

**Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.
Estudio del Potencial de Generación
de Aguas Ácidas**

Mayo 2003

Preparado para
Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.
Asiento Minero Cerro Verde - Uchumayo
Arequipa
Perú

Preparado por
Knight Piésold Consultores S.A.
Knight Piésold Denver
Av. San Borja Sur 143, San Borja
Lima 41

**Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.
Estudio del Potencial de Generación
de Aguas Ácidas**

Tabla de Contenido

1.0 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	1
2.0 Geología económica	2
3.0 Método para seleccionar las muestras	3
4.0 Programa de ensayos de laboratorio.....	6
4.1 Potencial generador de ácido.....	6
4.2 Potencial de neutralización de ácido	9
4.3 Lixiviación	10
5.0 Resultados	11
5.1 Pruebas estáticas balance ácido base.....	11
5.2 Lixiviación	11
6.0 Interpretación	12
6.1 Potencial para generación de ácido y drenaje ácido.....	12
6.1.1 Estudio previo de potencial DAR.....	12
6.1.2 Potencial de generación de ácido relacionado con la zona hipógena y los tipos de alteración de roca.....	13
6.1.3 Potencial generación de ácidos de los relaves.....	15
6.2 Potencial para lixiviación	17
6.2.1 Lixiviabilidad de metales	17
6.2.2 Lixiviabilidad de sulfuro	18
7.0 Conclusiones	20

Lista de Tablas

<i>Tabla</i>	<i>Título</i>
Tabla 1	Resumen de muestras recogidas y analizadas
Tabla 2	Resumen de datos contables ácido-base estáticos y cálculos
Tabla 3A	AC/CC para determinación PN (Método ABA modificado)
Tabla 3B	AC/CC para especiación de azufre
Tabla 4A	Comparación de especiación de azufre utilizando un método de determinación sulfuro-azufre más agresivo
Tabla 4B	Resultados del refinamiento de perfil Rietveld XRD y su comparación con el análisis químico vía húmeda
Tabla 5	Resumen de resultados de las pruebas de lixiviación SPLP
Tabla 6	Resumen de resultados “Anómalos” de SPLP

Lista de Figuras

<i>Figura</i>	<i>Título</i>
Figura 1	Ubicación de los puntos de muestreo
Figura 2	Sulfato extraíble y calcio lixiviable

Lista de Anexos

<i>Anexo</i>	<i>Título</i>
Anexo J-1	Información técnica sobre la Técnica XRD
Anexo J-2	Resultados de Laboratorio (ABA, SPLP y XRD)

Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. Estudio del Potencial de Generación de Aguas Ácidas

Resumen Ejecutivo

Las operaciones realizadas anteriormente por SMCV S.A.A. estuvieron esencialmente restringidas a la explotación de óxidos o enriquecimientos supergénicos localizados en la superficie de los cuerpos mineralizados de Cerro Verde y Santa Rosa. La explotación de estas zonas se ha llevado a cabo mediante lixiviación ácida convencional complementada con la flotación restringida de los sulfuros supergénicos. Estos depósitos clásicos de pórfido de cobre están zonificados. Presenta una zona superior de óxidos la cual es adyacente a una zona transicional de óxido – sulfuro dentro de una zona mineralizada con sulfuro hipógeno (chalcopirita – pirita). Las zonas profundas del depósito son frecuentemente más ricas en mineral sulfuroso, este mineral tiene el potencial para generar drenaje ácido de roca (DAR) si existe suficiente aire y agua para facilitar la lixiviación de los minerales sulfurosos. La generación del DAR crea una preocupación ambiental para los recursos de agua superficial y subterránea. Las futuras operaciones de SMCV S.A.A. serán enfocadas en estas zonas profundas ricas en sulfuros.

Los desmontes y relaves generados por la explotación de estas zonas y la exposición de las paredes (pirita o mineral) de los tajos Cerro Verde y Santa Rosa podrían ser potencialmente generadoras de DAR. Por esta razón SMCV S.A.A. decidió realizar una evaluación del potencial de generación de DAR de los desmontes y relaves que se generarán con las futuras operaciones a pesar de la aridez de la región. Estas condiciones de aridez hacen que el potencial de la generación del DAR sea bajo. Sin embargo es muy difícil cuantificar la reducción del DAR en un ambiente árido, por esta razón el objetivo del estudio fue proporcionar las pautas para el manejo apropiado de los desmontes y relaves.

Las pruebas estáticas estándares, como las pruebas Balance Ácido-Base (ABA) y la prueba de lixiviación (Synthetic Precipitation Leaching Procedure o SPLP), fueron realizadas a las muestras tomadas de ambos depósitos (Cerro Verde y Santa Rosa). Se encontraron dificultades en la cuantificación exacta del potencial de generación DAR en base a la determinación del azufre como sulfuro (pirita); debido probablemente a la presencia significativa de alunita primaria y una resistencia inusual de la pirita a la digestión estándar

con ácido nítrico. Por lo tanto una estimación más conservadora (ambientalmente protectora) del potencial de generación de ácido (en base al azufre total) fue utilizada en este estudio.

Este reporte distingue entre el “potencial neto de generación de ácido” (diferencia relativa entre potencial de generación de ácido y potencial de neutralización) y el potencial de generación de drenaje ácido de roca (DAR), el cual es proporcionalmente limitado por la falta de drenaje debido a la falta de precipitación. Debido a que el proyecto está ubicado en un clima bastante árido (40,7 mm/año de precipitación), a pesar de que pueda existir un alto potencial para generación de ácido, la escasa lluvia limita el potencial de DAR. Sin embargo, esto no se puede cuantificar fácilmente y debido a la actual limitada información específica del sitio, no se incluye en este reporte.

La mayor parte del desmonte en ambos tajos son potencialmente generadores netos de ácido. En el depósito de Cerro Verde el desmonte con mayor potencial hipotético para la generación de ácido se encuentra en la zona de la alteración fílica. Ésta representa la principal zona de mineralización del depósito, incluyendo la roca sobre la que se ha formado alteraciones propilíticas internas. En el tajo Santa Rosa, las alteraciones fílicas son las que también tienen el mayor potencial para generar ácido. El desmonte con el menor potencial de generación del DAR aparentemente sería la matriz de la alteración potásica del sistema pórfido debido probablemente a que esta zona contiene muy poca pirita. Afortunadamente esta zona sería una de las últimas en removerse del tajo, de este modo facilitaría su uso como material de cobertura en el cierre del mismo. Sin embargo es importante resaltar que aunque el desmonte tiene un alto potencial de generación de ácido, el clima árido reducirá la producción de éste.

Las pruebas SPLP indican la probabilidad de lixiviación de metales de los desmontes de Cerro Verde y Santa Rosa bajo condiciones ligeramente ácidas de lluvia natural. Cobre, arsénico, aluminio y manganeso fueron lixiviados en cantidades “anómalas” de las muestras de desmontes analizadas, sin embargo estas concentraciones no exceden los valores referenciales (niveles máximos permisibles para agua potable según el EPA de los EE.UU.). Sin embargo existe el potencial de la lixiviación del sulfato debido a la presencia del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Para evaluar los efectos potenciales al medio ambiente debido al depósito de relaves se tomó una muestra seca de los relaves de las pruebas metalúrgicas (pruebas piloto) y fue analizada. El análisis reveló que la muestra es potencialmente generadora de DAR. Sin embargo es necesario el análisis de muestras adicionales de los relaves de las pruebas piloto para

confirmar este resultado. Es necesario contar con información adicional sobre las características del líquido/sobrenadante/efluente de los relaves para evaluar los potenciales impactos a la fauna, flora y calidad de agua (superficial y subterránea) en el área del proyecto. Para el depósito de relaves la presencia de agua en los relaves reduce las ventajas del clima árido en el control de la generación DAR.

**Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.
Estudio de Línea Base Ambiental
Proyecto Planta de Sulfuros**

1.0 Introducción

1.1 Antecedentes

El análisis sobre las características de desmonte que se presenta en este documento forma parte integral del EIA asociado con la expansión de las operaciones de Minera Cerro Verde. Estas operaciones están relacionadas con la explotación y procesamiento del mineral primario de pórfidos de cobre (hipogénico o sulfúrico) de los tajos de Cerro Verde y Santa Rosa.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de esta caracterización de los desmontes y los relaves experimentales es anticipar el comportamiento a largo plazo de estos tipos de desechos que provienen tanto del minado como del procesamiento de mineral no oxidico de los tajos de Cerro Verde y Santa Rosa. La mayoría del desmonte que se genere del futuro minado será almacenado en las áreas de expansión del botadero oeste, ubicado actualmente al oeste del tajo Cerro Verde. Los métodos utilizados en la construcción de estos botaderos (e.g., segregación de tipos de desmonte, compactación interna, técnicas de volteo, etc.) y la disposición final de estos desechos con relación al drenaje y a la cobertura, serán influenciados por las características de los desmontes.

El relave que se genere de la flotación convencional del mineral sulfuroso hipogénico de los tajos de Cerro Verde y Santa Rosa será almacenado en un depósito de relaves (TSF) en Quebrada Enlozada. En parte, el diseño y la ubicación del TSF serán influenciados por el comportamiento pronosticado de los relaves a largo plazo.

Las características del desmonte y de los relaves que se mencionan en este estudio incluyen el potencial hipotético para la generación de ácido, sulfato soluble y metales. Desafortunadamente, las técnicas disponibles son limitadas en lo que respecta a la capacidad de convertir cuantitativamente tal potencial hipotético en potencial real para las condiciones específicas del lugar tales como la limitada precipitación. Adicionalmente, la predicción de la probabilidad de escorrentía o drenaje (ácido o no) de cualquier instalación en Cerro Verde está fuera del alcance de este estudio.

2.0 Geología económica

Los depósitos de Cerro Verde y Santa Rosa representan depósitos clásicos de pórfido de cobre calco-alcalinos. El stock de dacitas mozoníticas porfíricas (DMP) que están asociadas con los fluidos mineralizantes se emplazaron dentro de la granodiorita Yarabamba (GYD) ligeramente más joven durante el Cretáceo superior al Paleoceno inferior. El basamento Gneiss Charcani del Precámbrico (CHG) también se encuentra presente en el tajo Cerro Verde. Los stocks de Cerro Verde y Santa Rosa se presentan como cuerpos independientes por lo menos hasta una profundidad de 1000 metros, a mayor profundidad probablemente estos se juntan en un solo cuerpo. Los cuerpos de turmalina cuarzo y las brechas de sílice se presentan alrededor de ambos stocks pero también se desarrollaron juntos a grandes distancias (e.g., Cerro Negro a aproximadamente 5 km de distancia).

Los patrones de alteración hipógena hidrotermal son esencialmente simétricos y coaxiales con la intrusión porfírica y varían desde un núcleo central potásico hacia afuera a través de zonas de alteración fílicas y propilíticas. Una alteración propilítica interna está localmente superpuesta sobre la alteración fílica adyacente a la zona potásica. Las alteraciones argílicas avanzadas y las alteraciones silícicas están más irregularmente distribuidas pero fuertemente restringidas a la zona de enriquecimiento supergenas y las zonas hipógenas, respectivamente.

Las zonas hipógenas mineralizadas consisten principalmente de chalcopirita, molibdenita y pirita y tienden a estar fuera de la zona potásica, pero en la vecindad de la interfase potásica-fílica. En el depósito de Cerro Verde este volumen de roca tiende a estar representado por una alteración propilítica interna en su última fase. La pirita sobresale más comúnmente al borde de la zona mineralizada y a lo largo de la zona fílica. La alteración supergena está bien desarrollada sobre ambos stocks mineralizados con una cubierta lixiviada o zona de óxido de cobre en superficie, conteniendo brocantita, crisocola, malaquita y “copper pitch” (una mezcla de óxidos hidratados de cobre/hierro/manganeso con o sin carbonatos y silicatos). Localmente debajo de la zona de óxido se encuentra una zona secundaria bien desarrollada de sulfuro de cobre conteniendo chalcocita y covelita.

3.0 Método para seleccionar las muestras

La complejidad del sistema hidrotermal típico de pórfidos de cobre tal como los de Cerro Verde hace que el muestreo para evaluar las características del desmonte sea dificultoso. A diferencia de un modelo simple de bloques de mineral, en donde sólo se requiere el conocimiento de la distribución espacial de cobre u otro metal recuperable, las características del desmonte dependen de la distribución de minerales de sulfuro, la alteración hipógena y la alteración supergena. Además, la capacidad de segregar económicamente el desmonte ambientalmente peligroso del desmonte inocuo durante la planificación y el proceso minero, depende del reconocimiento de las características de gran escala tales como el tipo de roca y el tipo de alteración. Una medición detallada de las características del desmonte, incluyendo a aquel dejado en las paredes del tajo no es práctica. Por estas razones, es deseable unir las características ambientales a los tipos y alteraciones de las rocas.

Las muestras fueron seleccionadas para optimizar las siguientes consideraciones y objetivos:

- Incluir los depósitos Cerro Verde y Santa Rosa en este programa de muestreo y análisis.
- Dar prioridad a las muestras de la zona de sulfuro primario, asumiendo que el material que represente la mayor parte de todo el desmonte sea removido durante el futuro minado.
- Los principales tipos de roca en el desmonte del sulfuro primario tienen que estar representados en el programa de muestreo, para facilitar el reconocimiento del desmonte problemático durante el minado.
- Incluir los principales tipos de alteración hidrotermal dentro de los desechos de sulfuro primario en el programa de muestreo, para facilitar el reconocimiento de desecho problemático durante el minado.
- Considerar el desmonte de roca a ser removido durante el minado y el desmonte de roca que quede en la pared de tajo.
- Considerar el mineral que quede en la pared de tajo (debido a restricciones en el diseño del tajo).
- Los problemas analíticos encontrados en anteriores determinaciones de las características del desmonte (ca. 1996) deben ser resueltos, de ser posible, mediante el análisis de muestras duplicadas en este programa de muestreo y reanalizando aquellas muestras.

- Minimizar el número de muestras necesarias para analizar (40 propuestas; 49 muestradas en Cerro Verde y Santa Rosa).

Para tratar mejor los aspectos mencionados anteriormente, cuatro transectos orientados de N-S y E-O, fueron seleccionados de los límites de los tajos de Cerro Verde y Santa Rosa. Los transectos fueron seleccionados con el apoyo del staff de geología de la mina ya que conocen la estructura interna de los depósitos. Estos cuatro transectos no se extienden a los límites de los tajos ya que las leyes son bajas en aquellas áreas y consecuentemente no existen perforaciones. Sin embargo, en la mayoría de los casos, aquellas porciones de las paredes finales del tajo que están compuestas de zonas de roca de sulfuro primario están adecuadamente representadas por perforaciones existentes. Las áreas de la pared del tajo más allá de las áreas cubiertas por las perforaciones, contienen mayormente roca con zonas de óxido y no son el alcance de este estudio. La Figura 1 muestra los lineamientos y las perforaciones incluidos en este estudio.

Se colectaron muestras espaciadamente en los transectos. Los sitios donde se colectaron las muestras fueron determinados por revisión visual de los testigos preparados por los geólogos de la mina y aplicando el siguiente procedimiento:

- Identificar el límite superior de la zona de sulfuro primario y restringir el muestreo a dicha zona.
- Transferir el último perfil del tajo en la sección e identificar aquellas perforaciones que penetrarán la futura pared del tajo.
- Identificar los volúmenes significativos de desmonte (sobre la base de un límite de ley de 0.5% Cu) dentro del volumen del tajo e identificar las perforaciones que representan aquellos volúmenes de desmonte.
- Identificar los tipos principales de roca y tipos de alteración hidrotermal en las áreas de la última pared del tajo y los volúmenes significativos del desmonte dentro del volumen del tajo.
- Seleccionar intervalos de 3 metros dentro del volumen del tajo que sean tanto desmonte como tipos de roca significativa y tipos comunes de alteración a volúmenes significativos de desmonte de roca.
- Seleccionar intervalos de tres metros dentro de la futura pared del tajo que sean representativos de los tipos de roca y tipos de alteración para volúmenes significativos de desmonte en la futura pared del tajo. Estos intervalos pueden ser tanto de mineral como desmonte.

- Seleccionar intervalos previamente muestreados (c.a. 1996) que contengan características químicas inusuales que requieran una confirmación para mayor explicación. Estos intervalos no se restringieron a la zona de sulfuros primarios.

Es importante mencionar que la lista de intervalos puede que no sea minuciosa con relación a todas las combinaciones potenciales de tipo de roca y tipo de alteración. Tampoco parecen ser estadísticamente representativos el número de muestras de cada material.

En algunos casos, una combinación particular de tipos de roca y tipos de alteración es poco común a lo largo del depósito o dentro de volúmenes significativos de desmonte, especialmente cerca de los últimos límites del tajo por lo tanto no amerita un muestreo extensivo. Adicionalmente, no se puede determinar un número estadísticamente adecuado a priori.

El objetivo de las muestras recolectadas durante este estudio es que éstas proporcionen información preliminar de las características relativas y absolutas de diversos tipos de material de desmonte que puedan provenir de los tajos o sean dejados en las paredes de los mismos. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las muestras recogidas y analizadas.

4.0 Programa de ensayos de laboratorio

El programa de ensayos se realizó sobre la base de procedimientos convencionales y estándares industriales. Sin embargo, un trabajo previo de balance estático ácido-base en las muestras de Cerro Verde (c.a. 1996), indicó que ciertos aspectos de estos procedimientos estándares no eran adecuados. No obstante fue necesario desarrollar primero el análisis básico (según estándares industriales) antes de recomendar alguna modificación o análisis adicional.

Todos los procedimientos de laboratorio para este estudio fueron desarrollados por el laboratorio de la British Columbia Research Institute (BCRI) en Vancouver, British Columbia, Canadá. El anterior trabajo de laboratorio fue desarrollado por ACZ Laboratory (ACZ), Steamboat Springs, Colorado, USA.

4.1 Potencial generador de ácido

El potencial generador de ácido para los desmontes de Cerro Verde y Santa Rosa fue estimado sobre la base de las determinaciones de sulfuro total (S_{TOT}) y tres formas analíticamente definidas (especies) de sulfuro, incluyendo “azufre como sulfuro” (S_S), azufre como sulfato (S_{SO_4}) y azufre insoluble” (S_I). Existen diversas variaciones de procedimientos “estándar” pero el BCRI siguió una modificación de los procedimientos del American Society for Testing Materials (ASTM) D2492-90 y D4239-85. A continuación se mencionan varias técnicas analíticas:

pH en pasta

La determinación del pH en pasta involucra un procedimiento simple humedeciendo una pequeña cantidad de roca pulverizada con agua desionizada seguida de la medición del pH en la pasta. El pH resultante es un indicador del pH de equilibrio controlado por las reacciones rápidas de hidrólisis y no considera reacciones de largo plazo relacionadas con la oxidación del mineral sulfuroso. La oxidación previa de los minerales de sulfuro puede, sin embargo, dar como resultado minerales de sulfato ácido residual que puede controlar el resultado del pH en la pasta.

Sulfuro total

El sulfuro total fue determinado utilizando un Analizador de Azufre Leco que convierte el contenido de azufre en SO_2 gas dentro de un horno de inducción de alta temperatura. Este

método está considerado razonablemente libre de problemas y no se sospecha que sea fuente de error en este estudio o el estudio previo (c.a. 1996).

Azufre como sulfuro (digestión con ácido nítrico diluido)

La estimación del azufre como sulfuro es de mayor importancia en los estudios de balance ácido-base convencionales debido a que se asume que éste representa la cantidad de pirita y por lo tanto el potencial de generación de ácido. El azufre contenido en minerales de sulfuro es normalmente determinado realizando una digestión de la muestra en ácido nítrico diluido (1:7) seguida de una determinación directa de la cantidad de azufre removida (o por diferencia basado en la cantidad de azufre remanente). Este procedimiento asume que la mayor parte de los minerales de sulfuro, incluyendo la pirita, son disueltos por la digestión.

Tal como se discute abajo (véase las discusiones de análisis de azufre insoluble, azufre como sulfuro [digestión en agua regia] y difracción de rayos X), existe una razón para sospechar de la exactitud de la estimación de azufre como sulfuro determinado por digestión con ácido nítrico. En dos muestras para las que se tienen disponibles análisis de difracción de rayos X (XRD), parece ser que el azufre como sulfuro está subestimado por el procedimiento de digestión con ácido nítrico diluido. Este representa un serio compromiso de la integridad de cualquier predicción del potencial de generación de ácido basado en la estimación de azufre como sulfuro derivado de las digestiones con ácido nítrico.

Azufre como sulfato (digestión con ácido clorhídrico concentrado)

De las discusiones con los geólogos de mina, y de las inspecciones de campo y trabajos de laboratorio previos se concluye que el procedimiento normal para la extracción de azufre como sulfato debe modificarse para adecuarse a la presencia de de alunita ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$). La alunita es el principal mineral de sulfato probablemente presente en los depósitos de Cerro Verde y Santa Rosa pero es mucho menos soluble que el yeso, para el cual el procedimiento general fue diseñado. Las muestras normalmente son lixiviadas con ácido clorhídrico 3N para disolver el yeso y otros sulfatos minerales solubles.

La alunita es localmente abundante en estos depósitos y es importante distinguir el azufre contenido en la alunita del azufre contenido en otros minerales, especialmente de la pirita. Considerar el contenido de azufre de la alunita como sulfuro de pirita sobredimensiona erróneamente el potencial de generación de ácido del desmonte de roca. Para disolver completamente la alunita, las muestras fueron lixiviadas con ácido clorhídrico concentrado y el sulfato fue determinado por métodos turbidimétricos en la solución resultante.

Azufre insoluble (por diferencia)

Esta fracción se refiere a todo el azufre que no es liberado por la digestión con ácido nítrico o ácido clorhídrico y es calculado por diferencia. Típicamente, esta fracción del azufre total es pequeña y no es tomada en cuenta para propósitos del balance ácido-base. En este caso, sin embargo, es grande.

La fracción significativa del total de azufre reportada como azufre insoluble (promediando 63%) es considerada irrealmente alta debido a que no es probable que existan otros minerales de azufre (en adición a la pirita y la alunita) en concentraciones suficientes para explicar la diferencia. De hecho, los análisis por XRD (discutidos abajo) de dos muestras con alto contenido de azufre total encontraron sólo minerales de azufre menores (chalcopirita y tenentita) en una muestra analizada y ningún otro mineral en la segunda muestra.

Las altas concentraciones de sulfuro insoluble en ausencia de minerales conteniendo sulfuros (diferentes de la pirita y alunita), necesariamente indican que la pirita o alunita (o ambos minerales) están incompletamente disueltos durante el tratamiento por ácido. Las dos muestras analizadas por XRD indican que la pirita está incompletamente disuelta por el tratamiento con ácido nítrico diluido y que la alunita está incompletamente disuelta con el tratamiento por ácido clorhídrico concentrado.

Azufre como sulfuro auxiliar (digestión con agua regia)

En un esfuerzo por determinar la fuente de la alta concentración de sulfuro insoluble, se realizaron dos experimentos para determinar si el sulfuro adicional podría ser disuelto por otros ácidos. Para este experimento, dos muestras de desmonte con altas concentraciones de azufre total fueron expuestas a agua regia (una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico) y el sulfuro fue determinado en el líquido lixiviado. En ambos casos la cantidad de sulfuro liberado por el agua regia fue mayor que la cantidad liberada por el ácido nítrico solo. Desafortunadamente, una comparación de las formas de sulfuro lixiviado por ácido con la mineralogía indicada por XRD indica que el agua regia ataca a ambos, a la pirita y la alunita. En consecuencia el sulfuro disuelto por digestión por agua regia probablemente es un sobreestimado del azufre como sulfuro si es que la muestra contiene una cantidad significativa de alunita.

Análisis de difracción por rayos X (XRD – la técnica Rietveld)

La técnica Rietveld para análisis XRD representa un nuevo y significativo mejoramiento en la técnica de XRD que permite al análisis de XRD estimar cuantitativamente la abundancia de

mineral además de la identificación del mineral presente. De hecho, las técnicas de digestión química arriba mencionados son sólo métodos que pueden aproximar la mineralogía de una muestra y podrían últimamente ser reemplazadas por la técnica Rietveld de XRD. El Anexo J-1 se presenta un artículo técnico sobre esta metodología.

Para este estudio, dos muestras con altas concentraciones de azufre total fueron elegidas para el análisis XRD usando la técnica Rietveld. Una de las muestras (K-(-4), 51.9 – 53.4 m) se originó de la capa lixiviada del tajo Cerro Verde; la otra muestra (K-(-6), 300 – 303 m) representa la zona de sulfuro primario del cuerpo mineral de Cerro Verde. La primera muestra contiene abundante alunita (presumible de origen supergénico) y poca pirita. La segunda contiene abundante pirita, menores cantidades de calcopirita y tenenita y cero alunita. El sulfuro total, el azufre como sulfuro y el azufre como sulfato, fueron calculados de las abundancias de minerales determinadas por XRD y comparados con las concentraciones de sulfuros determinados químicamente. Aunque el total de azufre estimado por ambas técnicas se comparan favorablemente, los resultados del análisis XRD indican que existen problemas significativos con las estimaciones de azufre como sulfuro y azufre como sulfato determinados químicamente. Es probable de que ambas concentraciones, la de azufre como sulfuro determinada por digestión con ácido nítrico diluido y las concentraciones de azufre como sulfato, determinadas por digestión con ácido clorhídrico concentrado son subestimadas de los valores verdaderos.

Estos dos análisis, además de los análisis normales y de las digestiones por agua regia de las muestras de desmonte de Cerro Verde y Santa Rosa, generaron información valiosa para la interpretación de los datos del ABA. Desafortunadamente, la incertidumbre revelada por las comparaciones hace necesario que el ABA sea utilizado de una manera muy conservativa. De este modo, se consideró que la cantidad de sulfuro total menos todo el azufre como sulfato medido fue considerado como el mejor indicador conservativo de la cantidad de azufre como sulfuro.

4.2 Potencial de neutralización de ácido

La determinación del potencial de neutralización de ácido involucra la adición de una cantidad conocida de ácido clorhídrico a una cantidad conocida de roca triturada, dando tiempo a que ocurran las reacciones consecuentes y finalmente titulando inversamente con una base estandarizada para determinar cuánto ácido fue consumido. Existen diversas variaciones de este procedimiento y las variables importantes incluyen la normalidad del ácido agregado, el volumen del ácido agregado, el tamaño de grano de la muestra sólida, la

temperatura de la reacción, el tiempo de reacción y las condiciones de oxidación/reducción del experimento.

El procedimiento empleado por BCRI se aproxima al procedimiento “ABA Modificado”. Las muestras fueron trituradas (80% pasando una malla Tyler de 200 μm) y se utilizaron los resultados de una “prueba rápida” para determinar la normalidad y volumen del ácido utilizado. Las muestras permanecieron en ácido aproximadamente 12 horas a temperatura ambiente antes de realizar la titulación inversa.

4.3 Lixiviación

Prueba de Lixiviación (SPLP) – El ensayo SPLP está diseñado para proporcionar un indicador de los metales que podrían ser liberados del desmante cuando son expuestos a la precipitación. La técnica no considera el impacto de oxidación de los minerales sulfurosos que podría ocurrir después de una limpieza inicial por la lluvia.

En este procedimiento, se mezcla 50 g de desmante chancado con 1000 mL de lluvia artificial por 18 horas, a temperatura ambiente. La lluvia artificial se prepara con la adición de cantidades pequeñas de ácido nítrico y ácido clorhídrico al agua desionizada hasta que alcance un pH de 5. La extracción se filtra y analiza por diversidad de metales (en este caso 35 metales).

5.0 Resultados

5.1 Pruebas estáticas balance ácido base

Los resultados de las pruebas estáticas balance ácido base se resumen en la Tabla 2. En el Anexo J-2 se incluyen los documentos proporcionados por el laboratorio. Los resultados incluyen sulfuro total, azufre como sulfuro (extraído por ácido nítrico 1:7), azufre como sulfato (extraído por ácido clorhídrico concentrado), sulfuro insoluble (por diferencia), y potencial para la neutralización de ácido (ABA Modificada). En la Tabla 2 también se incluyen los cálculos del potencial generador de ácido (PGA), potencial neutralizador de ácido (PNA), y potencial de neutralización neto (PNN).

En la Tabla 3A y 3B se proporciona información AC/CC de los componentes de las pruebas estáticas de balance ácido base. Se presenta una lista de los duplicados de los análisis de potencial neutralizador, azufre como sulfato y azufre como sulfuro.

La Tabla 4 proporciona información relacionada con la comparación de los dos métodos químicos para estimar azufre como sulfato (extracción por 1:7 ácido nítrico y extracción por agua regia) y las formas de azufre calculados basándose en los resultados del XRD.

5.2 Lixiviación

En la Tabla 5 se resumen los resultados de la prueba de lixiviación SPLP. La información proporcionada por el laboratorio se incluye en el Anexo J-2.

6.0 Interpretación

6.1 Potencial para generación de ácido y drenaje ácido

El potencial para el drenaje ácido de roca (DAR) del desmonte y/o relaves en la mina Cerro Verde/Santa Rosa depende de los siguientes aspectos.

- Potencial para la producción neta de ácido del desmonte o relaves, y
- Potencial de drenaje desde el botadero o del depósito de relaves.

Los análisis químicos y mineralógicos mencionados en este reporte están enfocados en el primer aspecto, el potencial para producción neta de ácido de desmonte y relaves. El segundo aspecto mencionado está relacionado a condiciones meteorológicas, construcción del botadero, y manejo de agua.

Este último asunto solamente puede ser considerado cualitativamente en este informe y depende de la planificación minera, ingeniería y diseño de las instalaciones. La aridez del área es claramente un factor potencialmente determinante en la predicción de la producción de DAR; la falta de precipitación para producir drenaje significativo excluye la producción de DAR. Sin embargo, un ambiente predominantemente árido no necesariamente está libre de eventos de precipitación que podrían producir drenajes u oxidación lenta de sulfuros entre eventos de precipitación que podrían ser liberados por lluvias subsecuentes. Consecuentemente, el potencial para la producción de ácido debe ser considerado.

6.1.1 Estudio previo de potencial DAR

Se realizó un programa en 1996 que dio como resultado 93 y 36 muestras recolectadas de los depósitos Cerro Verde y Santa Rosa, respectivamente. La mayoría de estas muestras fueron obtenidas de la capa lixiviada, los minerales oxidados, las zonas de sulfuros secundarios y zonas de transición. Todas las determinaciones de formas de azufre y capacidad de neutralización de ácido fueron realizadas en el Laboratorio ACZ. La revisión de la información presentó que en la mayoría de las muestras la mayor parte del azufre se encontraba como azufre insoluble. El azufre insoluble en este caso se presenta como cantidades significativas de alunita, lo que hizo necesaria la utilización de ácido clorhídrico concentrado en el actual programa analítico (ver sección 3.1). Por consiguiente los valores de azufre como sulfato y azufre insoluble del programa de 1996 y del programa actual no son comparables.

Los valores de sulfuro total desde el programa de 1996 y de los tres intervalos re-muestreados para este estudio concuerdan bien con aquellos del programa actual.

El potencial para neutralización de ácidos (PNA) en 1996 fue determinado utilizando el más agresivo procedimiento “Sobek” (EPA M600/2-78-054 3.2.3) en comparación con el método de “ABA Modificado” utilizado en este estudio. En consecuencia, los resultados de los dos análisis son considerados no-comparables excepto en que los potenciales para neutralización de ácidos obtenidos del programa de 1996 sean mayores de los potenciales obtenidos del programa actual. Los valores de 1996 son considerados como sobreestimados de los valores verdaderos de PNA para las rocas de desmonte, debido a que el procedimiento “Sobek” requiere que las rocas sean hervidas en ácido estándar, acción que permite que algunas reacciones consuman ácido (estas reacciones proceden en el laboratorio, sin embargo no es lo que usualmente sucede en el campo).

6.1.2 Potencial de generación de ácido relacionado con la zona hipógena y los tipos de alteración de roca

La distribución típica de minerales sulfurosos relacionados a las zonas de alteración hidrotermal de cuerpos típicos de cobre y molibdeno en pórfido, sugiere que los potenciales de generación de ácidos también deberían estar relacionados a las zonas de alteración. En realidad, la zona de alteración fílica en Cerro Verde y Santa Rosa parece tener las concentraciones de sulfuro total y azufre (no como sulfato) más bajas. Esto se parece a la distribución clásica de pirita en sistemas similares. En Cerro Verde las alteraciones propilíticas internas de la etapa tardía superpuestas en la zona fílica, también se presentan enriquecidas con sulfuro total. Mientras que las muestras colectadas de Santa Rosa generalmente contienen significativamente menos sulfuro total que sus equivalentes en Cerro Verde, el contenido de sulfuro (no como sulfato) en ambos depósitos es similar. La litología de origen parece tener poca influencia en la distribución de sulfuro en estos depósitos. El número de muestras disponibles para derivar estas observaciones es poca y el muestreo adicional sería deseable.

Las dificultades analíticas presentadas en la determinación de las cantidades de azufre como sulfuro y azufre como sulfato, complican el entendimiento de la distribución de sulfuro dentro de estos cuerpos porfíricos. Sin embargo, algunos patrones parecen razonables. Dentro del depósito Cerro Verde la mayor concentración de azufre como sulfato parece estar dentro de la zona de alteración silícica. Si ese es el caso, la fuente del azufre como sulfato probablemente es la alunita hidrotermal. Una de las dos muestras sujetas al XRD provino de la capa lixiviada

del depósito Cerro Verde y contenía una alta cantidad de alunita que se presentó como azufre insoluble. En general las distribuciones de sulfuro inferido de estos análisis se consideran poco confiables.

Para el propósito de este estudio, el azufre no como sulfato (el azufre total menos el azufre como sulfato) se considera el mejor indicador de la cantidad de azufre como sulfuro, así como el contenido de piritita y últimamente el potencial para la generación de ácido (PGA). Sin embargo, usar el azufre no como sulfato como indicador resulta en una ligera sobreestimación de los valores de piritita y PGA. De acuerdo con esto, los valores de PGA (percibido como kg CaCO₃/tonelada de roca) en el presente informe están basados en el siguiente cálculo:

$$APP_{(Non-Sulfate)} = 31.25 \times [S_{Total} - S_{SO_4}]$$

Donde:

$APP_{(non-sulfate)}$	=	PGA _(azufre no como sulfato)
S_{Total}	=	Sulfuro total
S_{SO_4}	=	Azufre como Sulfato

y los valores de S se presentan en peso%

Una consideración importante para la evaluación de PGA del desmonte de Cerro Verde y Santa Rosa es que la digestión estándar industrial (1:7 ácido nítrico) no disolvió mucho de la piritita en una de las muestras para el cual existe una caracterización por XRD. Si la digestión por ácido nítrico no disuelve la piritita en la mayoría de las muestras del depósito, se puede considerar que este método es un pobre indicador de la cantidad de azufre como sulfuro. Esta suposición ha sido aplicada en el presente caso y es la razón por la que en el presente estudio se utiliza el azufre no como sulfato como indicador de la cantidad de azufre como sulfuro en el depósito.

Otro asunto que también requiere ser considerado es si una porción de la piritita es insoluble en el ácido nítrico, se puede inferir la presencia de una población de piritita resistente al ácido. Esta porción puede estar o no sujeta a oxidación y la producción de ácido; la información presente en este estudio no permite la solución de este asunto. Es posible que la piritita diseminada y la piritita presente en micro-vetas tengan comportamientos diferentes con respecto a la erosión. Si este es el caso, una relación todavía más compleja puede existir entre el PGA y el desmonte.

Los potenciales de neutralización de ácidos (PNA) son bajos en los depósitos de Cerro Verde y Santa Rosa. La falta de roca calcárea y de alteraciones de carbonatos hidrotermales implica que la fuente de PNA probablemente sean los minerales de silicatos. Estos minerales podrían incluir Feldespato -K en la zona potásica, epidota en la zona fílica y clorita en la zona propilítica. Los valores más altos de PNA fueron obtenidos de las zonas potásicas y propilíticas internas.

El potencial de neutralización neto (PNN) (como kg CaCO₃/tonelada de roca) calculada usando la siguiente fórmula, es similar a los valores de PGA debido a los valores mínimos de PNA.

$$NANP_{(Non-Sulfate)} = ANP - APP_{(Non-Sulfate)}$$

Donde:

NANP _(non-sulfate)	=	PNN _(azufre no como sulfato)
ANP	=	PNA
APP _(non-sulfate)	=	PGA _(azufre no como sulfato)

De acuerdo con este cálculo, el desmonte de Cerro Verde que tiene el mayor potencial (hipotético) para generar ácidos puede ser encontrado en la zona de alteración fílica a los extremos del cuerpo mineralizado principal e incluye roca sobreimpreso por alteraciones internas propilíticas. En el tajo de Santa Rosa las zonas de alteración fílica también tienen los valores de PNN más altos. Es preocupante la baja PNN de la zona externa de alteración propilítica en Santa Rosa. Normalmente este tipo de roca tiende a neutralizar ácidos pero en este caso no es así debido a un alto contenido de azufre no como sulfato.

Se predice que virtualmente todo el desmonte en ambos tajos será potencialmente productor neto de ácido. El desmonte con el menor potencial para generar ácido aparenta ser la matriz del cuerpo porfídico, alterado potásicamente. Eso debido a una aparente deficiencia de pirita. Afortunadamente, este material será de las últimas en ser removidas del tajo, facilitando de este modo su uso como material de cobertura inocua.

6.1.3 Potencial generación de ácidos de los relaves

Solamente una muestra de los relaves experimentales fue analizada durante este estudio. La muestra proporcionada por Laboratorios Dawson (Salt Lake City, Utah) fue identificada como “compósito maestro” y así considerada como la muestra más representativa de los materiales

existentes. Un trabajo metalúrgico adicional ha sido planificado para mediados del 2003 en los Laboratorios Hazen en Denver, Colorado.

La muestra de relave analizada contenía 1,12% en peso de sulfuro total y 0,13% en peso de azufre como sulfato. Desafortunadamente, del contenido del 0,99% de azufre no como sulfato, solamente 49% fue reportado como azufre como sulfuro (como fue determinado por digestión por 1:7 ácido nítrico). Esto presenta un problema para interpretar el porcentaje actual de pirita disponible para potencialmente generar ácidos. Asumiendo que todo el azufre no como sulfato se presenta como pirita, el sulfuro es igual a aproximadamente 1,9% en peso de pirita. Si solamente el sulfuro ácido-extraíble está realmente presente como pirita, el sulfuro es igual a aproximadamente 0,92% en peso de pirita.

El potencial para neutralizar ácidos (PNA) de la muestra de relaves es bajo (en 5.8 kg CaCO_3 /tonelada de roca). Algo de la PNA observada podría haber sido proporcionado por residuos de los reactivos del proceso experimental de flotación y podría ser más baja en realidad. Adicionalmente parte de la PNA podría ser fácilmente removida infiltrando la humedad recibida como precipitación o agua limpia de proceso. Un alto pH (8,61) de lixiviación en el SPLP y un nivel elevado de calcio lixiviable sugieren que la cal fue agregada al proceso de flotación y puede ser fácilmente removida, bajando así la PNA efectiva. Convirtiendo los diversos estimados de sulfuro de pirita a equivalente de acidez o potencial para generar ácidos y asumiendo la oxidación completa de la pirita, varios estimados del PNN pueden ser obtenidos. Los estimados de NPNA varían entre -9,5 a -25,1 kg CaCO_3 /tonelada de roca. Aunque ambos valores implican que los relaves serían productores de ácidos, este rango de NPNA representa una variación significativa en los requerimientos para la neutralización si los ácidos son generados. Si los estimados de PNA son sobreestimados debido a la presencia de cal que puede ser lavado del sistema, los valores de PGA podrían ser aún más negativos.

La disponibilidad de agua en un depósito de relaves excluye el efecto de mitigación de la aridez del sitio. Suficiente cantidad de agua estará disponible durante la disposición de relaves como para permitir la oxidación de la pirita cerca de la superficie del depósito. Sin embargo, la construcción y operación del depósito de relaves determinará cuánto tiempo y cuánta humedad permanecerá en los relaves en tiempo. Toda oxidación de minerales sulfúricos tiene que ocurrir desde la superficie hacia abajo. El grado de finura de los relaves, el contenido de humedad, la profundidad hasta la zona saturada, las tasas de infiltración de agua y la reactividad de la pirita contenida influirán en la difusión de oxígeno en la superficie

superior de los relaves y de esa manera la extensión de la oxidación de pirita. Si la oxidación de la pirita es limitada, muy poca acidez será generada.

Aunque las pruebas estáticas de ABA en el laboratorio confirman que los relaves de Cerro Verde y Santa Rosa tendrán el potencial para generar ácidos, la información disponible no permite la determinación de si este potencial será realizado in situ.

6.2 Potencial para lixiviación

6.2.1 Lixiviabilidad de metales

La lixiviabilidad de metales del desmonte de Cerro Verde y Santa Rosa aparenta ser muy limitado en relación con los resultados de las pruebas SPLP. Solamente el cobre, arsénico, aluminio y manganeso se presentaron en más de un extracto del SPLP con concentraciones excedentes a un estándar de referencia de una desviación estándar del valor promedio. El cobre excede cuatro veces este límite pero solamente si los dos valores más altos no son incluidos en el cálculo del promedio; de lo contrario sólo un valor excede el estándar de referencia. La Tabla 6 presenta un resumen de los metales en los extractos del SPLP que podrían ser considerados anómalos cuando se considera que todos los valores menores al límite de detección (los valores “>”) son equivalentes a ½ del límite de detección y que la distribución de valores es normal. Los demás metales no presentaban valores más altos que una desviación estándar sobre el promedio, no estaban presentes en concentraciones más altas que el límite de detección, o eran elementos principales en la composición de la roca (Ca, Mg, Na, K).

Aquellos metales identificados en la Tabla 6 no necesariamente son anómalos estadísticamente. Son, más bien, identificados como aquellos metales con por lo menos una ocurrencia de concentración elevada en un extracto de SPLP y, entonces, merecen monitoreo. Pruebas adicionales serían necesarias para determinar los parámetros estadísticos de aquellos metales.

Tabla 6
Resumen de Resultados “Anómalos” de SPLP

Metal	Promedio (a) (mg/L en extracto)	Desviación Estándar (a) (mg/L en extracto)	Conc. máximo (mg/L)	No. de Muestras que Exceden 1 DS sobre el Promedio	No. de Muestras que Exceden 2 DS sobre el Promedio	100 X Estándar para Agua Potable (mg/L) (c)
Cu	0.0251 (b)	0.043 (b)	27.9	4 (b)	2 (b)	130
As	0.004	0.0062	0.044	5	1	1
Al	0.233	0.179	0.72	11	0	5
Mn	0.023	0.045	0.3	5	1	5
Mo	0.0081	0.0514	0.453	1	0	n.d.

a = promedios y desviaciones estándares son calculados considerando que todos los valores menores al límite de detección (los valores “>”) son equivalentes a ½ del límite de detección (ej., <0.001 = 0.0005) y que la distribución de valores es normal

b = promedio y desviación estándar de cobre fueron calculados sin los dos valores más altos (27.9 y 6 mg/L en extractos). Sin embargo estos valores están incluidos en los valores reportados que exceden los estándares de referencia.

c = basándose en los LNP de la EPA de los EE.UU. para agua potable primario y secundario

n.d. = no determinado

No existe una manera directa o convencional para determinar si un extracto de SPLP representa una amenaza ambiental. Como un método preliminar para identificar concentraciones de metales en el extracto que pueden ser considerados como peligrosos, estas concentraciones deben ser comparadas con 100 veces los LMP para agua potable (en este caso se ha usado los LMP de la EPA de los EE.UU.). Esto asume que una dilución de 100 veces ocurriría entre el punto de origen del lixiviado y cualquier receptor humano. No había excedencias de estos valores referenciales en los lixiviados de Cerro Verde y Santa Rosa.

6.2.2 Lixiviabilidad de sulfuro

El azufre como sulfato no fue determinado en las pruebas de SPLP. Sin embargo, las concentraciones de azufre como sulfato obtenidos durante la clasificación de sulfuros, realizado para el ABA, pueden ser utilizadas en conjunto con los resultados del SPLP para ayudar en la determinación de la lixiviabilidad de sulfuro. Los lixiviados de 14 de las 49 muestras de desmonte contenía inesperadamente altas concentraciones de calcio (22,1 a 367 mg/L) comparado con el resto de las muestras (0,08 a 6,36 mg/L). Las concentraciones de

calcio (lixiviable por SPLP) y azufre como sulfato (ácido-extraíble) han sido ploteados en la Figura 2. La mayoría de estas muestras ploteadas cerca el centro del área de estudio, indicando poco calcio soluble o sulfato en el desmonte de esta área. Sin embargo, para aquellas muestras con altas concentraciones inesperadas de calcio, la cantidad de sulfato soluble es muy similar a la cantidad de calcio (ver Figura 2). Esto sugiere que la fuente tanto del calcio como del sulfato es yeso. El yeso es un mineral que puede ser disuelto fácilmente en agua de lluvia. Las muestras con aparentemente altas concentraciones de yeso fueron obtenidos de profundidades entre 300 y 500 m, sugiriendo que el yeso es hidrotermal en origen, no supergénico.

7.0 Conclusiones

Muestreo – El desmonte de los depósitos de porfidos de cobre en Cerro Verde y Santa Rosa han sido muestreados de acuerdo a un programa diseñado para representar cada tipo de roca y cada alteración presente en las zonas hipógenas de ambos depósitos. Estudios anteriores (1996) fueron restringidos principalmente a las zonas de supergene. Tres intervalos del programa anterior fueron remuestreado y los resultados del nuevo muestreo se encontraban en conformidad con los resultados anteriores en términos de las concentraciones de azufre total y azufre como sulfuro, pero no de azufre como sulfato, azufre insoluble o el potencial para neutralizar ácidos. Además se reconoce que los datos de 1996 tenían altas cantidades de azufre como alunita en el componente de azufre insoluble y que las pruebas potencialmente no solubilizaron una porción del azufre como pirita. En general, los datos de 1996 deben ser usados cuidadosamente reconociendo plenamente sus limitaciones.

El número de pruebas estáticas de ABA en el laboratorio fue menor que en el ultimo programa (1996). Las muestras del programa actual fueron colectadas desde dentro de la zona económicamente importante para permitir que una cantidad menor de muestras sea colectada. Los transectos fueron seleccionados de los últimos límites de los tajos de Cerro Verde y Santa Rosa con el apoyo del staff geológico de la mina ya que conocen la estructura interna de los depósitos. Las muestras fueron colectadas de perforaciones existentes en estos transectos que contenían roca de desmonte que sería minada y roca con mineral de baja ley que sería dejada en la pared final del tajo.

Muestreo adicional podría ser realizado para mejorar la confiabilidad de las conclusiones del presente estudio. También se requiere adicional investigación en la metodología de análisis. El muestreo durante las operaciones será necesario si se desea segregar los desmontes basados en el potencial para generar ácidos.

Potencial Neto de Generación de Ácidos – El presente informe toma cuidado en la diferenciación entre roca que tiene una potencial inherente para la producción de ácido y el potencial de drenaje ácido desde el sitio del proyecto. El informe está enfocado en la cuantificación del potencial para la generación de ácidos y solamente puede ser cualitativo sobre el potencial para generar drenaje ácido del sitio debido a la aridez del sitio y la muy limitada cantidad de precipitación requerida para producir algún drenaje.

La inspección de los datos analíticos demuestra que existe incertidumbre en la identificación de los tipos de sulfuro en el desmonte, a pesar del intento de optimizar la digestión de alunita. Debido a que no se pudo disolver completamente la alunita en las muestras, los valores de azufre como sulfato se consideran subestimados. De mayor importancia es la incapacidad de la digestión estándar (1:7 ácido nítrico) para disolver completamente la pirita en las muestras. En el caso de una muestra enriquecida de sulfuro (mayormente en la forma de pirita) para la que había información XRD, la digestión por ácido nítrico liberó virtualmente cero del sulfuro indicado como presente en la muestra por el XRD. La digestión por agua regia solamente resultó en la liberación de 1/3 del sulfuro indicado como presente. Basándose en estos resultados se tenía que considerar la cantidad de azufre no como sulfato (sulfuro total menos azufre como sulfuro) como el indicador de la potencial para generar ácidos. La cantidad de azufre no como sulfuro (%peso) fue multiplicado por un factor de 31,25 para determinar el potencial para generar ácidos (PGA).

En general, el desmonte de Cerro Verde y Santa Rosa se predice tener un moderado a alto potencial neto para generar ácidos, debido al alto contenido de pirita y la falta de un significativo potencial para neutralización de ácidos. Los análisis de los relaves de la planta piloto también presentan resultados que indican un potencial para generar ácidos. Las pruebas de lixiviabilidad de los relaves indican que una parte del potencial para neutralizar ácidos es debido a la presencia de reactivos agregados durante de los simulacros de flotación y por esta razón los relaves finales tendrán que ser reevaluados.

Se encontró poca diferencia entre los potenciales para generar ácidos de la mayoría de los tipos de roca (particularmente entre rocas del pórfido dacita-monzonítica y la granodiorita de Yarabamba). Sin embargo, las rocas de la zona de alteración hidrotermal fílica tenían el mayor potencial para generar ácidos. Esta incluye aquellas zonas donde ha ocurrido propilitización interna sobre la zona fílica. Afortunadamente, esta zona tiene la mayoría del mineral y será el área sujeta a estudios geológicos más detallados y las técnicas más selectivas de minería. Así se puede identificar y segregar con mayor precisión las rocas con el mayor potencial para generar ácidos.

La información disponible de este estudio no identifica ninguna zona primaria de desmonte que sea suficientemente benigna como para que merezca ser segregada para su uso en construcción. Sin embargo, las rocas de la capa lixiviada, o oxidada, podrían ser segregadas para su uso posterior en la construcción de una capa para el material sulfúrico.

Lixiviabilidad – Las pruebas SPLP indican una muy limitada lixiviación de metales del desmonte de Cerro Verde y Santa Rosa. Solamente cobre, arsénico, aluminio y manganeso fueron movilizados en cantidades anómalas del desmonte durante las pruebas. De estos metales, ninguna concentración fue mayor que el valor de referencia de 100 veces el estándar para agua potable de los EE.UU., cuyo valor de referencia está generalmente aplicado a las pruebas de SPLP. En realidad, la lixiviación de metales podría ser menor debido a que la precipitación local podría ser no-acida debido a que la alcalinidad regional de los suelos y a la alcalinidad resultante del polvo incorporado en la lluvia.

Los resultados de estas pruebas podrían ser sobreestimados debido a que la precipitación de la zona podría ser menos ácida que la precipitación sintética utilizada en las pruebas (el polvo arrastrado de la tierra que forma un componente del agua lluvia es generalmente alcalino).

Las pruebas SPLP no indican lixiviabilidad de metales bajo condiciones acídicas provenientes de la oxidación de minerales sulfúricos. Bajo aquellas condiciones la lixiviabilidad de metales podría ser significativamente mayor que los niveles indicados en las pruebas SPLP.

Existe un potencial para la lixiviación de sulfato relacionado con el yeso hidrotermal. Niveles elevados de calcio en los lixiviados del SPLP confirman la alta solubilidad del yeso hidrotermal. La poca información disponible sobre la distribución de yeso hidrotermal indica que por lo menos una porción del desmonte que contiene yeso sería depositado encima de los botaderos de desmonte debido a su ubicación en las profundidades de los tajos. Consecuentemente, si no toman medidas para segregarse esos materiales, las concentraciones de sulfatos en los lixiviados de los botaderos que contiene el yeso podrían ser inaceptables.

Probabilidad de Producción de Drenaje Ácido de Rocas – la aridez extrema de la región de Cerro Verde alude a que habrá muy poco o nada de drenaje (incluyendo drenaje ácido) de los botaderos. Una evaluación de la probabilidad de la generación de escorrentía y drenaje no fue incluido en el alcance del presente estudio. Sin embargo, merece especial consideración los eventos extremos de precipitación (ej. tormentas del 1:100 año o 1:500 año periodo de retorno) y el hecho de que la oxidación de minerales sulfúricos puede ocurrir dentro de los botaderos con solamente un poco de humedad. Los productos de este tipo de oxidación largo-plazo estarían almacenados dentro del botadero en la forma de minerales secundarios ácido-sulfatos que pueden ser fácilmente solubilizados. Consecuentemente, un evento de precipitación inusualmente alto puede liberar cantidades de ácido, sulfato y metales desproporcionadamente altos. Los diseños de los botaderos deben considerar medidas para

interceptar y tratar este tipo de escorrentía ácida durante su cierre. Adicionalmente, medidas prudentes para reducir el potencial de infiltración de agua a los botaderos en los años normales de precipitación reducirán proporcionadamente la humedad disponible para la oxidación a largo-plazo de minerales sulfúricos.

La producción de escorrentías o drenajes ácidos, enriquecidas de sulfatos o metales de un botadero o depósito de relaves depende en la química del proceso de flotación, así como de la construcción del botadero y su operación. Un depósito de relaves totalmente drenado y operado para mantener el mínimo de porosidad y el máximo de compactación tendrá una menor probabilidad de oxidar minerales sulfurosos. Estudios han demostrado que oxidación de relaves es proporcional a la difusión de oxígeno en la superficie del depósito y que las características físicas de la masa pueden valer más que la reactividad inherente de los minerales en los relaves. Igual que en el caso de los botaderos, la aridez local discute en contra de la probabilidad de producción de escorrentía post-cierre del depósito de relaves de Cerro Verde. La naturaleza alcalina de los líquidos de la flotación de calcopirita discute en contra de la producción de drenaje ácido durante las etapas de operación y cierre. Merece especial cuidado el determinar y mantener la óptima naturaleza física de la superficie del depósito de relaves para minimizar la difusión de oxígeno. La erosión que resulta en la disección del depósito de relaves tiene que ser evitada para preservar la mejor barrera contra la difusión de oxígeno. Además, la generación de polvo de la superficie del depósito de relaves sería minimizado cubriendo la instalación.

Tablas

Tabla 1
Resumen de Muestras Recogidas y Analizadas

Tajo	Sección	Prefijo de Perforación	Sufijo de Perforación	Parte Superior (approx.) (m)	Parte Inferior (approx.) (m)	Nueva/ Remuestreada	Ubicación del Desmonte	Litología	Alteración	Condición	núcleo o astillas	ANÁLISIS SOLICITADOS						Recibido de CV	Razones	
												Pasta pH	Tot. S	S-S	SO4-S	Res - S	PN Modif.			Lixiviación SPLP
C. Verde	NS22500	516	8	290	293	Nueva	Pared	YGD	Ph	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	NS22500	516	8	370	373	Nueva	Pared	YGD	Ph	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	NS22500	A	8	340	343	Nueva	Mina	YGD	Ph	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	NS22500	A	8	400 (397)	403 (400)	Nueva	Pared	YGD	Ph	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	NS22500	I	8	420	423	Nueva	Mina	DMP	IP	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	-8	170	173	Nueva	Pared del Tajo	YGD	Ph	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	-6	260	263	Nueva	Pared	YGD	Ph	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	-6	300	303	Nueva	Pared	YGD	Ph	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	-4	390	393	Nueva	Mina	YGD	Ph	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	-4	440	443	Nueva	Pared	YGD	Ph	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	-4	51.9	53.4	Remuestreada		YGD	Ph	HIGHLY OX	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Remuestra anormal, con alto contenido de azufre para la zona lixiviada.
C. Verde	EW71000	K	-4	203	206	Remuestreada		YGD	S	OXIDIZED	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Remuestra anormal, con alto contenido de azufre para la zona lixiviada.
C. Verde	EW71000	K	4	250	253	Nueva	Mina	YGDbx	S	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	4	490	493	Nueva	Mina	DMD	S	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	4	520	523	Nueva	Mina/Pared	DMD	S	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	7	430	433	Nueva	Pared/Mina	DMP	K-s	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	16	105	108	Remuestreada		CHG	K-s	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Remuestra anormal, con alto contenido de azufre para la zona lixiviada.
C. Verde	EW71000	K	20	270	273	Nueva	Mina	XGD	IP	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	20	330	333	Nueva	Pared	XGD	K-s	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	22	60	63	Nueva		YGDbx	IP	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Waste (<0.5 wt%Cut) within pit volume
C. Verde	EW71000	K	22	170	173	Nueva	Mina	YGD	S	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	22	240	243	Nueva	Pared	YGD	S	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	10A	380	383	Nueva	Mina	DMP	K-s	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	EW71000	K	10A	227	230	Nueva	Mina	DMP	IP	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Waste (<0.5 wt%Cut) within pit volume
C. Verde	NS22500	O	08	430	433	Nueva	Mina	DMP	IP	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
C. Verde	NS22500	O	08	460	463	Nueva	Pared	DMP	K-s	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	NS24100	500	40	70	73	Nueva	Mina/Pared	YGD	A	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	EW69750	503	25.5	80	83	Nueva	Mina/Pared	YGD	EP	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	May represent large area of external propylitic alteration in SW S. Rosa pit area
S. Rosa	EW69800	504	32	10	13	Nueva	Mina	DMP	S	STRONG OX	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Already mined but may represent larger vol in future mined areas
S. Rosa	EW69800	504	32	100	103	Nueva	Mina/Pared	DMP	EP	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Large vol. Of propylitic in SW pit area
S. Rosa	NS24100	504	40	240	243	Nueva	Mina/Pared	YGD	Ph	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	EW69900	506	19	20	23	Nueva	Pared	YGD	EP	STRONG OX	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	May represent large area of external propylitic alteration in SW S. Rosa pit area
S. Rosa	EW69900	506	38	40	43	Nueva	Mina	YGD	Ph	WHITE	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	May represent a large vol. Of silic altered rock in S. Rosa pit - very little control in area
S. Rosa	EW69900	506	42	440	443	Nueva	Pared	YGD-Bx	K-s	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Very bottom of pit below ore
S. Rosa	EW69900	506	46	240	243	Nueva	Mina	QTB	Ph	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	EW69900	506	46	282	285	Nueva	Pared	YGD	Ph	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	EW69900	506	48	130	133	Nueva	Mina	YGD	EP	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	EW69900	506	48	190	193	Nueva	Pared	YGD	EP	OX	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	EW69900	506	49	60	63	Nueva	Pared/Mina	YGD	Ph	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	NS24150	507	41	350	353	Nueva	Mina	YGD	Ph	OX?	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	NS24150	510	41	340	343	Nueva	Mina/Pared	YGD	Ph	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	NS24100	515	40	160	163	Nueva	Mina	DMP	S	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	NS24150	516	41	100	103	Nueva	Mina	YGD	IP	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	NS24150	516	41	180	183	Nueva	Mina/Pared	YGD	Ph	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	NS24100	519	40	105	108	Nueva	Mina	YGD	A	G	ASTILLAS	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared
S. Rosa	NS24100	519	40	160	163	Nueva	Mina/Pared	YGD	Ph	G	NUCLEO	X	X	X	X	X	X	X	Y	Desmonte (<0.5 % de Ley) cerca a la última superficie del tajo ó >0.5 % en la pared

Tabla 2
Resumen de Datos Contables Acido-Base Estáticos y Cálculos

Tajo	Sección	Prefijo - Sufijo de la perforación	Intervalo (mt)	Ubicación del Desmonte	Litología	Alteración	Condición	pH en pasta	%S total	%S sulfático	%S piritoso	%S insoluble	Potencial de neutralización de ácidos (PNA)	PGA basado en S piritoso	PGA basado en S total menos S sulfático	PGA basado en S total	PNN basado en S piritoso	PNN basado en S total menos azufre sulfático	PNN basado en S total	
									wt%	wt%	wt%	wt%	kg CaCO3/T desmonte	kg CaCO3/T desmonte	kg CaCO3/T desmonte	kg CaCO3/T desmonte	kg CaCO3/T desmonte	kg CaCO3/T desmonte		
C. Verde	NS22500	516-8	de 290 a 293	Pared	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	6,8	3,74	0,04	2,33	1,37	0,5	72,8	115,6	116,9	-72,3	-115,1	-116,4	
C. Verde	NS22500	516-8	de 370 a 373	Pared	Granodiorita Yarabamba	Silificación	No oxidado	7,3	4,98	1,66	1,15	2,17	4,8	35,9	103,8	155,6	-31,1	-99,0	-150,8	
C. Verde	NS22500	A-8	de 340 a 343	Mina	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	6,7	3,63	1,66	0,95	1,02	1,5	29,7	61,6	113,4	-28,2	-60,1	-111,9	
C. Verde	NS22500	A-8	de 400 (397) a 403 (400)	Pared	Granodiorita Yarabamba	Silificación	No oxidado	6,6	3,57	1,50	0,51	1,56	1,5	15,9	64,7	111,6	-14,4	-63,2	-110,1	
C. Verde	NS22500	I-8	de 420 a 423	Mina	Porfido Dacítico Monz.	Propilica Interna	No oxidado	7,9	0,62	<0,02	0,05	0,57	5,0	1,6	19,1	19,4	3,4	-14,1	-14,4	
C. Verde	EW71000	K- -8	de 170 a 173	Pared del Tajo	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	6,5	3,47	<0,02	1,29	2,18	0,8	40,3	108,1	108,4	-39,5	-107,3	-107,6	
C. Verde	EW71000	K- -6	de 260 a 263	Pared	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	5,3	3,98	<0,02	1,73	2,25	0,0	54,1	124,1	124,4	-54,1	-124,1	-124,4	
C. Verde	EW71000	K- -6	de 300 a 303	Pared	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	5,9	3,87	<0,02	0,90	2,97	2,3	28,1	120,6	120,9	-25,8	-118,3	-118,6	
C. Verde	EW71000	K- -4	de 390 a 393	Mina	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	5,7	2,74	<0,02	0,37	2,37	0,5	11,6	85,3	85,6	-11,1	-84,8	-85,1	
C. Verde	EW71000	K- -4	de 440 a 443	Pared	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	7,2	3,34	<0,02	0,72	2,62	1,8	22,5	104,1	104,4	-20,7	-102,3	-102,6	
C. Verde	EW71000	K- -4	de 51,9 a 53,4		Granodiorita Yarabamba	Filica	lamente oxidada	4,6	4,59	1,70	<0,02	2,89	-1,0	0,3	90,3	143,4	143,4	-1,3	-91,3	-144,4
C. Verde	EW71000	K- -4	de 203 a 206		Granodiorita Yarabamba	Silificación	Oxidado	5,3	0,47	0,32	0,09	0,06	-0,3	2,8	4,7	14,7	-3,1	-5,0	-15,0	
C. Verde	EW71000	K-4	de 250 a 253	Mina	Granodiorita Yarabamba Brechada	Silificación	No oxidado	6,6	0,88	<0,02	0,17	0,71	0,0	5,3	27,5	27,5	-5,3	-27,2	-27,5	
C. Verde	EW71000	K-4	de 490 a 493	Mina	Porfido Dacítico Monz.	Silificación	No oxidado	7,5	1,82	0,59	0,09	1,14	5,5	2,8	38,4	56,9	2,7	-32,9	-51,4	
C. Verde	EW71000	K-4	de 520 a 523	Mina/Pared	Porfido Dacítico Monz.	Silificación	No oxidado	7,9	1,31	0,63	0,03	0,65	11,8	0,9	21,3	40,9	10,9	-9,5	-29,1	
C. Verde	EW71000	K-7	de 430 a 433	Pared/Mina	Porfido Dacítico Monz.	Potásica	No oxidado	7,9	0,76	0,13	0,02	0,61	31,2	0,6	19,7	23,8	30,6	11,5	7,5	
C. Verde	EW71000	K-16	de 105 a 108		Charcani gneiss	Potásica	No oxidado	8,3	0,57	<0,02	<0,02	0,57	8,8	0,3	17,5	17,8	8,5	-8,7	-9,0	
C. Verde	EW71000	K-20	de 270 a 273	Mina	Yarabamba Granodiorita	Propilica Interna	No oxidado	7,6	2,39	<0,02	0,63	1,76	6,0	19,7	74,4	74,7	-13,7	-68,4	-68,7	
C. Verde	EW71000	K-20	de 330 a 333	Pared	Yarabamba Granodiorita	Potásica	No oxidado	8,0	1,90	0,38	0,49	1,03	19,6	15,3	47,5	4,3	-27,9	-39,8		
C. Verde	EW71000	K-22	de 60 a 63		Granodiorita Yarabamba Brechada	Propilica Interna	No oxidado	6,7	1,78	<0,02	0,48	1,30	0,5	15,0	55,3	55,6	-14,5	-54,8	-55,1	
C. Verde	EW71000	K-22	de 170 a 173	Mina	Granodiorita Yarabamba	Silificación	No oxidado	5,8	3,07	<0,02	1,49	1,58	2,0	46,6	95,6	95,9	-44,6	-93,6	-93,9	
C. Verde	EW71000	K-22	de 240 a 243	Pared	Granodiorita Yarabamba	Silificación	No oxidado	7,5	1,91	<0,02	0,63	1,28	5,0	19,7	59,4	59,7	-14,7	-54,4	-54,7	
C. Verde	EW71000	K-10A	de 380 a 383	Mina	Porfido Dacítico Monz.	Potásica	No oxidado	8,0					2,5							
C. Verde	EW71000	K-10A	de 227 a 230	Mina	Porfido Dacítico Monz.	Propilica Interna	No oxidado	8,1	1,75	<0,02	0,05	1,70	1,6	54,4	54,7	54,7	20,3	-32,5	-32,8	
C. Verde	NS22500	O-08	de 430 a 433	Mina	Porfido Dacítico Monz.	Propilica Interna	No oxidado	7,4	2,36	0,58	0,17	1,61	1,8	5,3	55,6	73,8	-3,5	-53,8	-72,0	
C. Verde	NS22500	O-08	de 460 a 463	Pared	Porfido Dacítico Monz.	Potásica	No oxidado	8,3	0,75	0,09	<0,02	0,66	9,5	0,3	20,6	23,4	9,2	-11,1	-13,9	
S. Rosa	NS24100	500-40	de 70 a 73	Mina/Pared	Granodiorita Yarabamba	Argilica	No oxidado	4,7	3,26	<0,02	1,60	1,66	-1,3	50,0	101,6	101,9	-51,3	-102,9	-103,2	
S. Rosa	EW69750	503-25,5	de 80 a 83	Mina/Pared	Granodiorita Yarabamba	Propilica externa	Oxidado?	7,7	1,79	<0,02	0,62	1,17	3,8	19,4	55,6	55,9	-15,6	-51,8	-52,1	
S. Rosa	EW69800	504-32	de 10 a 13	Mina	Porfido Dacítico Monz.	Silificación	rtemente oxidada	6,9	0,03	<0,02	0,03	0,3	0,6	0,9	0,6	0,9	0,0	-0,3	-0,6	
S. Rosa	EW69801	504-32	de 100 a 103	Mina/Pared	Porfido Dacítico Monz.	Propilica externa	No oxidado	7,4	2,74	<0,02	1,19	1,55	4,3	37,2	85,3	85,6	-32,9	-81,0	-81,3	
S. Rosa	NS24100	504-40	de 240 a 243	Mina/Pared	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	7,2	3,08	<0,02	1,27	1,81	3,5	39,7	95,9	96,3	-36,2	-92,4	-92,8	
S. Rosa	EW69900	506-19	de 20 a 23	Pared	Granodiorita Yarabamba	Propilica externa	rtemente oxidada	6,6	0,10	0,05	0,02	0,03	-0,3	0,6	1,6	3,1	-0,9	-1,9	-3,4	
S. Rosa	EW69900	506-38	de 40 a 43	Mina	Granodiorita Yarabamba	Filica	Blanco	4,1	3,90	0,11	1,13	2,66	-2,3	35,3	118,4	121,9	-37,6	-120,7	-124,2	
S. Rosa	EW69900	506-42	de 440 a 443	Pared	Granodiorita Yarabamba Brechada	Potásica	No oxidado	8,0	1,81	0,51	0,05	1,25	12,5	1,6	40,6	56,6	10,9	-28,1	-44,1	
S. Rosa	EW69900	506-46	de 240 a 243	Mina	Brecha cuarzo	Filica	No oxidado	7,3	1,86	<0,02	0,53	1,33	2,0	16,6	57,8	58,1	-14,6	-55,8	-56,1	
S. Rosa	EW69900	506-46	de 282 a 285	Pared	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	7,5	2,28	<0,02	0,77	1,51	3,3	24,1	70,9	71,3	-20,8	-67,6	-68,0	
S. Rosa	EW69900	506-48	de 130 a 133	Mina	Granodiorita Yarabamba	Propilica externa	No oxidado	7,8	1,66	<0,02	0,83	0,83	5,0	25,9	51,6	51,9	-20,9	-46,6	-46,9	
S. Rosa	EW69900	506-48	de 190 a 193	Pared	Granodiorita Yarabamba	Propilica externa	Oxidado	7,7	2,00	<0,02	0,55	1,45	2,8	17,2	62,2	62,5	-14,4	-59,4	-59,7	
S. Rosa	EW69900	506-49	de 60 a 63	Pared/Mina	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	6,6	2,82	<0,02	1,05	1,77	3,0	32,8	87,8	88,1	-29,8	-84,8	-85,1	
S. Rosa	NS24150	507-41	de 350 a 353	Mina	Granodiorita Yarabamba	Filica	Oxidado?	8,0	2,02	0,21	0,35	1,46	2,0	10,9	56,6	63,1	-8,9	-54,6	-61,1	
S. Rosa	NS24150	510-41	de 340 a 343	Mina/Pared	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	7,4	2,15	0,58	0,61	0,96	29,9	19,1	49,1	67,2	10,8	-19,2	-37,3	
S. Rosa	NS24100	515-40	de 160 a 163	Mina	Porfido Dacítico Monz.	Silificación	No oxidado	7,1	2,40	<0,02	1,20	1,20	5,0	37,5	74,7	75,0	-32,5	-69,7	-70,0	
S. Rosa	NS24150	516-41	de 100 a 103	Mina	Granodiorita Yarabamba	Propilica Interna	No oxidado	7,7	1,55	<0,02	0,69	0,86	4,3	21,6	48,1	48,4	-17,3	-43,8	-44,1	
S. Rosa	NS24150	516-41	de 180 a 183	Mina/Pared	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	6,7	2,10	<0,02	1,11	0,99	5,3	34,7	65,3	65,6	-29,4	-60,0	-60,3	
S. Rosa	NS24100	519-40	de 105 a 108	Mina	Granodiorita Yarabamba	Argilica	No oxidado	7,6	1,29	<0,02	0,30	0,99	4,8	9,4	40,0	40,3	-4,6	-35,2	-35,5	
S. Rosa	NS24100	519-40	de 160 a 163	Mina/Pared	Granodiorita Yarabamba	Filica	No oxidado	7,2	2,76	<0,02	1,53	1,23	4,5	47,8	85,9	86,3	-43,3	-81,4	-81,8	

PGA Potencial de generación de ácido
PNN Potencial de neutralización neto

Tabla 3A
AC/CC para Determinación PN (Método ABA Modificado)

Muestra	Potencial de Neutralización (kgCaCO3/Tonelada)	Potencial de Neutralización (kgCaCO3/Tonelada)
<i>Duplicados</i>		
K4 250-253	-0,3	0,0
K 20 330-333	19,6	19,6
516 41 180-183	5,3	5,3
506 46 240-243	2,0	2,0
NBM-1 Referencia (ABA PN Mod= 42)	42,0	-

Tabla 3B
AC/CC para Especiación de Azufre

Muestra		
<i>Duplicados & Estadares - Azufre Total</i>	Azufre Total (%)	Azufre Total (%)
506-46 282-285	2,28	2,34
516-41 180-183	2,10	2,11
CN-4 110-113	0,12	0,12
CN-12 200-203	<0.02	<0.02
CN-18 80-83	0,08	0,08
K-6 260-263	3,98	3,82
O-08 460-463	0,75	0,73
STANDARD CSB (5.3% S)	5,30	5,30
STANDARD (0.11% S)	0,12	0,15
<i>Duplicados - sulfato azufre</i>	Sulfato-Azufre (%)	Sulfato-Azufre (%)
K-22 60-63	<0.02	<0.02
506-46 282-285	<0.02	<0.02
K10A 380-383	0,14	0,13
K4 390-393	<0.02	<0.02
<i>Duplicados - sulfuro azufre</i>	Sulfuro-Azufre (%)	Sulfuro-Azufre (%)
K-22 60-63	0,48	0,32
506-46 282-285	0,77	0,91
K10A 380-383	0,05	<0.02
K4 390-393	0,37	1,14

Tabla 4A
Comparación de Especiación de Azufre
Utilizando un Método de Determinación Sulfuro-Azufre más Agresivo

Muestra		Pasta	Total	Sulfato	Sulfuro	Insoluble en Acido
Prefijo - Sufijo de la perforación	Intervalo (approx.) (m)	pH	Azufre (%)	Azufre (%)	Azufre (%)	Azufre (%)
Datos originales con ácido nítrico 1:7 para determinación sulfuro-azufre.						
K-4	de 51.9 a 53.4	4,6	4,59	1,70	<0.02	2,89
K-6	de 300 a 303	5,9	3,87	<0.02	0,90	2,97

Datos nuevos con digestión de agua regia más agresiva para determinación Sulfuro-Azufre						
K-4	de 51.9 a 53.4	4,6	4,59	1,70	1,03	1,86
K-6	de 300 a 303	5,9	3,87	<0.02	3,63	0,24

Tabla 4B
Resultados del refinamiento de perfil Rietveld XRD y su Comparación con el Analisis Químico Via Húmeda

Resultados Rietveld XRD		
Minerales (wt%)	K-(-4) 51.9	K-(-6) 300
Cuarzo	43,2	47,3
Muscovita	15,2	41,3
Magnetita	0,6	0,8
Calcita	0,9	0,3
Talco	6,3	
Clorito		3,3
Pirita	0,4	5,9
Alunita	33,5	
Chalcopyrita?		0,5
Tenantita?		0,5
Total	100	100

Datos de Azufre para la Muestra K-(-4) 51.9		
Calculados en base a Mineralogía		
Sulfato -S	Sulfuro -S	Total S
(%)	(%)	(%)
	0,2	
4,3		
4,3	0,2	4,5

Datos de Azufre para la Muestra K-(-6) 300		
Calculados en base a Mineralogía		
Sulfato -S	Sulfuro -S	Total S
(%)	(%)	(%)
	3,1	
	0,17	
	0,14	
0,0	3,5	3,5

Totales para S forms basados en Mineralogía por Rietveld XRD

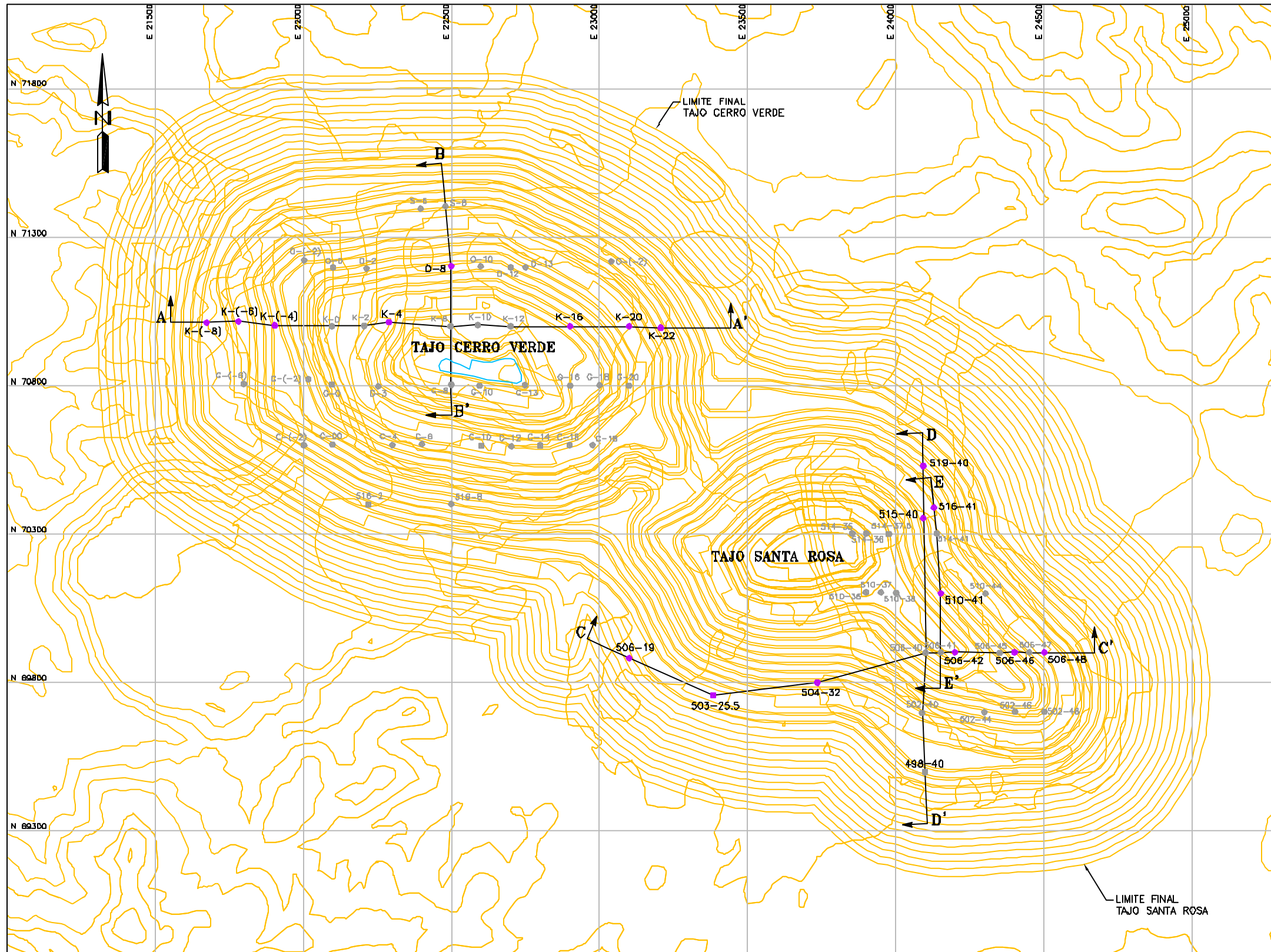
Nota: ? implica que las fases son posibles pero no han sido positivamente identificadas.

Resultados del Analisis Químico Via Húmeda				
Sulfato-S por Extracción con HCl Concentrado	3,56		0,24	
Sulfuro-S por Digestion de Agua Regia		1,03		3,63
Total por LECO			4,59	3,87

Tabla 5
Resumen de Resultados de las Pruebas de Lixiviación SPLP

Tajo	Prefijo - Sufijo de la perforación	Intervalo (m)	SPLP pH	Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Ag mg/L	Al mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	As mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Bi mg/L	B mg/L	Cd mg/L	Cr mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Pb mg/L	Li mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L	PO4 mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Sr mg/L	Te mg/L	Tl mg/L	Th mg/L	Sn mg/L	Ti mg/L	U mg/L	V mg/L	Zn mg/L	Zr mg/L
C. Verde	516-8	de 290 a 293	6,05	0,79	2,37	0,13	0,56	1,75	< 0,0001	0,013	< 0,05	0,008	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,07	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	0,019	< 0,001	< 0,001	0,016	< 0,001	0,07	0,001	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,006	< 0,01
C. Verde	516-8	de 370 a 373	7,91	248	3,08	2,92	1,18	2,02	< 0,0001	0,18	0,12	0,063	< 0,001	0,037	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	0,15	0,001	< 0,001	1,25	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01	
C. Verde	A-8	de 340 a 343	6,62	353	4,95	3,34	1,01	1,77	< 0,0001	0,012	0,16	0,084	< 0,001	0,025	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	0,001	0,023	< 0,001	< 0,001	0,0018	< 0,001	0,17	< 0,001	< 0,001	1,8	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01
C. Verde	A-8	de 397 a 400	6,35	367	4,44	2,23	1,04	1,95	< 0,0001	0,006	0,18	0,08	< 0,001	0,003	0,025	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	0,006	0,01	< 0,001	< 0,001	0,001	0,002	< 0,001	2,05	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	0,001	< 0,0005	< 0,001	0,013	< 0,01	
C. Verde	I-8	de 420 a 423	9,31	5,52	1,28	0,44	0,89	2,75	< 0,0001	0,61	< 0,05	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	0,003	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,001	0,08	< 0,001	0,015	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01	
C. Verde	K-8	de 170 a 173	7,75	5,17	2,83	0,29	0,53	1,99	< 0,0001	0,27	< 0,05	0,016	0,005	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	0,012	< 0,001	< 0,001	0,453	< 0,001	0,07	0,037	< 0,001	0,005	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	0,02
C. Verde	K-6	de 260 a 263	4,61	1,19	4,1	0,48	0,45	1,74	< 0,0001	0,026	< 0,05	0,023	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,001	< 0,05	0,0008	< 0,001	0,008	0,22	< 0,001	< 0,001	0,0014	0,004	0,07	0,001	< 0,001	0,006	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	0,053	< 0,01
C. Verde	K-6	de 300 a 303	5,43	1,49	3,99	0,63	0,71	1,8	< 0,0001	0,035	< 0,05	0,049	0,002	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,05	0,0013	< 0,001	0,004	0,046	< 0,001	< 0,001	0,0021	0,002	0,09	0,01	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	0,039	< 0,01
C. Verde	K-4	de 51.9 a 53	4,41	1,12	2,56	0,18	0,66	1,57	< 0,0001	0,16	< 0,05	0,025	< 0,001	0,005	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	0,017	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	0,06	< 0,001	0,019	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	0,057	< 0,01		
C. Verde	K-4	de 390 a 393	4,66	1,82	3,39	0,75	0,61	1,89	< 0,0001	0,018	< 0,05	0,021	< 0,001	0,003	< 0,001	< 0,001	< 0,05	0,0008	< 0,001	0,012	0,12	< 0,001	< 0,001	0,0014	0,003	0,05	< 0,001	0,006	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	0,056	< 0,01	
C. Verde	K-4	de 440 a 443	7,78	3,15	2,29	0,48	0,64	2,35	< 0,0001	0,2	< 0,05	0,006	< 0,001	0,003	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	0,05	< 0,001	< 0,001	0,0082	< 0,001	0,07	0,008	< 0,001	0,007	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	0,001	< 0,0005	< 0,001	0,006	< 0,01
C. Verde	K-4	de 203 a 206	6,32	0,17	3	< 0,05	0,38	2,12	< 0,0001	0,092	< 0,05	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	0,003	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	0,06	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01
C. Verde	K-4	de 250 a 253	7,13	0,1	2,07	< 0,05	0,53	2,33	< 0,0001	0,28	< 0,05	0,001	0,007	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	0,003	< 0,001	< 0,001	0,0031	< 0,001	0,06	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	0,002	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01
C. Verde	K-4	de 490 a 493	8,18	201	2,78	3,56	6,21	2,07	< 0,0001	0,26	< 0,05	0,019	< 0,001	0,019	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,0012	< 0,001	0,13	< 0,001	< 0,001	0,95	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01	
C. Verde	K-4	de 520 a 523	8,79	101	1,87	1,92	5,6	2,7	< 0,0001	0,41	< 0,05	0,006	0,044	0,012	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	0,016	< 0,001	< 0,001	0,0008	< 0,001	0,11	< 0,001	< 0,001	0,57	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01
C. Verde	K-7	de 430 a 433	8,89	48,7	2,27	1,43	5,34	2,71	< 0,0001	0,41	< 0,05	0,005	0,002	0,005	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,0007	< 0,001	0,09	< 0,001	< 0,001	0,25	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	0,001	< 0,005	< 0,01	
C. Verde	K-16	de 105 a 108	9,26	4,52	1,18	0,68	1,22	3,77	< 0,0001	0,72	< 0,05	0,02	< 0,001	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	0,007	< 0,001	< 0,001	0,0068	< 0,001	0,08	< 0,001	< 0,001	0,013	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	0,003	< 0,0005	0,001	< 0,005	< 0,01
C. Verde	K-20	de 270 a 273	8,18	2,53	1,4	0,76	1,48	3,36	< 0,0001	0,39	< 0,05	0,005	< 0,001	0,027	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	0,004	0,002	< 0,001	0,0008	< 0,001	0,06	< 0,001	< 0,001	0,01	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	0,005	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01
C. Verde	K-20	de 330 a 333	8,80	110	3,43	1,88	2,02	2,19	< 0,0001	0,34	< 0,05	0,028	0,001	0,009	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,0006	< 0,001	0,12	0,002	< 0,001	0,48	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01	
C. Verde	K-22	de 60 a 63	6,45	2,44	2,32	0,86	0,88	2,18	< 0,0001	0,038	< 0,05	0,01	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,05	0,0024	< 0,001	0,003	0,004	< 0,001	< 0,001	0,0077	< 0,001	0,07	0,001	< 0,001	0,012	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01
C. Verde	K-22	de 170 a 173	4,65	2,3	3,02	0,81	0,47	1,56	< 0,0001	0,022	< 0,05	0,3	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	0,05	< 0,0002	< 0,001	0,005	0,027	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	0,002	0,09	< 0,001	< 0,001	0,011	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	0,05	< 0,01
C. Verde	K-22	de 240 a 243	6,44	1,6	1,47	0,47	0,86	2,28	< 0,0001	0,13	< 0,05	0,023	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,0038	< 0,001	0,06	0,002	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01	
C. Verde	K-10A	de 227 a 230	9,23	4,81	2,39	1,01	1,7	3,38	< 0,0001	0,36	< 0,05	0,002	0,002	0,004	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	0,0041	< 0,001	0,08	0,002	< 0,001	0,015	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01
C. Verde	K-10A	de 380 a 383	8,77	78,1	0,56	0,41	3,21	2,43	< 0,0001	0,37	< 0,05	0,01	< 0,001	0,006	< 0,001	< 0,001	< 0,05	0,0004	< 0,001	< 0,001	0,019	< 0,001	< 0,001	0,0048	< 0,001	0,1	< 0,001	< 0,001	0,25	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,001	0,01	< 0,01
C. Verde	O-8	de 430 a 433	8,34	301	3,68	1,31	4,48	2,16	< 0,0001	0,21	0,13	0,048	< 0,001	0,017	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,0008	< 0,001	0,16	< 0,001	< 0,001	0,56	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	0,001	< 0,0005	< 0,001	< 0,005	< 0,01	
C. Verde	O-8	de 460 a 463	9,36	22,1	2,89	0,62	3,87	3,01	< 0,0001	0,62	< 0,05	0,002	0,002	0,003	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,0002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,0055	< 0,001	0,11	< 0,001	< 0,001	0,12	< 0,001	< 0,0001	< 0,0005	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	0,002	< 0,005	< 0,01	
S. Rosa	500-40	de 70 a 73	5,09	0,69	3,41	0,27	0,72	1,3	< 0,0001	0,007	< 0,05	0,023	0,002	0,054	< 0,001	< 0,001	< 0,05																					

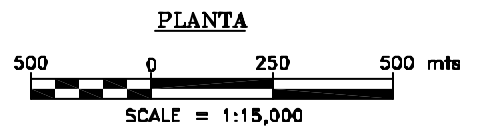
Figuras



LEYENDA:

- TAJO
- 505-18 PUNTOS DE MUESTREO REALIZADOS POR KP/ 2003
- 518-40 PUNTOS DE MUESTREO ANTERIORES AL ESTUDIO

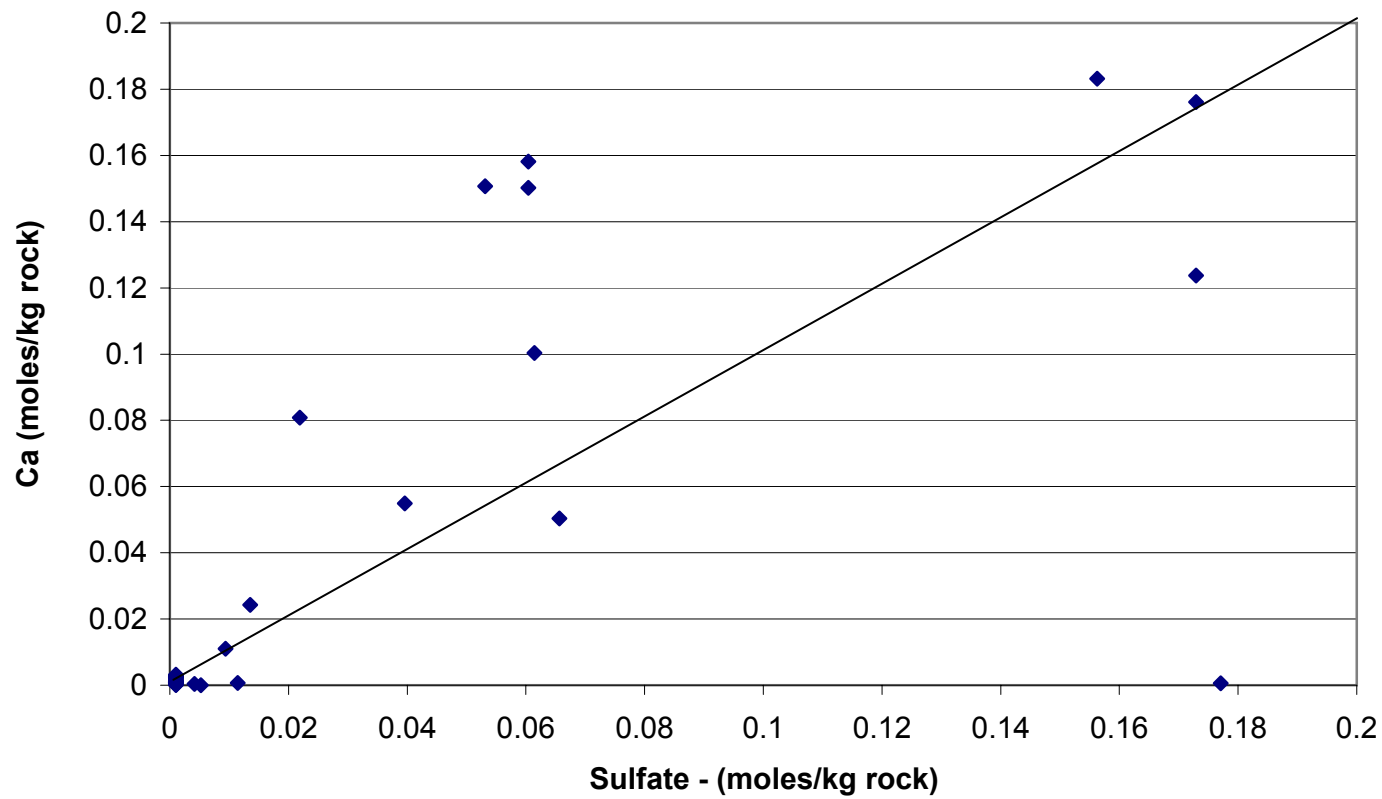
A-A' SECTION EW71000
 B-B' SECTION NS 22500
 C-C' SECTION EW69900
 + 503-25.5 AND 504-32
 D-D' SECTION NS24100
 E-E' SECTION NS24150



XREF. NO
 ESCALA
 A3
 KP

CLIENTE	SOCIEDAD MINERA CERRO VERDE S.A.A.			
PROYECTO	ESTUDIO DE LINEA BASE AMBIENTAL PLANTA DE SULFUROS			
TITULO	UBICACION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE GENERACION AGUAS ACIDAS			
Knight Piésold CONSULTING				
DISEÑADO POR	RS	REVISADO POR	LZ	No.
DIBUJADO POR	RC	APROBACION CLIENTE		
				FIGURA 1
				REV. A

Figura 2
Sulfato Extraíble y Calcio Lixiviable



Anexo J-1
Resultados de Laboratorio
(ABA, SPLP and XRD)

Table 2a: QA/QC for NP Determination (Mod. ABA Method)

Sample	Neutralisation Potential (kgCaCO3/Tonne)	Neutralisation Potential (kgCaCO3/Tonne)
<i>Duplicates</i>		
K4 250-253	-0.3	0.0
K 20 330-333	19.6	19.6
516 41 180-183	5.3	5.3
506 46 240-243	2.0	2.0
NBM-1 Reference (Mod ABA NP = 42)	42.0	-

Table 2b: QA/QC for Sulphur Speciation

Sample	Sulphur/Sulphate (Wt.%)	Sulphur/Sulphate (Wt.%)
<i>Total sulphur</i>		
506-46 282-285	2.28	2.34
516-41 180-183	2.10	2.11
CN-4 110-113	0.12	0.12
CN-12 200-203	<0.02	<0.02
CN-18 80-83	0.08	0.08
K-6 260-263	3.98	3.82
O-08 460-463	0.75	0.73
STANDARD CSB (5.3% S)	5.30	5.30
STANDARD (0.11% S)	0.12	0.15
<i>Duplicates - sulphate sulphur</i>		
K-22 60-63	<0.02	<0.02
506-46 282-285	<0.02	<0.02
K10A 380-383	0.14	0.13
K4 390-393	<0.02	<0.02
<i>Duplicates - sulphide sulphur</i>	Sulfide-Sulfur (wt%)	Sulfide-Sulfur (wt%)
K-22 60-63	0.48	0.32
506-46 282-285	0.77	0.91
K10A 380-383	0.05	<0.02
K4 390-393	0.37	1.14

RSD
28%
12%
72%

Approved By:

Rik Vos

Table 3A. Sulphur Speciation Comparison Using More Aggressive Sulphide-Sulphur Determination Method

Sample				Paste pH	Total Sulphur (Wt.%)	Sulphate Sulphur (Wt.%)	Sulphide Sulphur (Wt.%)	Acid Insoluble Sulphur (Wt.%)	Maximum Potential Acidity* (Kg CaCO3/Tonne)	Neutralization Potential (Kg CaCO3/Tonne)	Net Neutralization Potential (Kg CaCO3/Tonne)	Fizz Rating
Hole Prefix	Hole Suffix	Top (approx.) (m)	Bottom (approx.) (m)									
Original data with 1:7 nitric acid for sulphide-sulphur determination.												
K	-4	51.9	53.4	4.6	4.59	1.70	<0.02	2.89	<0.6	-1.0	-1.0	none
K	-6	300	303	5.9	3.87	<0.02	0.90	2.97	28.1	2.3	-25.8	none

New data with more aggressive aqua regia digestion for sulphide-sulphur determination.

K	-4	51.9	53.4	4.6	4.59	1.70	1.03	1.86	32.2	-1.0	-33.2	none
K	-6	300	303	5.9	3.87	<0.02	3.63	0.24	113.4	2.3	-111.1	none

*Based on sulphide-sulphur

Table 3B. Results of quantitative phase analysis (wt.%) and Comparison with Wet Chemistry Analysis

	Rietveld Results		K-4			K-6		
	K-4	K-6	Calculated		Total S (Wt.%)	Calculated		Total S (Wt.%)
			Sulphate -S (Wt.%)	Sulphide -S (Wt.%)		Sulphate -S (Wt.%)	Sulphide -S (Wt.%)	
Quartz	43.2	47.3						
Muscovite	15.2	41.3						
Magnetite	0.6	0.8						
Calcite	0.9	0.3						
Talc	6.3							
Chlorite		3.3						
Pyrite	0.4	5.9		0.2			3.1	
Alunite	33.5		4.3					
Chalcopyrite?		0.5					0.17	
Tennantite?		0.5					0.14	
Total	100	100						
Totals by Rietveld XRF			4.3	0.2	4.5	0.0	3.5	3.5
Totals by Wet Chemistry			3.56	1.03		0.24	3.63	
Total by LECO					4.59			3.87

Note: ? implies that the phases are possible but not positively identified.

Table 4: Metals in SPLP Extracts

Sample ID	pH	Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Ag mg/L	Al mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L
K 8 170 173	7.75	5.17	2.83	0.29	0.53	1.99	< 0.0001	0.27	< 0.05	0.016
K 6 260 263	4.61	1.19	4.1	0.48	0.45	1.74	< 0.0001	0.026	< 0.05	0.023
K 6 300 303	5.43	1.49	3.99	0.63	0.71	1.8	< 0.0001	0.035	< 0.05	0.049
K 4 390 393	4.66	1.82	3.39	0.75	0.61	1.89	< 0.0001	0.018	< 0.05	0.021
K 4 440 443	7.78	3.15	2.29	0.48	0.64	2.35	< 0.0001	0.2	< 0.05	0.006
K 4 51.9 53	4.41	1.12	2.56	0.18	0.66	1.57	< 0.0001	0.16	< 0.05	0.025
K 4 203 206	6.32	0.17	3	< 0.05	0.38	2.12	< 0.0001	0.092	< 0.05	< 0.001
K 4 250 253	7.13	0.1	2.07	< 0.05	0.53	2.33	< 0.0001	0.28	< 0.05	0.001
K 4 490 493	8.18	201	2.78	3.56	6.21	2.07	< 0.0001	0.26	< 0.05	0.019
K 4 520 523	8.79	101	1.87	1.92	5.6	2.7	< 0.0001	0.41	< 0.05	0.006
K 7 430 433	8.89	48.7	2.27	1.43	5.34	2.71	< 0.0001	0.41	< 0.05	0.005
K 16 105 108	9.26	4.52	1.18	0.68	1.22	3.77	< 0.0001	0.72	< 0.05	0.02
K 20 270 273	8.18	2.53	1.4	0.76	1.48	3.36	< 0.0001	0.39	< 0.05	0.005
K 20 330 333	8.80	110	3.43	1.88	2.02	2.19	< 0.0001	0.34	< 0.05	0.028
K 22 60 63	6.45	2.44	2.32	0.86	0.88	2.18	< 0.0001	0.038	< 0.05	0.01
K 22 170 173	4.65	2.3	3.02	0.81	0.47	1.56	< 0.0001	0.022	< 0.05	0.3
K 22 240 243	6.44	1.6	1.47	0.47	0.86	2.28	< 0.0001	0.13	< 0.05	0.023
K 10A 380 383	8.77	78.1	0.56	0.41	3.21	2.43	< 0.0001	0.37	< 0.05	0.01
K 10A 227 230	9.23	4.81	2.39	1.01	1.7	3.38	< 0.0001	0.36	< 0.05	0.002
516 08 290 293	6.05	0.79	2.37	0.13	0.56	1.75	< 0.0001	0.013	< 0.05	0.008
516 08 370 373	7.91	248	3.08	2.92	1.18	2.02	< 0.0001	0.18	0.12	0.063
A 08 340 343	6.62	353	4.95	3.34	1.01	1.77	< 0.0001	0.012	0.16	0.084
A 08 397 400	6.35	367	4.44	2.23	1.04	1.95	< 0.0001	0.006	0.18	0.08
I 08 420 423	9.31	5.52	1.28	0.44	0.89	2.75	< 0.0001	0.61	< 0.05	0.001
O 08 430 433	8.34	301	3.68	1.31	4.48	2.16	< 0.0001	0.21	0.13	0.048
O 08 460 463	9.36	22.1	2.89	0.62	3.87	3.01	< 0.0001	0.62	< 0.05	0.002
506 19 20 23	7.45	0.08	1.48	< 0.05	9.49	5.57	< 0.0001	0.67	0.19	0.002
506 38 40 43	4.27	1.3	3.67	0.91	0.6	1.09	< 0.0001	0.043	< 0.05	0.048
506 42 440 443	8.55	302	4.02	1.57	5.4	2.51	< 0.0001	0.35	0.16	0.029
506 46 240 243	6.76	1.64	2.76	0.27	0.47	1.64	< 0.0001	0.15	< 0.05	0.053
506 46 282 285	7.55	1.1	2.64	0.41	0.84	2.88	< 0.0001	0.43	< 0.05	0.007
506 48 130 133	7.64	1.47	1.63	0.44	1.29	3.54	< 0.0001	0.45	0.13	0.009
506 48 190 193	7.53	1.98	2.43	0.5	0.99	3.81	< 0.0001	0.41	< 0.05	0.007
506 49 60 63	6.44	2.05	2.71	1.01	0.8	2.12	< 0.0001	0.029	< 0.05	0.12
504 32 10 13	7.57	< 0.05	0.81	< 0.05	4.56	4.92	< 0.0001	0.53	0.26	0.001
504 32 100 103	6.85	1.62	2.83	0.56	1.51	3.03	< 0.0001	0.33	0.07	0.023
503 25.5 80 83	7.72	3.1	1.67	0.63	1.17	2.42	< 0.0001	0.2	< 0.05	0.006
500 40 70 73	5.09	0.69	3.41	0.27	0.72	1.3	< 0.0001	0.007	< 0.05	0.023

Table 4: Metals in SPLP Extracts (Cont)

As mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Bi mg/L	B mg/L	Cd mg/L	Cr mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Pb mg/L	Li mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L
0.005	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.012	< 0.001	< 0.001	0.453	< 0.001
< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.05	0.0008	< 0.001	0.008	0.22	< 0.001	< 0.001	0.0014	0.004
0.002	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.05	0.0013	< 0.001	0.004	0.046	< 0.001	< 0.001	0.0021	0.002
< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.05	0.0008	< 0.001	0.012	0.12	< 0.001	< 0.001	0.0014	0.003
< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.05	< 0.001	< 0.001	0.0082	< 0.001
< 0.001	0.005	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.017	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001
< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001
0.007	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	0.0031	< 0.001
< 0.001	0.019	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0012	< 0.001
0.044	0.012	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.016	< 0.001	< 0.001	0.0008	< 0.001
0.002	0.005	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0007	< 0.001
< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.007	< 0.001	< 0.001	0.0068	< 0.001
< 0.001	0.027	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.004	0.002	< 0.001	0.0008	< 0.001
0.001	0.009	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0006	< 0.001
< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.05	0.0024	< 0.001	0.003	0.004	< 0.001	< 0.001	0.0077	< 0.001
< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	0.05	< 0.0002	< 0.001	0.005	0.027	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	0.002
< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0038	< 0.001
< 0.001	0.006	< 0.001	< 0.001	< 0.05	0.0004	< 0.001	< 0.001	0.019	< 0.001	< 0.001	0.0048	< 0.001
0.002	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	0.0041	< 0.001
< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.07	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.019	< 0.001	< 0.001	0.016	< 0.001
< 0.001	0.037	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001
< 0.001	0.025	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	0.001	0.023	< 0.001	< 0.001	0.0018	< 0.001
0.003	0.025	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	0.006	0.01	< 0.001	< 0.001	0.001	0.002
< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001
< 0.001	0.017	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0008	< 0.001
0.002	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0055	< 0.001
< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	0.11	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001
< 0.001	0.008	< 0.001	< 0.001	< 0.05	0.14	< 0.001	0.056	27.9	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	0.008
0.003	0.034	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	0.0065	< 0.001
< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001
< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.005	< 0.001	< 0.001	0.0007	< 0.001
< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001
< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.007	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001
< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.05	0.0009	< 0.001	0.003	0.2	< 0.001	0.014	0.0006	< 0.001
< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	0.07	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.005	< 0.001	< 0.001	0.017	< 0.001
< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.006	< 0.001	0.002	0.0006	< 0.001
< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.11	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001
0.002	0.054	< 0.001	< 0.001	< 0.05	0.0006	< 0.001	< 0.001	6	< 0.001	< 0.001	0.0009	0.002

Table 4: Metals in SPLP Extracts (Cont)

PO4 mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Sr mg/L	Te mg/L	Tl mg/L	Th mg/L	Sn mg/L	Ti mg/L	U mg/L	V mg/L	Zn mg/L	Zr mg/L
0.07	0.037	< 0.001	0.005	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	0.02
0.07	0.001	< 0.001	0.006	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	0.053	< 0.01
0.09	0.01	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	0.039	< 0.01
0.05	< 0.001	< 0.001	0.006	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	0.056	< 0.01
0.07	0.008	< 0.001	0.007	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001	0.007	< 0.01
0.06	< 0.001	< 0.001	0.019	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	0.057	< 0.01
0.06	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.06	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.13	< 0.001	< 0.001	0.95	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.11	< 0.001	< 0.001	0.57	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.09	< 0.001	< 0.001	0.25	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	0.001	< 0.005	< 0.01
0.08	< 0.001	< 0.001	0.013	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.003	< 0.0005	0.001	< 0.005	< 0.01
0.06	< 0.001	< 0.001	0.01	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.005	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.12	0.002	< 0.001	0.48	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.07	0.001	< 0.001	0.012	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.09	< 0.001	< 0.001	0.011	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	0.05	< 0.01
0.06	0.002	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.1	< 0.001	< 0.001	0.25	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	0.01	< 0.01
0.08	0.002	< 0.001	0.015	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.07	0.001	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	0.006	< 0.01
0.15	0.001	< 0.001	1.25	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.17	< 0.001	< 0.001	1.8	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.18	0.028	< 0.001	2.05	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001	0.013	< 0.01
0.08	< 0.001	< 0.001	0.015	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.16	< 0.001	< 0.001	0.56	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.11	< 0.001	< 0.001	0.12	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	0.002	< 0.005	< 0.01
0.09	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.004	< 0.0005	< 0.001	0.009	< 0.01
0.08	< 0.001	< 0.001	0.006	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	0.0018	< 0.001	0.13	< 0.01
0.18	< 0.001	< 0.001	1.21	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.08	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.1	< 0.001	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.004	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.1	< 0.001	< 0.001	0.006	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.007	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.11	< 0.001	< 0.001	0.007	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.004	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.08	0.001	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	0.039	< 0.01
0.21	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.004	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.09	< 0.001	< 0.001	0.006	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.003	< 0.0005	< 0.001	0.006	< 0.01
0.09	< 0.001	< 0.001	0.007	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	< 0.001	0.016	< 0.01
0.09	0.001	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	0.047	< 0.01

Table 4: Metals in SPLP Extracts (Cont)

Sample ID	pH	Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Ag mg/L	Al mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L
504 40 240 243	6.78	1.04	2.67	0.42	0.91	2.8	< 0.0001	0.27	< 0.05	0.019
515 40 160 163	6.55	2.12	2.98	0.61	0.62	1.89	< 0.0001	0.084	< 0.05	0.11
519 40 105 108	8.30	4.77	1.38	1.06	1.71	4.42	< 0.0001	0.26	< 0.05	0.008
519 40 157 163	8.27	6.36	2.3	1.31	1.25	6.17	< 0.0001	0.34	< 0.05	0.007
507 41 350 353	6.87	162	3.6	0.53	0.49	1.42	< 0.0001	0.025	0.12	0.19
510 41 340 343	8.53	317	3.92	6.22	12.5	2.38	< 0.0001	0.19	0.15	0.055
516 41 100 103	7.77	5.58	2.11	1.17	1.34	5.05	< 0.0001	0.13	< 0.05	0.006
516 41 180 183	7.36	1.86	1.47	0.5	1.2	2.86	< 0.0001	0.28	< 0.05	0.01
CERRO NEGRO										
CN 12 20 23	7.86	0.16	1.22	< 0.05	2.15	4.8	< 0.0001	0.42	0.27	0.002
CN 12 80 83	6.84	0.17	1.44	0.07	0.85	2.13	< 0.0001	0.083	< 0.05	< 0.001
CN 12 110 113	7.13	0.11	1.97	< 0.05	0.37	2.94	< 0.0001	0.094	< 0.05	0.002
CN 12 160 163	6.75	0.33	1.71	0.21	0.48	2.88	< 0.0001	0.18	< 0.05	0.01
CN 12 200 203	6.96	0.07	1.36	< 0.05	0.54	2.22	< 0.0001	0.069	< 0.05	0.007
CN 13 200 203	7.37	0.16	1.01	0.08	1.75	3.45	< 0.0001	0.26	0.2	0.013
CN 13 240 243	7.16	0.1	1.35	< 0.05	0.96	4.23	< 0.0001	0.22	0.13	0.017
CN 4 5 8	8.15	0.1	1.92	< 0.05	3.26	5.45	< 0.0001	0.37	< 0.05	0.031
CN 4 40 43	6.98	0.54	1.57	0.22	1.49	1.76	< 0.0001	0.024	< 0.05	0.003
CN 4 100 103	6.95	0.26	3.26	0.14	0.78	1.93	< 0.0001	0.16	< 0.05	0.003
CN 4 110 113	7.48	< 0.05	2.23	< 0.05	1.56	3.17	< 0.0001	0.28	0.25	0.002
CN 17 160 163	8.66	0.87	1.41	0.38	0.99	3.35	< 0.0001	0.27	< 0.05	0.006
CN 17 200 203	7.55	0.32	1.51	0.1	1.66	4.01	< 0.0001	0.17	< 0.05	0.004
CN 1 10 13	7.56	0.5	3.24	0.15	1.49	3.61	< 0.0001	0.57	< 0.05	0.001
CN 1 150 153	6.90	0.84	2.21	0.27	0.89	4.18	< 0.0001	0.19	< 0.05	0.007
CN 10 100 103	7.61	0.29	1.54	0.21	0.77	2.66	< 0.0001	0.2	< 0.05	0.014
CN 10 130 133	7.23	0.18	1.53	0.09	0.64	2.73	< 0.0001	0.24	0.11	0.01
CN 10 170 173	7.38	0.27	1.99	0.14	0.69	3.1	< 0.0001	0.2	0.12	0.009
CN 11 140 143	8.12	0.09	0.5	0.07	1.36	3.76	< 0.0001	0.49	0.18	0.012
CN 11 200 203	9.26	4.18	2.92	0.99	2.6	6.18	< 0.0001	0.28	< 0.05	0.003
CN 14 150 153	8.10	0.11	0.89	0.08	0.72	2.22	< 0.0001	0.29	< 0.05	0.004
CN 14 180 183	8.05	0.07	0.94	0.05	0.57	3.11	< 0.0001	0.17	< 0.05	0.005
CN 14 220 223	8.62	1.49	2.31	0.59	1.05	4.2	< 0.0001	0.29	0.12	0.011
CN 14 250 253	7.53	0.12	1.6	0.07	0.98	4.13	< 0.0001	0.21	< 0.05	0.005
CN 18 40 43	6.76	0.37	0.78	0.22	0.55	2.39	< 0.0001	0.049	< 0.05	< 0.001
CN 18 80 83	7.13	0.09	1.68	0.08	1.07	6.15	< 0.0001	0.58	0.17	< 0.001
CN 18 110 113	7.13	0.19	1.31	0.09	0.56	1.62	< 0.0001	0.097	< 0.05	< 0.001
CN 18 220 223	6.97	0.42	2.07	0.24	1.05	2.07	< 0.0001	0.079	< 0.05	0.002
Tails Master Comp	8.61	87.6	2.9	2.17	0.72	2.43	< 0.0001	0.019	< 0.05	< 0.001
Blank March 25/03	4.97	< 0.01	< 0.002	< 0.01	< 0.01	0.05	< 0.00002	0.001	< 0.01	< 0.0002
Blank March 27/03	5.12	< 0.01	< 0.002	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.00002	< 0.001	< 0.01	< 0.0002

Table 4: Metals in SPLP Extracts (Cont.)

As mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Bi mg/L	B mg/L	Cd mg/L	Cr mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Pb mg/L	Li mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L
< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.005	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001
0.014	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	0.0004	< 0.001	0.002	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001
< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.008	< 0.001	< 0.001	0.0029	< 0.001
0.002	0.006	< 0.001	< 0.001	0.06	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	0.0007	< 0.001
< 0.001	0.008	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	0.001	0.004	< 0.001	< 0.001	0.0019	< 0.001
0.002	0.027	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	0.002	0.0006	< 0.001
0.017	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0041	< 0.001
< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0067	< 0.001
0.018	0.003	< 0.001	< 0.001	0.08	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.028	< 0.001	< 0.001	0.0025	< 0.001
0.004	0.001	< 0.001	< 0.001	0.11	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	0.0042	< 0.001
0.01	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	0.0011	< 0.001
0.005	0.014	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.047	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001
0.008	0.002	< 0.001	< 0.001	0.08	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.046	< 0.001	< 0.001	0.0012	< 0.001
0.007	0.042	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.021	0.001	< 0.001	0.0022	< 0.001
0.004	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.1	< 0.001	< 0.001	0.0008	< 0.001
0.006	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.14	< 0.001	0.002	< 0.0005	< 0.001
0.01	0.023	< 0.001	< 0.001	0.08	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	0.0007	< 0.001
< 0.001	0.1	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.005	< 0.001	< 0.001	0.0006	< 0.001
0.006	0.003	< 0.001	< 0.001	0.06	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.037	< 0.001	< 0.001	0.0012	< 0.001
0.003	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.021	< 0.001	< 0.001	0.0009	< 0.001
0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	0.0039	< 0.001
0.016	0.005	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.007	< 0.001	< 0.001	0.0011	< 0.001
< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.046	< 0.001	< 0.001	0.0006	< 0.001
0.006	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.026	< 0.001	< 0.001	0.0008	< 0.001
0.005	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.03	< 0.001	< 0.001	0.0006	< 0.001
0.011	0.003	< 0.001	< 0.001	0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.1	< 0.001	< 0.001	0.0006	< 0.001
0.006	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.028	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001
0.005	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.001	0.0006	< 0.001
0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.011	< 0.001	< 0.001	0.0012	< 0.001
0.009	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.06	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001
0.004	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.021	< 0.001	< 0.001	0.0009	< 0.001
0.01	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.037	< 0.001	< 0.001	0.0007	< 0.001
0.005	0.001	< 0.001	< 0.001	0.18	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	0.0015	< 0.001
0.007	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.063	< 0.001	< 0.001	0.0015	< 0.001
0.007	0.007	< 0.001	< 0.001	0.16	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0029	< 0.001
0.002	0.1	< 0.001	< 0.001	0.12	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	0.006	< 0.001	< 0.001	0.0018	< 0.001
0.003	0.006	< 0.001	< 0.001	< 0.05	< 0.0002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.02	< 0.001
< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.01	< 0.00004	< 0.0002	< 0.0002	0.0003	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0001	< 0.0002
< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.01	< 0.00004	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0001	< 0.0002

Table 4: Metals in SPLP Extracts (Cont)

PO4 mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Sr mg/L	Te mg/L	Tl mg/L	Th mg/L	Sn mg/L	Ti mg/L	U mg/L	V mg/L	Zn mg/L	Zr mg/L
0.09	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.004	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.1	0.006	< 0.001	0.01	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	0.024	< 0.01
0.08	< 0.001	< 0.001	0.019	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.12	0.002	< 0.001	0.03	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.14	< 0.001	< 0.001	0.26	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.2	< 0.001	< 0.001	0.85	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	0.0007	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.09	0.001	< 0.001	0.023	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.1	< 0.001	< 0.001	0.009	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.004	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.56	0.014	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.005	< 0.0005	0.001	< 0.005	< 0.01
0.17	0.002	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	0.002	< 0.005	< 0.01
0.19	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.11	< 0.001	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.15	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.15	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.005	< 0.0005	< 0.001	0.006	< 0.01
0.14	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001	0.005	< 0.01
0.59	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	0.005	< 0.005	< 0.01
0.12	0.017	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.09	0.011	< 0.001	0.005	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.11	0.012	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.003	< 0.0005	< 0.001	0.005	< 0.01
0.13	< 0.001	< 0.001	0.006	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	0.001	< 0.005	< 0.01
0.12	< 0.001	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.003	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.14	0.004	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.12	< 0.001	< 0.001	0.005	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.13	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.13	< 0.001	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.003	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.12	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.16	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.008	< 0.0005	0.002	< 0.005	< 0.01
0.1	< 0.001	< 0.001	0.018	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	0.002	< 0.005	< 0.01
0.14	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.002	< 0.0005	0.001	< 0.005	< 0.01
0.16	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	0.001	< 0.005	< 0.01
0.11	< 0.001	< 0.001	0.008	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.003	< 0.0005	0.001	< 0.005	< 0.01
0.16	< 0.001	0.006	0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.13	0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.16	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	0.003	< 0.0005	0.001	< 0.005	< 0.01
0.1	0.001	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.12	< 0.001	< 0.001	0.007	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.16	0.002	< 0.001	0.23	< 0.001	< 0.0001	< 0.0005	< 0.001	< 0.001	< 0.0005	< 0.001	< 0.005	< 0.01
0.066	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.00002	< 0.0001	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0001	< 0.0002	< 0.001	< 0.002
0.074	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.00002	< 0.0001	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0001	< 0.0002	< 0.001	< 0.002

Anexo J-2
Información Técnica sobre la Técnica XRD

Quantitative Phase Analysis of Sulfide-bearing Mine Wastes Using the Rietveld Method and X-ray Powder Diffraction Data.

Mati Raudsepp and Elisabetta Pani

Department of Earth & Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver, BC V6T 1Z, Canada.

E-mail: mraudsepp@eos.ubc.ca

Arnt Kern

Bruker-AXS GmbH, Oestliche Rheinbrueckenstr., 50 D-76181 Karlsruhe, Germany

E-mail: Arnt.Kern@bruker-axs.de

INTRODUCTION

Mining and milling operations are responsible for the production of billions of tonnes of waste rock and finely crushed tailings worldwide (e.g., Fig. 1). Subsequent exposure to abiotic and biotic interactions results in products that adversely affect the environment. Of particular concern is the generation of acid rock drainage (ARD) from the oxidation of sulfide-bearing wastes, which commonly results in effluents that are enriched in potentially toxic metals.

Today, most regulatory agencies require not only that water quality from existing mining wastes be controlled, but also that the possibility of ARD at potential mining sites be predicted. The prediction of ARD involves using various chemical methods and tests to determine how the minerals in samples of waste will behave upon weathering. Of crucial importance is knowledge of the relative amounts of the minerals which have significant amounts of acid-producing potential, AP (pyrite and pyrrhotite), and the minerals which have a high neutralization potential, NP (calcite).

The determination of AP and NP values is critical to successful acid-base accounting (ABA). Regardless of the type of tests done for ARD prediction, quantitative phase analysis of both AP and NP minerals is of prime importance. Here we demonstrate the application of a relatively new method of phase analysis, the Rietveld method, to a typical sulfide- and carbonate-bearing waste rock.

QUANTITATIVE PHASE ANALYSIS

Quantitative phase analysis is the measurement of the relative abundances of the constituent minerals in a sample. Traditionally, geologists have referred to this procedure as modal analysis. The units of the analysis may be in weight, mole or volume percent (calculated from area percent). In Rietveld analysis, the results are determined in weight percent, but these may be later recalculated to any desired unit.

Phase (modal) analysis has traditionally been done using visual methods (point counting, image analysis), relative intensities of peaks in X-ray powder-diffraction patterns (using standards), and normative calculations (using chemical analyses). Each of these traditional methods has disadvantages, which may be overcome using the Rietveld method [1]. Details are given in a previous paper [2].



Figure 1. Escondida Cu-Au-Ag open-pit mine, Chile. Image from the NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS, and the U.S. - Japan ASTER Science Team. Scale bar is 8 km.

X-RAY POWDER DIFFRACTION

From the atomic arrangement of a crystal (generally determined by single-crystal X-ray diffraction), we can calculate any powder diffraction pattern. This ability is fundamental to doing quantitative phase analysis using the Rietveld method. In any X-ray powder diffraction pattern, the peak positions are a function of the radiation used, and the size and symmetry of the unit cell; the peak intensities are a function of the kinds of atoms and their arrangement in the unit cell, as modified by various instrumental and method-dependent parameters. Thus, the intensities and positions of peaks in an X-ray powder diffraction pattern are characteristic of a crystalline compound with a particular composition and crystal structure. Therefore, the X-ray powder diffraction pattern of a phase may be used as a "fingerprint" to identify the phase. Traditionally, this simple identification of crystalline compounds has been the familiar goal of most X-ray powder diffraction studies. A database of standards such as that published by the International Centre for Diffraction Data is required.

THE RIETVELD METHOD

The Rietveld method is a standardless, full profile approach to quantitative phase analysis using X-ray powder diffraction data. A calculated diffraction pattern is generated which is compared with the observed data using least-squares procedures to minimize the difference between the whole observed and calculated diffraction patterns. The following parameters may be refined: the structural parameters of each mineral (atomic coordinates, site occupancies, displacement

parameters), the various experimental parameters affecting the pattern (zero-point correction, peak shape, background, etc.). Starting values for the atomic parameters are readily available from the literature or from databases such as the Inorganic Crystal Structure Database (ICSD).

Of particular relevance to doing modal analysis of materials is that the Rietveld refinement method can be used to characterize several phases simultaneously, and that the relative masses of all phases contributing to the diffraction pattern can be derived from the refinement using the simple relationship:

$$W_r = S_r (ZMV)_r / \sum_i S_i (ZMV)_i$$

where W_r is the relative weight fraction of phase r in a mixture of i phases, S is the scale factor derived from Rietveld refinement, Z is the number of formula units per unit cell, M is the mass of the formula unit (atomic mass units), and V is the volume of the unit cell (\AA^3).

FUNDAMENTAL PARAMETERS APPROACH

A strength of the Rietveld method is that overlapping peaks are easily modeled and refined; this is not the case with traditional X-ray powder diffraction methods. However, for complicated phase mixtures with a high degree of overlap, reliable quantitative Rietveld analysis sometimes failed because traditional profile shape functions did not allow for an unambiguous decomposition of peak intensities.

Since the introduction of the so-called fundamental parameters approach [3] even samples with many phases / peaks leading to extreme peak overlap can be quantified successfully [e.g., 4], where traditional profile functions such as pseudo-Voigt and Pearson VII functions fail. With fundamental parameters and the known instrument geometry is used to describe observed line profile shapes according to

$$Y(2\theta) = (W \otimes G) \otimes S$$

where $Y(2\theta)$ is the observed line profile, W is the spectral distribution, G are any instrumental and S sample contributions. The benefits in using fundamental parameters are manifold including better profile fits based on physical reality in particular of heavily overlapped reflections, but also the standardless determination of microstructure parameters such as crystallite size and microstrain.

SAMPLE PREPARATION

The sample was ground in a McCrone micronizing mill (<http://www.mccrone.com/>) under alcohol to less than 5 μm in grain size. Fine grain size is essential to minimize micro-absorption corrections, to give reproducible peak intensities and to minimize preferred orientation. The powder was gently back-pressed into a standard aluminum holder against a ground glass slide to further minimize preferred orientation (Fig. 2). X-ray powder-diffraction data were collected over the range $3\text{-}70^\circ 2\theta$ with $\text{CuK}\alpha$ radiation on a standard Siemens (Bruker) D5000 Bragg-Brentano diffractometer equipped with a diffracted beam graphite monochromator crystal, 2 mm (1°) divergence and antiscatter slits, 0.6 mm receiving slit, incident-beam Soller slit, step $0.04^\circ 2\theta$, time 2 s/step. The long sample holder used (43 mm aperture) ensured that the area irradiated by the X-ray beam under these conditions was completely contained within the sample.

The X-ray diffractograms were analyzed using the International Centre for Diffraction Database PDF2 Data Sets 1-49 plus 70-86 using Search-Match software by Siemens (Bruker).

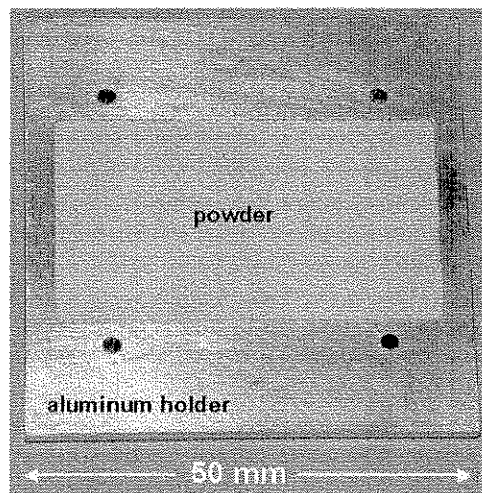


Figure 2. Sample holder for quantitative phase analysis.

RIETVELD REFINEMENT

X-ray powder-diffraction data were refined with the Rietveld program Topas 2.0 [5] using the fundamental parameters approach. Isotropic displacement parameters of individual atoms were fixed at values extracted from single-crystal refinements of the structures. Preferred orientation parameters for major phases with marked grain-shape anisotropy were corrected using the March-Dollase method. Micro-absorption contrast between phases was corrected using the method of Brindley [6].

RESULTS

The results of quantitative phase analysis by Rietveld refinement are given in Table 1. Rietveld refinement plots are given in Figures 3A and 3B.

Table 1. Results of Quantitative Phase Analysis

Phase	wt.%
Calcite	8.7 (0.2)
Siderite	2.5 (0.2)
Ankerite	6.2 (0.2)
Quartz	57.1 (0.4)
Muscovite	2.4 (0.3)
Pyrite	0.4 (0.1)
Kaolinite	20.3 (0.4)
Hematite	2.0 (0.2)
Barite	0.4 (0.1)
Total	100.0

Although the X-ray powder diffraction pattern comprises thousands of overlapping of peaks, refining the structures of the constituent minerals with the Rietveld method is relatively straightforward. A significant strength of the Rietveld method is that overlapping peaks are fitted and refined; this is not the case with traditional X-ray powder diffraction methods. Regardless of the presence of the other

phases, the amounts of carbonate and pyrite can be measured, even at low abundances.

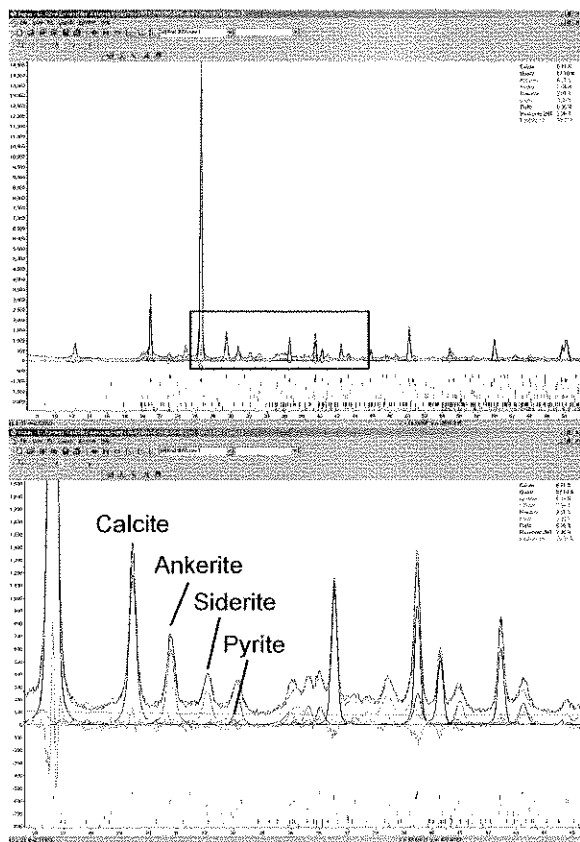


Figure 3. A: Rietveld refinement plot, 2θ ($^{\circ}$) vs. Intensity (counts), from Topas 2.0 program for waste-rock sample (blue line - observed intensity at each step; red line - calculated pattern; solid grey line - background, solid grey line below - difference between observed and calculated intensities; vertical bars - positions of all Bragg reflections). Coloured lines are individual diffraction patterns of all phases. Box is area of Figure 3B. B: Enlarged area of box in A showing the main X-ray diffraction peaks of calcite, ankerite, siderite and pyrite.

SUMMARY

X-ray powder diffraction studies are not restricted to simple “fingerprinting” of crystalline phases. The amounts of calcite-group (calcite, siderite) and dolomite-group minerals, (dolomite, ankerite), and sulfides may be measured quantitatively using the Rietveld method. The amounts of all other minerals may also be measured simultaneously.

Fe and Mn content in minerals cannot be directly distinguished using X-ray diffraction (similar X-ray scattering power) but in certain cases (ankerite) may be determined from the cell dimensions.

REFERENCES

- [1] Rietveld, H. *J. Appl. Crystallogr.* **2**, 65 (1969).
- [2] Raudsepp, M., Pani, E. and Dipple, G.M. *Can. Mineral.* **37**, 33-(1999).

- [3] Cheary, R.W. and Coelho, A.A. *J. Appl. Crystallogr.* **25**, 109 (1992).
- [4] Kern, A. (2002). *Accuracy in Powder Diffraction III*. NIST, Gaithersburg, USA. April 22-25 2001, proceedings, in press.
- [5] Bruker AXS. *Topas V2.0: General profile and structure analysis software for powder diffraction data. User Manual. Bruker AXS, Karlsruhe, Germany* (2000).
- [6] Brindley, G.W. *Philos. Mag.* **36**, 347 (1945).

Quantitative Phase Analysis of Samples K-4 and K-6 using the Rietveld Method and X-ray Powder Diffraction Data.

***Attention:
Rick Vos
BC Research***

***Mati Raudsepp, Ph.D.
Elisabetta Pani, Ph.D.***

***Dept. of Earth & Ocean Sciences
6339 Stores Road
The University of British Columbia
Vancouver, BC V6T 1Z4***

April 24, 2003

EXPERIMENTAL METHODS

The particle size of the samples was further reduced to the optimum grain-size range for X-ray analysis ($<5 \mu\text{m}$) by grinding under ethanol in a vibratory McCrone Micronising Mill (McCrone Scientific Ltd., London, UK) for 6 minutes. Fine grain-size is an important factor in reducing micro-absorption contrast between phases. Samples were pressed from the bottom of an aluminum sample holder against a ground glass slide; the cavity in the holder measures $43 \times 24 \times 1.5 \text{ mm}$. The textured surface of the glass minimizes preferred orientation of anisotropic grains in the part of the powder that is pressed against the glass.

Step-scan X-ray powder-diffraction data were collected over a range $3\text{-}70^\circ 2\theta$ with $\text{CuK}\alpha$ radiation on a standard Siemens (Bruker) D5000 Bragg-Brentano diffractometer equipped with a diffracted-beam graphite monochromator crystal, 2 mm (1°) divergence and antiscatter slits, 0.6 mm receiving slit and incident-beam Soller slit. The long sample holder used (43 mm) ensured that the area irradiated by the X-ray beam under these conditions was completely contained within the sample. The long fine-focus Cu X-ray tube was operated at 40 kV and 40 mA, using a take-off angle of 6° . X-ray powder-diffraction data were refined with Rietveld Topas 2.0 (Bruker AXS) running on a Pentium III 1000 MHz personal computer.

RESULTS AND DISCUSSION

The X-ray diffractograms were analyzed using the International Centre for Diffraction Database PDF2 Data Sets 1-49 plus 70-86 using Search-Match software by Siemens (Bruker). The results of quantitative phase analysis by Rietveld refinement are given in Table 1. These amounts represent the relative amounts of crystalline phases normalized to 100%. Rietveld refinement plots are given in Figures 1 and 2.

Table 1. Results of quantitative phase analysis (wt.%)

	K-4	K-6
Quartz	43.2	47.3
Muscovite	15.2	41.3
Magnetite	0.6	0.8
Calcite	0.9	0.3
Talc	6.3	
Chlorite		3.3
Pyrite	0.4	5.9
Alunite	33.5	
Chalcopyrite?		0.5
Tennantite?		0.5
Total	100.0	100.0

Note:

? implies that the phases are possible but not positively identified.

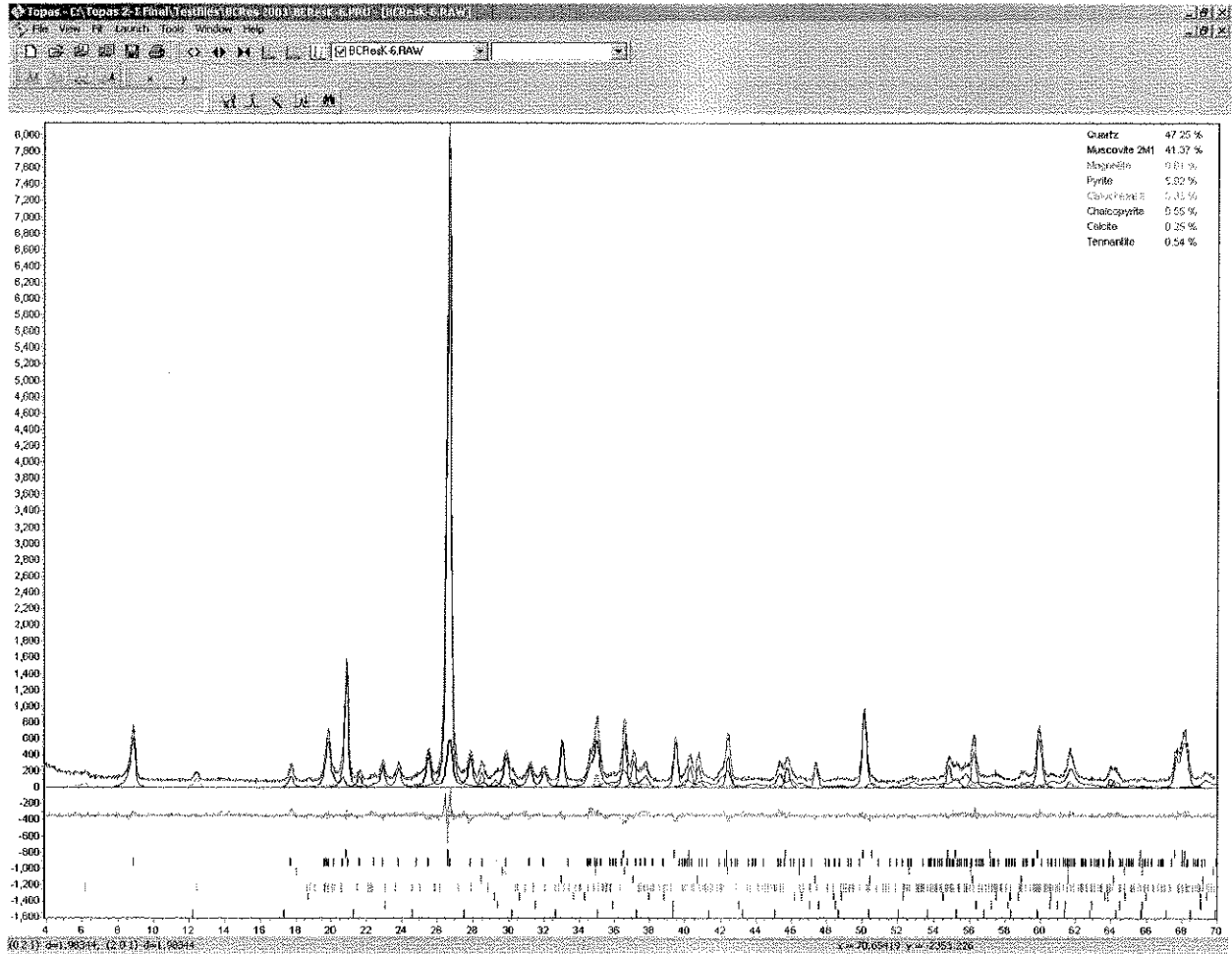


Figure 1: Rietveld refinement plot for sample K-6 (blue line - observed intensity at each step; red line - calculated pattern; solid grey line below – difference between observed and calculated intensities; vertical bars, positions of all Bragg reflections). Coloured lines are individual diffraction patterns of all phases.

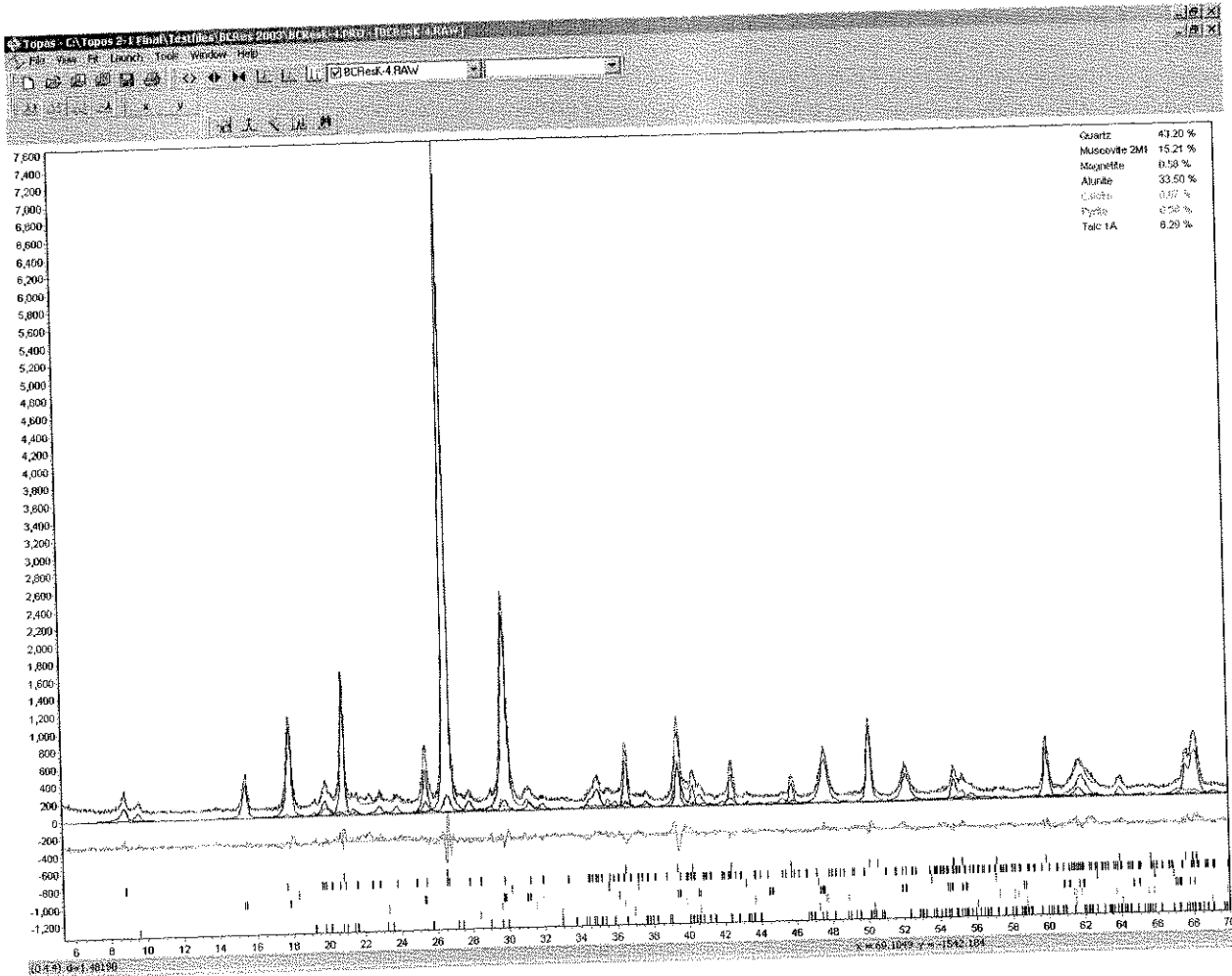


Figure 2: Rietveld refinement plot for sample K-4 (blue line - observed intensity at each step; red line - calculated pattern; solid grey line below - difference between observed and calculated intensities; vertical bars, positions of all Bragg reflections). Coloured lines are individual diffraction patterns of all phases.