón	Cd	0.15	2.9	26
	Cu	0.63	551	5192
	Zn	16.1	259	4082
4. Compuesto de 2 skarn granate verde	Cd	0.09	1.1	5.25
	Cu	90.3	9500	11660
	Zn	24.5	546	2175
5. Compuesto de 2 sulfuros masivos	Ag	0.0036	0.0046	9

	Cu	1.43	31.4	8730
	Mn	2.2	48	820
	Ni	0.21	2	290
	Zn	70	2170	26100
6. Monzonita rica en magnetita	Cu	0.012	8.74	5120
	Mn	0.46	250	800
	Zn	0.07	29.4	9120
7. Mármol con alto PN no carbonatado	Cd	0.0011	0.21	278
	Cu	0.046	4.56	10600
	Mn	0.21	530	2790
	Zn	0.3	112	136600
8. Compuesto de 5 skarns retrógrados	Cu	0.031	14.3	8052
	Mn	1.5	880	1402
	Zn	0.04	9.1	265
9. Compuesto de 2 skarns clorita	Cu	0.03	14.3	15400
	Mn	8.6	870	2988
	Zn	0.34	77	615
10. Compuesto de 2 óxidos/sobrecapa	Cu	10.5	219	6685
	Mn	9.6	61	403
	Ni	0.056	0.25	1
	Zn	3.85	45.5	779
11. Mezcla de 1 skarn y 1 sobrecapa	Cd	0.098	1.6	5.25
	Cu	2.47	485	9930
	Mn	5.2	160	730
	Ni	0.027	0.66	255
	Zn	16.8	602	2285
12. Metal oxidado (Metcom 4, alimentación en el banco de celdas)	Cd	0.123	not tested	10.5
	Cu	2.18	not tested	>10000
	Mn	17.5	not tested	1980
	Mo	1.34	not tested	262
	Ni	0.053	not tested	136
	Zn	17.4	not tested	>10000
13. Mineral parcialmente oxidado (Metcom 5, alimentación en el banco de celdas)	Cd	0.0225	not tested	41
	Cu	0.113	not tested	>10000
	Mn	2.65	not tested	2370
	Mo	0.0822	not tested	340
	Ni	0.012	not tested	155
	Zn	0.79	not tested	>10000

V.4.6. Modelaje Geoquímico

Para una mejor comprensión de los procesos geoquímicos que se efectúan en las celdas húmedas y para fomentar confiabilidad en las predicciones, las interacciones químicas entre el agua destilada o meteórica y los dos compósitos de monzonita, el compuesto de skarn verde granate y los relaves fueron simulados empleando el Código de modelaje geoquímico EQ 3/6. Los detalles de los ejercicios de modelaje y los resultados del intemperismo simulado se indican en el Anexo V-III. A pesar que las simulaciones por computadora no reproducen exactamente la química de los lixiviados observados en las celdas húmedas, reafirmaron el prolongado intervalo de retardo para que la generación ácida ocurra con muestras de monzonita, skarn y muestras de relaves. Además, las simulaciones proporcionan tres observaciones importantes que presentan serias implicancias en la interpretación de los resultados de las pruebas con celdas húmedas. Estas se analizan brevemente a continuación:

- ☒ La importancia del área superficial reactiva disponible para controlar el progreso de reacciones químicas y así la generación de ácidos y lixiviación de metales. Para los compuestos de desechos, el tamaño granular es considerablemente más pequeño que el de los desechos en una pila de roca de desmonte. De ahí que los resultados de las pruebas de humedad celular representan el peor escenario en lo que concierne a la lixiviación de metales. Dado el hecho de que una típica pila de desechos de desmonte en una mina de metales contiene sólo 4-10% de finos (i.e., partículas de diámetro <6mm como el tamaño más grande), puede esperarse un porcentaje de carga de metal de un orden de magnitud menor a la medida en la prueba de celdas húmedas.
- ☒ Para los relaves bajo condiciones de campo, sólo la capa superior de un depósito de relaves es susceptible al intemperismo, especialmente si los sólidos de relaves permanecen saturados con agua. El aumentar las tasas de carga de metales en base a las pruebas de celdas húmedas para todo el depósito de relaves estrictamente en base a una relación de masa proporcional, puede fácilmente conducir a una sobreestimación de la liberación de metales.
- ☒ La ocurrencia de reacciones geoquímicas que pueden atenuar efectivamente el transporte por agua de metales en una solución acuosa dependiendo del tiempo de residencia de un líquido que se infiltra en un depósito de desechos. Una de las razones primarias para el mayor intervalo de retardo para la generación neta de ácidos y un menor porcentaje de lixiviación de metales en las simulaciones por computadora relativa a las observadas en la prueba de celda húmeda es la disposición de ácidos reactivos para influenciar la composición del líquido dada cualquier duración sustancial de contacto (i.e., mayor a un día). En esta situación, la abundancia y naturaleza reactiva de los minerales neutralizadores de ácido (incluyendo los carbonatos) que se dan en las muestras de prueba conducen a la rápida co-precipitación de muchos metales comunes liberados. Esto ni siquiera incluye una posible absorción de los metales potencialmente nocivos en la precipitación de oxi-hidróxidos de hierro tal como se ilustra en la Figura V-8.
- ☒ Así, las tasas de carga derivadas de la prueba de celda húmeda representa estimaciones conservadoras de lixiviación de metales. En consecuencia, se debe tener cuidado al interpretar las estimaciones potenciales de impacto en el medio ambiente receptor en base a una extensión simple de los resultados de pruebas de celda húmeda a través del modelo de dilución. Es posible que ocurra una sobreestimación de la verdadera liberación de metales en las condiciones del campo.

Simulación PHREEQC: Adsorción de cobre y zinc en la superficie de goetita secundaria producida durante el intemperismo de desechos (LOMP1) en Antamina.

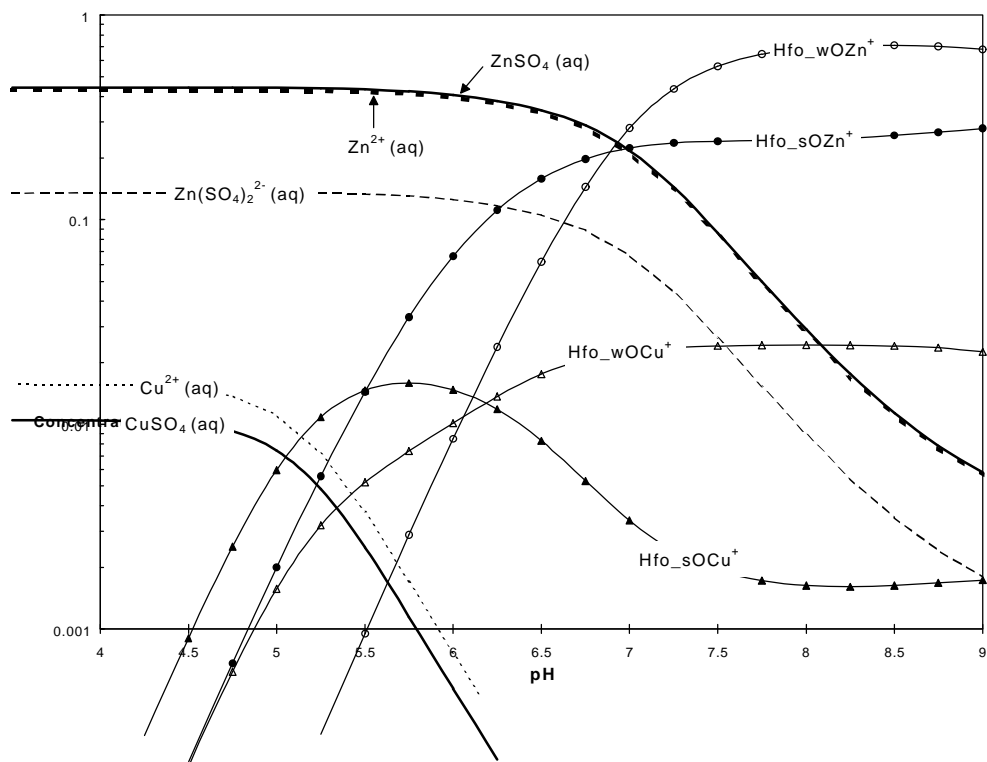


Figura V-8 Atenuación del Transporte Acuoso de Cu y Zn mediante Adsorción en Goetita Secundaria Calculado por el Código de Modelaje Geoquímico PHREEQC

V.4.7. Derivación de Indicadores Substitutos del DAR y Potencial de Lixiviación de Metales

Mientras que sólo 227 muestras de roca de Antamina han sido analizadas para determinar sus características BAB, los datos geoquímicos se encuentran disponibles en forma de análisis de registro de metal ICP para un amplio número de muestras (>16,000 en Julio de 1997) que cubren todo el yacimiento. Si puede establecerse una relación firme entre las características BAB de una muestra y sus constituyentes químicos, los datos geoquímicos pueden ser directamente empleados para diferenciar una roca potencialmente generadora de ácido de una benigna. Ampliando los resultados a todo el modelo de bloque para el depósito, la cantidad de desechos de la mina propuestos con alto potencial para la generación de ácidos y lixiviación de metales puede ser calculada fácilmente. Esto también servirá para compensar cualquier deficiencia percibida en el muestreo para el análisis BAB. Así, se consideraron los siguientes pasos para derivar un indicador sustituto de DAR para el yacimiento de Antamina:

- ▣ Se revisaron los datos geoquímicos y de BAB disponibles en detalle junto con la información disponible sobre mineralogía para identificar parámetros de interés potencial.
- ▣ Los datos de las pruebas BAB y del barrido de metales mediante equipo ICP para las 227 muestras de minerales y desechos seleccionados para varios análisis fueron asimiladas en una hoja de cálculo combinada para facilitar referencia y diagramas de parámetros seleccionados para demostrar sus interrelaciones, si es que hubieran.
- ▣ Los parámetros químicos que podrían reflejar ciertas características de BAB de una muestra fueron diagramados comparándose cada uno de ellos para dilucidar su interrelación. En el caso de concentraciones de metal que excedían los límites de detección superiores e inferiores, los valores reportados se ajustaron de acuerdo con la composición química probable de los minerales emplazados. El parámetro químico que podría separar mejor las muestras generadoras de ácido de las no generadoras de ácidos de acuerdo con los datos de BAB fue luego seleccionado como el indicador sustituto DAR para el yacimiento Antamina.

Después de algunas pruebas en curso, se descubrió pronto que la relación de los metales en lugar de las concentraciones de metales prometían más como potenciales indicadores de DAR. Se descubrió que el parámetro que mejor podría segregar las rocas potencialmente generadoras de ácidos de las no generadoras de ácidos, era la proporción en peso de Fe/Ca. Tal como se muestra en la Figura V-9, todas las muestras con una relación Fe/Ca menor que 0.7 (en peso) presentan un potencial neto positivo de neutralización (PNN) y así, en teoría es un no generador de ácidos. Si se toma un valor de $PNN \pm 20 \text{ kg/t CaCO}_3$ como en la zona de incertidumbre, la Figura V-8 proporciona los mismos resultados que en la Figura 4-1 en la categorización de muestras de acuerdo con su potencial de generación de ácidos. Por lo tanto, la relación del metal Fe/Ca=0.7 en peso (que se traduce a una relación molar de 1:2) es un indicador sustituto funcional de DAR para las rocas de Antamina.

Debe señalarse que al preparar la Tabla V-8, ninguno de los valores Ca que reportaron haber excedido el límite superior de detección (>15 o >30% dependiendo del laboratorio que produzca los resultados) para los análisis ICP se establecieron al 30%; asimismo, el hierro que exceda el límite superior de detección ICP (>15%) ha sido establecido al 20%. Mientras tal manipulación de datos dificulta la demostración de una relación lineal entre PNN y la relación de Fe/Ca en peso, no cambia el resultado de la clasificación de rocas de acuerdo con el potencial de DAR. Esto se debe a que la alta concentración de Ca y alto contenido de Fe son de manera mutua exclusivos de las rocas de Antamina. Ninguna de las 227 rocas tienen concentraciones ni de Ca ni de Fe que simultáneamente excedan sus límites superiores de detección de ICP.

Desde una perspectiva teórica, el empleo de relación de peso de Fe/Ca como parámetro discriminante para identificar material potencialmente generador de ácidos puede ratificarse fácilmente. El hierro es uno de los constituyentes esenciales de los sulfuros generadores de ácidos como la pirita, pirrotita y calcopirita. La hidrólisis del hierro liberado en solución puede también producir ácidos. La neutralización de ácidos por materiales geológicos, por otro lado es efectuada mediante la reacción (por reemplazo) de metales alcalinos y alcalinotérreos con iones de hidrógeno. El calcio es el metal alcalino predominante en las rocas de Antamina. Así, no sorprende que la relación del peso de Fe/Ca deba reflejar el potencial de generación de ácidos de una muestra de roca proveniente de Antamina.

Para investigar posteriormente la validez de la relación de peso de Fe/Ca como indicador sustituto de DAR, la relación se diagrama y compara con el RPN (=PN/APM) en la Figura V-10. Sólo una muestra con una relación de peso de Fe/Ca marginalmente menor que 0.7 (0.68) presenta un NPR menor a 1 (i.e., potencial generador de ácido). Otras nueve muestras con relación de peso de Fe/Ca menor que 0.7 también muestran un RPN de 1.5 a 3.0 sugiriendo un incierto potencial de generación de ácidos. Por otro lado, hay al menos diez muestras con una relación de peso de Fe/Ca de más de 0.7 que presenta un RPN mayor que 3.0 (i.e., no generador de ácidos). Estas observaciones sugieren que la relación de peso de Fe/Ca no es un parámetro universal que se aplique igualmente bien a todos los tipos de desechos. Se espera encontrar predicciones menos precisas con muestras en las que la mayoría de hierro soluble en ácido ocurra en óxidos en vez de sulfuros y los metales alcalinotérreos en silicatos en vez de carbonatos. La relación de peso de Fe/Ca de 0.7 es un indicador sustituto conservador de DAR para las rocas de Antamina; tiende a sobreestimar la abundancia de materiales potencialmente generadores de ácidos de los que en realidad existen en Antamina

En conclusión, para los propósitos de planeamiento, la incorporación de la relación de peso de Fe/Ca en el modelo del bloque del depósito permitirá una estimación conservadora de la cantidad de desechos potencialmente generadores de ácidos que serán producidos en el proceso de explotación. Ayuda a ampliar la base de datos sobre BAB. Durante el minado, la aplicación de la relación de peso de Fe/Ca debe ser validada en el campo con estimaciones visuales de contenido de sulfuro y abundancia de minerales con significativo potencial de neutralización.

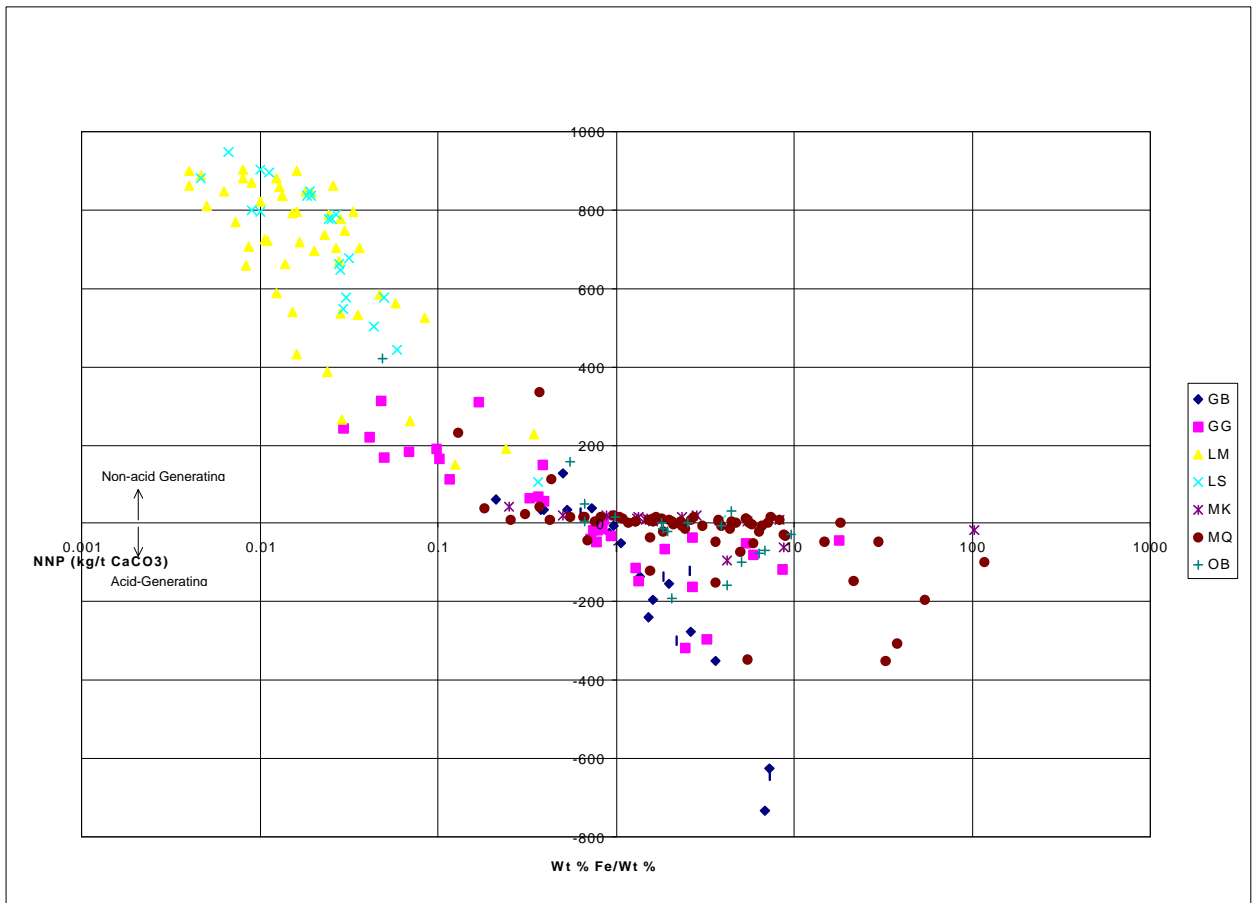


Figura V-9 Diagrama de la Relación de Potencial de Neutralización (RPN, =PN/APM) frente a la relación de Peso de Fe/Ca para la serie de Desechos de Antamina

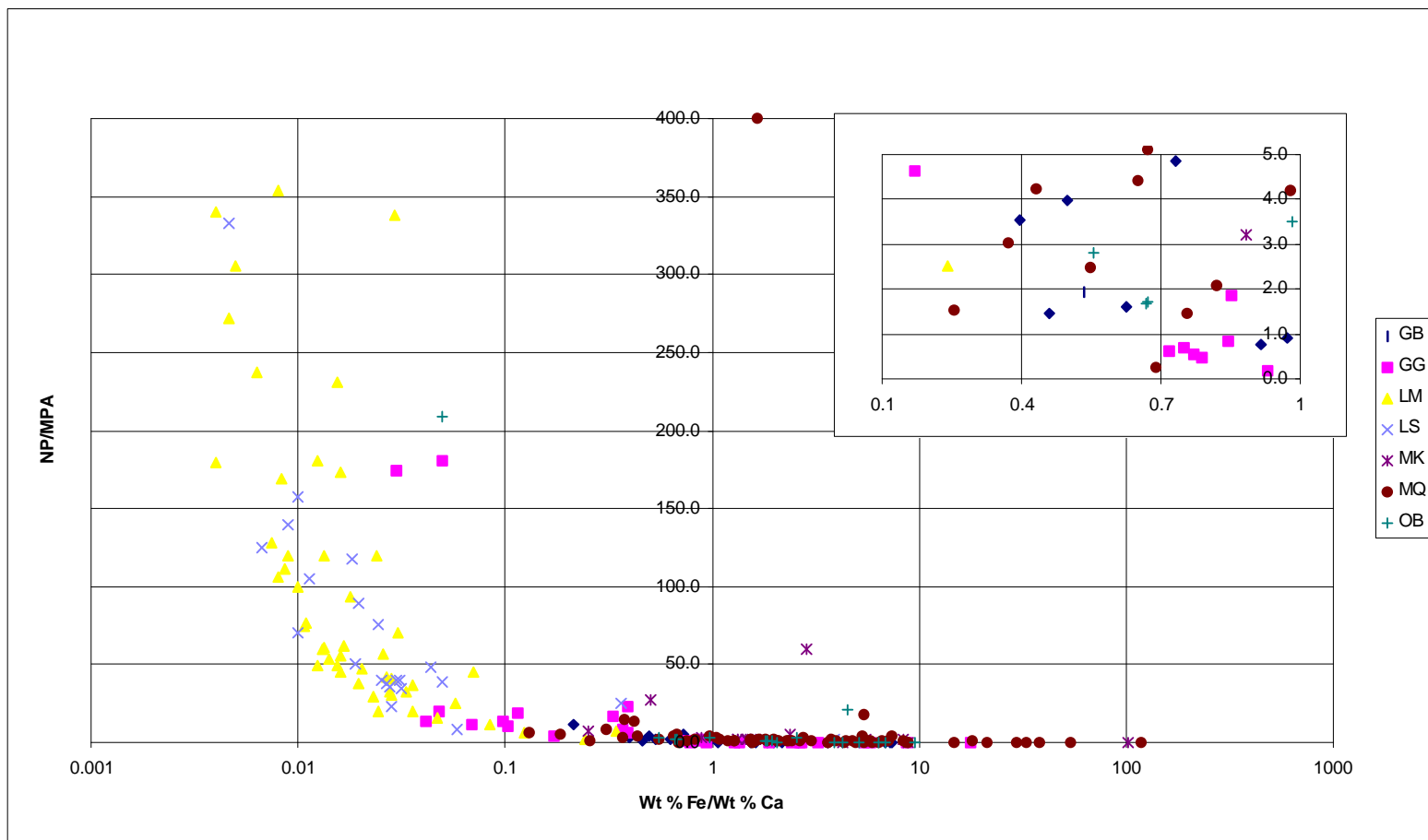


Figura V-10 Plot of Neutralization Potential Ratio (NPR,= NP/MPA) versus Fe/Ca Weight Ratio for the Antamina Waste Rock Suite.

V.5. Análisis

Se deriva de la presentación anterior que el yacimiento Antamina posee un potencial bajo de generación de ácidos y lixiviación de metales comparado a muchos de los depósitos de metal ricos en sulfuro. Mientras que algunos desechos que contienen sulfuros mixtos son capaces de liberar metales potencialmente nocivos al medio ambiente, el intervalo de retardo para la generación neta de ácidos y lixiviación ampliada de metales es suficientemente prolongado para permitir el desarrollo de estrategias adecuadas de rehabilitación con el fin de minimizar el impacto potencial. Según el tamaño de los cuerpos minerales de Antamina (500 millones de toneladas), grandes cantidades de desechos (1.85 mil millones de toneladas) se generarán en el proyecto minero. La identificación apropiada de desechos reactivos y el manejo efectivo de desechos son pre-requisitos para el mantenimiento de la salud ambiental en Antamina y áreas aledañas. Estos temas se analizan a continuación seguidos de algunas recomendaciones para investigaciones posteriores.

V.5.1. Reactividad de los Potenciales Desechos Propuestos de Antamina

Aunque el yacimiento Antamina contiene elementos (principalmente Mn, Mo y Zn) que son móviles en condiciones casi-neutrales hasta pH ligeramente básico, se ha mostrado previamente (Figura V-1) que el contenido de metal disuelto en las áreas de drenaje de agua con depósitos de tipo skarn rico en sulfuro presenta una relación inversa con el pH. De ahí que, si la "reactividad" de un tipo de desecho es definida en términos de susceptibilidad para liberar metales potencialmente nocivos en el medio ambiente por intemperismo químico, entonces, con algunas excepciones, existe una pequeña diferencia entre los términos "reactivo" y "generador potencial de ácidos". Es en este contexto que se discute la reactividad de los principales tipos de desechos resultantes del minado del tajo abierto propuesto del yacimiento Antamina.

V.5.1.1. Desechos

En base a los resultados de la prueba de BAB, los desechos potencialmente generadores de ácidos en Antamina incluyen una gran proporción de monzonita con contenido de sulfuro y menores cantidades de skarn de baja ley, mármol rico en sulfuro y caliza. La aplicación del indicador sustituto del DAR de $Fe/Ca > 0.7$ posteriormente ayudará a identificar rocas potenciales generadoras de ácidos en ausencia de datos sobre BAB. Sin embargo, tanto el análisis BAB como el análisis por ICP fueron efectuados en una muestra pulverizada. Dependiendo de la competencia del tipo de roca de interés y el modo de ocurrencia de los sulfuros prevalecientes, muchos de los sulfuros que ocurren en los desechos puede ser ocluidos del intemperismo cuando se disponga en un depósito de desechos. Una prueba más amplia de lixiviación a escala de columnas proporcionaría mejores datos para esta evaluación.

Debido a que el zinc, una vez liberado en solución, permanece bastante móvil dado un valor de pH menor que 8, existe la preocupación de que el mármol y la caliza con contenido de esfalerita puedan convertirse en una fuente de contaminación de zinc en Antamina. En base a la química del agua reportada en áreas con depósitos de tipo

skarn rico en sulfuro, las observaciones del campo sobre la atenuación de zinc en cursos de agua que drenan a terrenos de carbonato y en base al marco teórico de la ineficiente oxidación galvánica de sulfuros que ocurre en el agua neutralizada por carbonatos, se ha argumentado que la esfalerita incrustada en caliza no se oxidará fácilmente para liberar zinc (véase Anexo V-IV). Sin embargo, como la caliza constituye la mayoría (90%) de los desechos de Antamina, puede ser útil efectuar investigaciones posteriores para justificar esta tesis.

Debido a la acumulación de productos de oxidación soluble, el material de cubierta y el mineral oxidado que yacen en Antamina, si no se encuentra procesado, constituirá una categoría separada de los desechos reactivos sin tener en cuenta su contenido de sulfuro. Sin embargo, como lo comprobó la química del agua de superficie de la línea de base en el lugar, no es probable que el transporte acuoso de los metales solubles proceda si el agua que drena los materiales contiene alta alcalinidad de carbonato. La atenuación del transporte de metales comunes por precipitación de una especie con contenido de carbonato es altamente favorecida por la situación.

V.5.1.2.Relaves

Con el mineral de Antamina que ocurre principalmente en forma de sulfuro y muy asociada a la ganga de sulfuro de hierro, no es sorprendente que la mayoría de los relaves en prospecto producidos por la molienda de diferentes variedades de mineral en el depósito sean potenciales generadores de ácidos (Tabla V-8 y Tabla V-9). Aunque las muestras compuestas de relaves sujetas a la prueba de celda húmeda no puede verdaderamente representar a los relaves a producirse durante la operación minera, los resultados indican que en presencia de minerales con significativa capacidad de neutralización de ácidos, el intervalo de retardo para la producción neta de ácidos con depósitos de relaves puede ser mayor que 100 años. Los resultados preliminares de la prueba de celda húmeda de relaves de Cu-Zn típico también proporcionan un intervalo de retardo de DAR mayor que 30 años (Tabla V-7). Este prolongado intervalo de retardo permitirá una amplia oportunidad para trazar apropiadas estrategias de abandono de manera que se controle el DAR. Los resultados de un número limitado de pruebas cinéticas de GNA efectuados con relaves que contienen menos del 5% del total de sulfuro-S podrían no conducir a la generación neta de ácidos debido a la cinética de reacción lenta. Los sulfuros parecen ocurrir principalmente en la sección de tamaños más finos de los relaves. Ya que la distribución de sulfuros en los relaves varía con el tamaño de grano, tal vez valga la pena efectuar más trabajo de pruebas para determinar el nivel crítico del contenido de sulfuro que posiblemente produzca DAR.

Aunque la formación rápida de DAR podría no ocurrir fácilmente con los relaves de Antamina, la lixiviación selecta de metales móviles tales como Mn y Zn sigue siendo de consideración. Por ejemplo, a lo largo de las 30 semanas de prueba de celdas húmedas de la muestra compuesta de relaves, el pH del lixiviado se ha mantenido

alrededor de 8, pero las concentraciones de Zn detectables también han sido consistentemente medidas. Este último resultado se traduce a una tasa de carga de aproximadamente 0.02 mg de Zn por Kg de relaves por semana. La tasa de carga de Zn calculado posiblemente representa el límite superior de liberación de los relaves con una composición similar a la muestra de prueba.

V.5.1.3. Tasa de Lixiviación de Metales

Las tasas de carga de metal derivadas de la prueba de celdas húmedas en la Tabla V-7 presentan una apreciación del comportamiento potencial de lixiviación de metales de desechos propuestos a ser producidos por el Proyecto Antamina. Se dan dos estimaciones: la tasa de enjuague inicial que corresponde a la lixiviación de metales observada en las dos primeras semanas de prueba y la media subsecuente es el promedio aritmético de las tasas de liberación de metales observadas en las semanas subsecuentes. Los datos sobre el enjuague inicial pueden interpretarse para representar la liberación potencial de metales a partir de desechos expuestos al aire libre mientras las medias subsecuentes reflejan las consecuencias de prolongado intemperismo. El último grupo de números ha sido empleado para el desarrollo de la predicción completa de carga de metales en el lugar en base al balance de agua (Anexo V-IV).

Al igual que los resultados de muchos experimentos de laboratorio sobre intemperismo de minerales, las tasas de liberación de metales derivados del programa de celdas húmedas probablemente sobreestimen la liberación de metales debido a que las condiciones del campo y la calidad de agua lixiviada de las pruebas cinéticas de laboratorio no pueden ser empleados directamente para predecir la calidad de agua. La dificultad para definir con exactitud el área de superficie reactiva de los reactantes es una de las principales causas de discrepancias observadas entre las tasas de intemperismo medidos en el campo y el laboratorio. En base a las comparaciones de muchos estudios de campo y de laboratorio, White y Peterson (1990) demostraron que el área de superficie reactiva de la mayor parte de los minerales es muy inferior al área de la superficie física y las tasas de intemperismo de campo son habitualmente algunos órdenes de magnitud más lentas que las tasas obtenidas en el laboratorio. En general, el medio del laboratorio (temperatura constante, humedad, entre otros) facilita el intemperismo acelerado relativo al que ocurre en el campo. Así, en el modelaje de la calidad de agua del lugar empleando un estudio de carga de masa, las cargas de masa derivadas de la prueba en celdas húmedas son ampliadas al tamaño total aplicando factores apropiados para explicar los grados de infiltración de las estaciones, tamaño de partículas, temperatura, escorrentía, evaporación, remojo/encauce, etc. Sin embargo, debido a la falta de datos disponibles, la atenuación del transporte de metal acuoso como resultado de interacciones agua-roca no ha sido considerada. Por lo tanto, las predicciones de calidad de agua son inherentemente conservadoras por naturaleza. La verdadera calidad de agua podría ser mucho mejor que la predicha.

V.5.2. Consideraciones para el Manejo de Desechos

En base a la revisión sumaria de impactos ambientales reportados de depósitos de tipo skarn rico en sulfuro, las condiciones de línea de base de Antamina y los resultados de todas las pruebas geoquímicas, cinéticas y estáticas así como el modelaje geoquímico efectuados hasta la fecha, es justo concluir que el Proyecto Antamina corre un riesgo relativamente bajo de convertirse en una fuente significativa de contaminación de metales. A pesar de la ocurrencia local de materiales geológicos altamente reactivos, la abundancia de materiales neutralizadores de ácido en los alrededores inmediatos ha limitado en gran manera el grado de lixiviación de metales y transporte en el medio acuoso. Con el inicio de la operación minera, grandes cantidades de material mineralizado en grado variado y no en equilibrio con la atmósfera será expuesto y sometido al intemperismo químico. El desafío del programa para el manejo efectivo de los desechos es cómo imitar el trabajo de la naturaleza en la supresión de la lixiviación intensa de metales que ha sido observada en el lugar hasta la fecha. Algunos temas importantes son brevemente analizados a continuación:

- ▣ *Desechos:* Tres observaciones efectuadas durante los ejercicios de evaluación de DAR en el campo y laboratorio presentan implicaciones en las prácticas de manejo de desechos:

La variación temporal en la química de lixiviados observados en la prueba de celdas húmedas indican que el enjuague inicial de rocas expuestas al aire libre generalmente liberan más metales que durante el intemperismo subsecuente. Si se demuestran que las tasas de aporte de metal son inaceptables para la descarga directa al medio receptor del líquido que percola a través de los depósitos de desechos, se instalarán sistemas de recolección de agua para cumplir con las necesidades de tratamiento. Después del cierre, la tasa de liberación de metales reducida debido a la ausencia de DAR puede convertir el sistema de recolección de agua en redundante.

Debido a que Antamina se encuentra rodeada por caliza, el agua que drena el lugar por lo general se caracteriza por una alta alcalinidad por carbonato. Ya que los depósitos de desechos están al menos parcialmente rodeados por terrenos de carbonato, no deberían tal vez ser delineadas para permitir la percolación de agua (especialmente agua subterránea anóxica) con alta alcalinidad de carbonatos. Esto contribuirá a la neutralización de generación local de ácidos y facilitará la atenuación del transporte de metal acuoso.

Debido a que la roca sulfídica de tamaño fino de partícula se intemperiza más rápidamente que sus contrapartes de mayor tamaño, si de alguna manera es posible, los materiales deleznable sulfídicos o de grano fino que puedan ser aislados de manera fácil durante la operación minera deben tratarse como desecho especial.

Pueden localizarse temporalmente cerca al tajo abierto en áreas apropiadas de almacenamiento para su eventual disposición subacuosa en el tajo final después del cierre de la mina.

- ▣ *Relaves*: El plan de disposición de relaves actual es para mantener una laguna cerca de la presa y para varar relaves. Playas más grandes podrían aumentar los aportes de metales y reducir la degradación de cianuro. Las tasas de lixiviación de metales del relave depositados en los bordes son bajas y parece existir flexibilidad para variar los tamaños de la playa y de la laguna de tal manera que se cumpla con los requisitos operacionales. Esto será confirmado durante la operación del depósito.
- ▣ *Implicancias del intervalo de retardo para la generación de ácidos*: El prolongado intervalo de retardo para la generación de ácidos identificados en la prueba de celdas húmedas tanto de las muestras de desecho como de relaves indica la probabilidad de una lixiviación de metal intensa en la mayoría de los desechos durante la operación. Este largo intervalo de retardo permitirá amplias oportunidades para desarrollar medidas preventivas apropiadas para minimizar o eliminar la generación de ácidos y la lixiviación de metales durante la operación y después del cierre de la mina. También permitirá la flexibilidad de poseer planes de contingencia desarrollados para enfrentar contratiempos en lugar de poseer instalaciones para posible tratamiento.
- ▣ *Conciencia Ambiental de los Mineros*: La mayor parte de los legados ambientales que dejaron atrás las antiguas actividades mineras pueden deberse a la falta de conocimiento ambiental como a la práctica negligente. Es esencial brindar una educación apropiada a los mineros para el adecuado manejo de los desechos. Existen numerosas señales de que el personal del campo pueda aprender a emplear e identificar materiales geológicos reactivos. Sólo cuando los mineros estén totalmente conscientes de la importancia de las prácticas ambientales concertará esfuerzos para ejecutar con seriedad un plan bien diseñado para el manejo de desechos mineros..

V.5.3. Trabajos Posteriores Recomendados

El enfoque original del programa de evaluación de DAR recaía en la caracterización de los desechos. Para cubrir las necesidades del plan de explotación de la mina que rápidamente evoluciona, el propósito del programa ha sido constantemente revisado para incorporar trabajo de pruebas adicionales a modo de facilitar la predicción de potenciales impactos ambientales. Sin embargo, no todos los temas importantes son

adecuadamente tratados a la fecha. Con el objetivo de facilitar el manejo adecuado de los desechos durante la operación, se recomiendan trabajos posteriores en las siguientes áreas:

- ▣ Para confirmar posteriormente las estimaciones de lixiviación de metales en caliza con contenido de sulfuro, deberán llevarse a cabo análisis adicionales. Debido a que se requiere información sobre el grado y tasa de lixiviación de metales, se recomienda una especie de prueba cinética, tal como la prueba de columnas. Una investigación del campo en la Mina Contonga, adyacente a Antamina puede también proporcionar datos del campo útiles para complementar el trabajo de prueba en el laboratorio.

Aunque los datos de pruebas cinéticas y estáticas adquiridas a la fecha permitirá una estimación aproximada de la generación de ácidos y la lixiviación de metales de varios tipos de rocas, no se ha concertado esfuerzo para evaluar el grado de formación de DAR y lixiviación de metales de las paredes del tajo abierto propuesto de Antamina y predecir la calidad de agua del consecuente lago del tajo. Para adquirir datos importantes sobre las verdaderas condiciones del campo, el programa de evaluación propuesto deberá incluir dos componentes:

una revisión detallada de la química del agua y del sedimento del Lago Antamina tal como existe en la actualidad junto con el mapeo del campo sobre los efectos del intemperismo en las formaciones de rocas cercanas al lago; y,

una investigación detallada de las interacciones agua-roca que ocurre en la mayoría de las galerías de exploración excavadas en diferentes tiempos en el lugar. Como es esencial una delineación detallada de las diferentes unidades de rocas y una comprensión total de las interacciones agua-roca para la evaluación, se recomienda que la investigación sea efectuada por un geoquímico junto con un geólogo minero.

- ▣ Para contribuir al desarrollo de las estrategias de disposición de relaves que sean económicas y no nocivas para el ambiente, se recomienda más pruebas cinéticas con relaves ricos en sulfuro para determinar el contenido de sulfuro crítico que puede conducir a la generación neta de ácidos. La investigación deberá incluir la validación de predicciones de pruebas cinéticas de GNA tal como se aplica en Antamina. Si prueba ser aceptable, la prueba cinética de GNA puede proporcionar un método eficiente y económico para identificar los relaves reactivos para el Proyecto Antamina.

- ☒ Mientras que la relación Fe-Ca puede ser un eficaz indicador sustituto del potencial de DAR para los materiales geológicos que ocurren en Antamina, no refleja directamente el potencial para la lixiviación de metales. Un programa deberá ser desarrollado para buscar indicadores similares para el potencial de lixiviación de metales seleccionados de interés ambiental.
- ☒ Para facilitar el manejo de desechos y para contribuir a crear conciencia ambiental en el personal de la mina, deberá desarrollarse una lista de los indicadores de campo de potencial generación de DAR y lixiviación de metales. La lista contribuirá a la separación de materiales geológicos reactivos de los no reactivos. Un plan actual sobre manejo de desechos puede desarrollarse después para almacenar de manera segura los desechos reactivos. Durante la operación minera, se recomienda que se organicen talleres frecuentes para actualizar a los mineros sobre los procedimientos para el manejo de desechos..

V.6. Conclusiones

El trabajo de prueba de DAR continua y se han iniciado análisis complementarios. Las conclusiones principales que pueden extenderse basadas en los datos adquiridos hasta la fecha incluyen:

- ☒ En comparación con la mayoría de los depósitos de metal, la mineralización que alberga depósitos de tipo skarn como Antamina presenta un bajo potencial para generar drenaje ácido de roca o convertirse en una fuente de contaminación de metal, aunque pueda ser rica en sulfuro.
- ☒ Entre los seis tipos principales de desechos que existen en Antamina, la caliza, el mármol y la mayor parte de skarn verde granate son no generadores de ácidos; gran parte del skarn marrón granate y material de cubierta son potenciales generadores de ácidos mientras la mayoría de las rocas intrusivas son potenciales generadores de ácidos o presentan un incierto potencial de generación de ácidos.
- ☒ Además de los minerales carbonatos, los calc-silicatos como volastonita, dióxido y también quizás granate, contribuyen a la capacidad de neutralización de rocas en Antamina. Los carbonatos con contenido de hierro tales como siderita y ankerita no son componentes importantes del depósito de minerales.
- ☒ La prueba cinética de desechos de Antamina indican que los desechos y relaves con $\leq 6\%$ de sulfuro-S presentan un largo intervalo de retardo

para la generación neta de ácidos (13 a >100 años) pero la lixiviación de los elementos móviles como Mn, Mo y Zn puede todavía llegar a ser de interés ambiental. Los relaves con alrededor del 10% de sulfuro-S, por otro lado, puede conducir a la formación de DAR en 9 años.

- ☒ Correlacionando las características de BAB de una muestra con sus constituyentes geoquímicos, se halla que la relación Fe/Ca en peso es un indicador sustituto funcional del potencial de DAR para rocas asociadas con el yacimiento Antamina. Cualquier muestra con una relación de peso Fe/Ca mayor que 0.7 puede clasificarse como potencial generador de ácido y el de relación menor que 0.7 puede considerarse como no generador de ácido.

- ☒ El trabajo posterior recomendado para complementar el actual programa de evaluación como preparación para la operación minera incluye:

investigación de campo y laboratorio para cuantificar la lixiviación potencial de metal en la caliza con contenido de sulfuro;

diseño y ejecución de un programa detallado para evaluar la lixiviación de metales de las paredes del tajo abierto propuesto de Antamina y la química del agua del eventual lago del tajo;

trabajo de prueba cinética adicional con relaves ricos en sulfuro para definir el contenido de sulfuro crítico para la generación de DAR y para validar las predicciones basadas en pruebas cinéticas de GNA; y,

derivar, si fuera posible, indicadores del potencial de lixiviación de metales y compilar indicadores de generación de ácidos para facilitar el manejo de desechos durante la operación.

Figura V-11 Mapa de la Geología de la Propiedad Antamina

**Figure V-12 Secciones Transversales Geológicas Seleccionadas
(insert)**

Figura V-12 Localización de Muestras de la Campaña de Muestreo de junio de 1997

REFERENCIAS

Alper, C.N. and G. Brimhall (1989). Paleohydrologic evolution and geochemical dynamics of cumulative supergene metal enrichment at La Escondida, Atamaca desert, Northern Chile. *Economic Geology*, **84**: 229-255.

CS First Boston and Macroinvest (1996): *Information Memorandum for the Antamina Copper Deposit, March 1996*. Prepared for Empresa Minera del Centro del Peru S.A. (Centromin).

Finkelman, R.B. and D.E. Griffin (1986). Hydrogen peroxide oxidation: an improved method for rapidly assessing acid-generating potential of sediments and sedimentary rocks. *Reclamation Reveg. Res.* **5**: 521-534.

Hammarstrom, J.M., B.B. Kotlyar, T.G. Theodore, J.E. Elliot, D.A. John, J.L. Doebrich, J.T. Nash, R.R. Carlson, G.K. Lee, K.E. Livo and D.P. Klein (1995). Cu, Au, and Zn-Pb skarn deposits. In: (E.A. du Bray, editor) *Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models*, U.S. Geological Survey Open-File Report 95-831, pp.90-111.

Klohn Crippen - SVS S.A. (1996): *Antamina Project Environmental Site Assessment*. Prepared for Compañía Minera Antamina S.A.

Kwong, Y.T.J. (1993): Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective. MEND Report 1.32.1.

Kwong, Y.T.J. (1995): Influence of galvanic sulfide oxidation on mine water chemistry. *Proceedings of the International Conference on Mining and the Environment, Sudbury, Ontario, May 28-June 1, 1995*; Volume 2, pp.477-483.

Kwong, Y.T.J., C.F. Roots, P. Roach and W. Kettley (1997). Post-mine metal transport and attenuation in the Keno Hill mining district, central Yukon, Canada. *Environmental Geology* **30**: 98-107.

Lakefield Research Limited (1997). *Antamina Pilot Plant Tailings Environmental Characterization and Testing*, Project No. LR7777-344. Prepared for Rio Algom, INMET, Toronto, ON.

Lawrence, J.R., Y.T.J. Kwong and G.W. Swerhone (1997). Colonization and weathering of natural sulfide mineral assemblages by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Can. J. Microbiol.* **43**: 178-188.

Levinson, A.A. (1980): *Introduction to Exploration Geochemistry (2nd Edition)*. Applied Publishing Ltd., Wilmette, Illinois.

Meyer, G.A. (1995): Tailings impoundment failure and floodplain sediment contamination along Soda Butte Creek, Yellowstone National Park, MT-WY. Geological Society of America Abstract with Programs, v.27, no.4, p.47.

Miller, S., A. Robertson and T. Donohue (1997). Advances in acid drainage prediction using the net acid generation (NAG) test. *Proceedings of the Fourth International conference on Acid Rock Drainage, May 31-June 4, 1997, Vancouver.* Volume 2, pp.535-549.

Murad, E., U. Schwertmann, J.M. Bigham and L. Carlson (1994). Mineralogical characteristics of poorly crystallized precipitates formed by oxidation of Fe²⁺ in acid sulfate waters. In (C.N. Alpers and D.W. Blowes, editors) *Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation*, ACS Symposium Series **550**: 190-200.

Price, W.A., K. Morin and N. Hutt. (1997). Guidelines for the prediction of acid rock drainage and metal leaching for mines in British Columbia: Part II: Recommended procedures for static and kinetic testing. *Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, May 31 - June 4, 1997, Vancouver.* Volume 1, p.15-30.

Salomons, W. and A.M. Eagle (1990). Hydrology, sedimentology and the fate and distribution of copper in mine related discharges in the Fly River system - Papua New Guinea. *Science of the Total Environment* **97/98**: 315-334.

Sobek, A.A., W.A.. Schuller, J.R. Freeman and R.M. Smith (1978). *Field and laboratory methods applicable to overburdens and mine soils.* U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. EPA 600/2-78-054.

White, A.F. and M.L. Peterson. (1990). Role of reactive-surface-area characterization in geochemical kinetic models. In: (D.C. Melchior and R.L. Basset, editors) *Chemical Modelling of Aqueous Systems II*, American Chemical Society Symposium Series, Volume 416, p.461-475.

ATTACHMENTS

Four attachments are included in this report. These are:

- I. Compilation of test procedures, analytical methods and original data (mainly from International Metallurgical and Environmental Inc. and their sub-consultant, Chemex Laboratory)
- II. Petrographic report (by Harris Exploration Services)
- III. Geochemical modelling report
- IV. Technical Memorandum on Zinc Leaching from Limestone

To facilitate perusal of the laboratory data, detailed lists of samples providing information on rock and tailings types, location and origin of the samples are also furnished.

ATTACHMENT V-I

**COMPILATION OF TEST PROCEDURES,
ANALYTICAL METHODS AND ORIGINAL DATA**

**(MAINLY FROM INTERNATIONAL METALLURGICAL
AND ENVIRONMENTAL INC., AND THEIR SUB-
CONSULTANT, CHEMEX LABORATORY)**

ATTACHMENT V-II
PETROGRAPHIC REPORTS (HARRIS EXPLORATION
SERVICES)

ATTACHMENT V-III
GEOCHEMICAL MODELLING REPORT

ATTACHMENT V-IV

TECHNICAL MEMORANDUM ON ZINC LEACHING FROM LIMESTONE

APPENDIX M-V

PRE-MINE ASSESSMENT OF THE ACID ROCK DRAINAGE AND METAL LEACHING POTENTIAL OF THE ANTAMINA DEPOSIT