

Golder Associates Perú S.A.

Calle 22 N° 215 - Urb. Córpac
San Borja – Lima 41 – Perú
Teléfono (511) 224-9398
Fax (511) 475-2150

INFORME FINAL

FASE 1
PLAN DE MANEJO AMBIENTAL
DE LA LAGUNA YANAMATE

RESUMEN EJECUTIVO

Presentado a:

Volcan Compañía Minera S.A.A.
Av. Gregorio Escobedo 710, 3^{er} Piso
Jesús María, Lima 11, Perú

TABLA DE CONTENIDOS

<u>SECCIÓN</u>	<u>PÁGINA</u>
1.0 INTRODUCCIÓN.....	2
2.0 DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN MINERA.....	4
2.1 Mina	4
2.2 Plantas Concentradoras	5
2.3 Planta de Extracción por Solventes y Electrodeposición	6
2.4 Depósito de Relaves-Ocroyoc	6
2.5 La Laguna Yanamate	7
3.0 EVALUACIÓN HIDROLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA.....	8
3.1 Configuración Regional e Hidrología	8
3.2 Geología Superficial.....	10
3.3 Geología del Basamento Rocosó	12
3.4 Hidrogeología	13
3.5 Calidad de Agua Superficial y Subterránea.....	16
3.6 Balance de Agua de Yanamate	17
3.6.1 Precipitación.....	17
3.6.2 Evaporación	18
3.6.3 Descargas de Agua Ácida	18
3.6.4 Escorrentía Superficial.....	18
3.6.5 Infiltración.....	19
3.6.6 Resultados	19
4.0 PROYECCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE YANAMATE EN EL FUTURO	20
5.1 Calibración del Modelo	21
5.2 Proyecciones del Comportamiento Futuro	22
5.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24

RESUMEN EJECUTIVO

1.0 INTRODUCCIÓN

Volcan Compañía Minera (Volcan) contrató los servicios de Golder Associates Perú (Golder) para la realización de una evaluación hidrológica, hidrogeológica y ambiental de la Laguna Yanamate, la cual recibe actualmente las descargas de aguas ácidas y refinados de las operaciones de la unidad de producción Cerro de Pasco. Asimismo, el alcance del trabajo incluyó la evaluación de alternativas para el tratamiento del efluente ácido mediante neutralización. Este trabajo fue encuadrado dentro de lo que constituye la Fase 1 de un Programa de Manejo Ambiental para la laguna, cuyo objetivo principal es el de permitir la utilización de la Laguna Yanamate como un depósito de vertimientos ácidos de manera controlada y sin la generación de un impacto ambiental que pueda afectar la calidad de agua superficial y subterránea y genere un conflicto con otros usuarios de agua en la región.

El trabajo desarrollado por el equipo de Golder incluyó la realización de trabajos de campo, trabajos de laboratorio y la preparación del informe con la participación de un equipo multidisciplinario integrado por personal de Golder de sus oficinas en Lima, Mississauga y Ottawa. Los trabajos de campo incluyeron un reconocimiento hidrológico e hidrogeológico de la región, la inspección de las instalaciones de la mina Cerro de Pasco y la realización de una evaluación del sistema de bombeo que viene operando actualmente. Se realizaron mediciones de caudales y se revisaron los registros de bombeo mediante lo cual se ha podido preparar balances de agua para la mina, el depósito de relaves de Ocroyoc y la laguna Yanamate. Asimismo, se desarrolló un programa de monitoreo de agua superficial y subterránea el cual incluyó la perforación e instalación de 6 pozos de monitoreo en los alrededores de la laguna.

La evaluación de alternativas de tratamiento del refinado generado en Cerro de Pasco incluyó la evaluación del uso de relaves combinados con cal y caliza para la neutralización del efluente ácido y la disposición final en Ocroyoc. La evaluación incluyó la realización de ensayos de laboratorio y la preparación de curvas de neutralización para varias combinaciones. El trabajo incluyó una evaluación económica y el planteamiento de la mejor alternativa.

En lo referido al balance de agua de la Laguna Yanamate, Golder desarrolló un modelo probabilístico para la predicción del comportamiento de la laguna bajo distintos escenarios. El

modelo fue desarrollado utilizando un software para análisis de riesgos lo cual ha permitido realizar predicciones con niveles de probabilidad asociados a los mismos.

Finalmente, se han planteado de manera general los lineamientos que permitirán formular un plan de manejo ambiental para la Laguna Yanamate basado en las conclusiones de este estudio. El plan de manejo ambiental podrá ser encuadrado dentro de la Fase 2 del estudio la cual involucrará también los trabajos referidos a la obtención de permisos.

2.0 DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN MINERA

La unidad de producción minera Cerro de Pasco se encuentra ubicada en los Distritos de Simón Bolívar, Chaupimarca y Yanacancha, Provincia de Pasco, Departamento de Pasco en los Andes Centrales peruanos. El acceso principal es por la Carretera Central desde la ciudad de Lima (306km) y por Ferrocarril Central desde el puerto del Callao (356km).

Las operaciones mineras en Cerro de Pasco se iniciaron en el periodo Incaico y fueron continuadas durante el periodo Colonial sin existir registros precisos sobre las operaciones realizadas en esas épocas. En 1902 la empresa norteamericana Cerro de Pasco Copper Corporation adquiere las propiedades mineras e inicia la explotación de los minerales de cobre desarrollándose posteriormente la explotación de los minerales de plomo y zinc. En 1974, la empresa minera es nacionalizada y se crea la Empresa Minera del Centro del Perú (Centromín) la cual toma control de las operaciones. En 1981 se inaugura la planta de extracción por solventes y electrodeposición para la producción de cátodos de cobre. Simultáneamente, se inicia el vertimiento de agua ácida y refinado hacia la Laguna Yanamate. En 1999, la unidad de Cerro de Pasco pasa a poder de la Empresa Minera Paragsha (Paragsha), la cual viene actualmente haciéndose cargo de las operaciones.

2.1 Mina

Las operaciones mineras de Cerro de Pasco extraen minerales de plomo y zinc por minado subterráneo y a cielo abierto. Adicionalmente, se realiza la lixiviación in-situ de secciones en la mina con contenidos altos de cobre, los cuales son lixiviados con la utilización de agua ácida que se genera en la propia mina.

La operación minera subterránea está dividida en 6 niveles de producción, del Nivel 800 hasta el Nivel 1800, los cuales integran 4 principales zonas de explotación. El minado de los cuerpos se realiza mediante el empleo de los métodos de explotación de corte y relleno descendente y corte y

relleno ascendente. En la actualidad se explotan 7,085 TMD de las labores subterráneas y el tajo abierto. La mina utiliza relleno hidráulico, el cual es producido con relaves cicloneados de la Planta Concentradora Paragsha, los cuales son mezclados con cemento en la Planta de Relleno y transportados hacia los tajeos por gravedad a través de una red de tuberías.

El minado superficial se concentra en el tajo abierto Raúl Rojas, el cual constituye la principal fuente de mineral para la planta concentradora. La relación de desbroce del tajo abierto es de 3.45:1 y el tipo de desmonte generado se clasifica en dos tipos:

- Mena de baja ley lixiviable con valores de cobre y plata, y
- Material de desmonte (estéril).

En lo referido al drenaje de la mina subterránea, en la actualidad el 100% del agua es bombeada a superficie mediante el sistema de bombeo. Se generan tres tipos de aguas en la mina subterránea:

- Agua Neutra.
- Agua Barren (Drenaje Ácido de Mina producido al pasar el agua de infiltración a través de zonas piritosas).
- Agua de Cobre.

En resumen, se puede decir que se cuenta con 3 estaciones de bombeo principales ubicadas en los niveles 800, 1200 y 2125. Desde el nivel 800 se bombea hacia superficie aguas neutras generadas en los niveles superiores de la mina (aproximadamente 800usgpm). Desde el nivel 2125 se bombea agua ácida hacia la estación de bombeo en el nivel 1200. Desde esta estación se impulsa el agua hacia superficie a través del Pique Excelsior. Un porcentaje significativo del agua ácida bombeada hacia la superficie (aproximadamente 50%) es utilizado para la lixiviación in-situ de cobre en la mina subterránea. El porcentaje de Agua Barren utilizada para la lixiviación de cobre se convierte en “Agua de Cobre” la cual es bombeada nuevamente a superficie para ser tratada en la planta de extracción por solventes y electrodeposición.

2.2 Plantas Concentradoras

La unidad de producción Cerro de Pasco cuenta con dos plantas concentradoras:

- Paragsha.

- San Expedito.

La planta concentradora Paragsha constituye la principal planta metalúrgica en Cerro de Pasco y tienen una capacidad de tratamiento de 7000TMD. En esta planta se procesan los minerales de plomo y zinc mediante circuitos convencionales de flotación. La fracción gruesa de los relaves generados por la planta es utilizada para la preparación de relleno hidráulico mientras que la fracción fina es depositada en el depósito de relaves de Ocroyoc.

La planta concentradora San Expedito beneficia actualmente minerales de plomo-zinc y plata con una capacidad de tratamiento de 370TMD. El 100% de la mena procesada en San Expedito proviene del tajo abierto Raúl Rojas y los productos generados son concentrados de plomo y zinc mediante circuitos convencionales de flotación. Los relaves generados en esta planta concentradora se unen a la línea principal de relaves de Paragsha y son depositados en la cancha de relaves de Ocroyoc.

2.3 Planta de Extracción por Solventes y Electrodeposición

La planta de extracción por solventes fue puesta en operación en 1981 y actualmente produce 3.83TM de cobre al día a partir de soluciones impregnadas provenientes de las operaciones de lixiviación in-situ. El cobre es extraído de la solución impregnada (Agua de Cobre) mediante el método de extracción por solventes a través del cual el cobre pasa de una fase acuosa a una fase orgánica. La fase acuosa, después de haber descargado sus valores de cobre, se convierte en un desecho (rafinado) el cual es bombeado junto con el agua ácida excedente proveniente de la mina subterránea hacia la Laguna Yanamate.

La fase orgánica enriquecida con cobre es tratada con una solución fuertemente ácida para descargar nuevamente el cobre hacia una fase acuosa pero a una concentración mucho mayor. Esta nueva solución enriquecida con cobre (solución electrolito) es la que pasa al circuito de electrodeposición para la producción de los cátodos de cobre.

2.4 Depósito de Relaves-Ocroyoc

El depósito de relaves de Ocroyoc se ubica en la quebrada de Ocroyoc a una distancia de aproximadamente 5km de la planta concentradora Paragsha y a una elevación ligeramente inferior

a la de la planta. El depósito entró en operación en servicio en 1992 y actualmente recibe la fracción fina de los relaves generados en Paragsha y el total de los relaves de San Expedito. Los relaves son conducidos hacia la cancha de relaves por tubería. En la actualidad la cancha de relaves recibe el 87% del total de relaves generados por ambas plantas concentradoras siendo el 13% restante utilizado para la preparación de relleno hidráulico para la mina subterránea. El agua de decantación del depósito de relaves es colectada por tuberías y conducida a través de un canal abierto hacia una estación de bombeo desde la cual el agua es bombeada de regreso hacia la planta concentradora Paragsha para ser utilizada como agua industrial en el proceso de flotación.

2.5 La Laguna Yanamate

La Laguna Yanamate ha venido siendo utilizada para el vertimiento de aguas ácidas provenientes de la unidad de producción Cerro de Pasco desde 1981. Las aguas ácidas se componen del refinado generado en la planta de extracción por solventes, así como del agua barren excedente generada en el interior mina. Un porcentaje menor del agua ácida enviada hacia Yanamate viene siendo generada por otras fuentes superficiales.

Las aguas ácidas son bombeadas desde la estación de bombeo ubicada en la planta de extracción por solventes y electrodeposición hacia la Laguna Yanamate y conducidas a través de dos tuberías de acero inoxidable, las cuales descargan en el lado oeste de la laguna. Debido a la elevación del nivel de agua ocasionado por el vertimiento de aguas ácidas en la Laguna Yanamate, ésta se ha unido con la Laguna Huaygacocha, formando un solo cuerpo de agua superficial.

En la actualidad el caudal de agua bombeado hacia Yanamate equivale a 4,500 usgpm y el depósito de aguas ácidas cubre un área de 2.6km². El espejo de agua se encuentra a una elevación de 4358.4msnm. La Laguna Yanamate almacena un volumen de aproximadamente 21.26 millones de m³ de agua (dos muestras de agua superficial tomadas en dos extremos opuestos de la laguna). Como se puede apreciar en los resultados, el agua de la laguna muestra un pH fuertemente ácido y una alta conductividad y acidez, así como altas concentraciones de metales pesados y sulfatos.

3.0 EVALUACIÓN HIDROLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

La evaluación hidrológica e hidrogeológica efectuada por Golder esta basada en reconocimientos de campo efectuados durante el mes de Junio incluyendo mediciones de caudales en cursos de agua y caracterización de la calidad de agua superficial y subterránea en la zona del estudio.

3.1 Configuración Regional e Hidrología

La laguna Yanamate yace en una región montañosa de roca caliza y se extiende hacia el Sureste desde Cerro de Pasco hacia la laguna Junín . Las lomadas de roca caliza comprenden la región montañosa desde la división de la cuenca colectora regional que separa a la cuenca de drenaje del río Huallaga hacia el noreste de la cuenca de drenaje del río San Juan y la laguna Junín hacia el sur oeste.

La laguna Yanamate, tal como se presenta, tiene una longitud de aproximadamente 2.7km y de 0.5 a 1.0km de ancho. El área superficial de la laguna es de aproximadamente 2.6km² a la elevación superficial existente de 4,358.4msnm (Junio, 2000). La profundidad actual del lago varía entre 26 y 30m y las depresiones locales en la parte inferior del lago corresponden a las elevaciones de 4,328msnm a 4,332msnm .

Antes del uso del lago como una instalación de manejo de agua de mina, las elevaciones del lago variaban en el rango de 4,344.5msnm a 4,350.0msnm reflejando variaciones anuales en las cantidades de precipitación recibidas. El perfil anterior del lago bajo estas elevaciones se muestra en la.

La Laguna Yanamate es el cuerpo de agua más alto y grande dentro de la región montañosa de roca caliza que se extiende hacia el sur este desde Cerro de Pasco. Ésta yace en la división de la cresta de la cuenca colectora para las dos cuencas adyacentes de drenaje. No existe descarga superficial desde la laguna, ya que toda el agua recibida se evapora hacia la atmósfera o se infiltra dentro de la roca caliza subyacente.

El lago está limitado hacia el Noroeste y el sureste por lomadas de roca caliza que alcanzan las elevaciones de aproximadamente 4,400msnm a 4,500msnm. El área Suroeste final del valle del lago está bloqueada por una morrena glacial baja de elevaciones desde 4,360msnm hasta

4362msnm que separan la cuenca de la laguna Yanamate (elevación de 4,358.4msnm desde la cuenca más baja y adyacente de la laguna Cuchis-elevación de 4,346msnm.

La laguna Cuchis está regulada por una presa de control y es operada como un reservorio de irrigación por agricultores aguas abajo de la cuenca. En forma distinta a la laguna Yanamate, la laguna Cuchis mantiene una descarga superficial dirigida hacia el río San Juan al Oeste.

La laguna Angascancha está ubicada a 2km al sur este de la laguna Yanamate y es también un reservorio controlado por una presa con una elevación del nivel del agua de aproximadamente 4,327msnm. La laguna Chaquicocha es una pequeña laguna localizada entre las lagunas Yanamate y Angascancha con una elevación superficial del agua de aproximadamente 4,363.8msnm. El drenaje desde este lago es redireccionado mediante un canal de irrigación dentro del reservorio de la laguna Angascancha. Ambas lagunas, Cuchis y Angascancha, drenan con dirección Oeste hacia el río San Juan. La mayor cantidad de agua es usada para fines de irrigación de campo y durante la estación de estiaje, sólo pequeñas cantidades de agua llegan al río San Juan. El río San Juan drena con dirección Sur desde la elevación de 4,200msnm cerca de la mina a una elevación de 4,084m en donde desemboca en la laguna Junín para descargar hacia el río Mantaro. El río San Juan lleva el drenaje superficial que viene de Cerro de Pasco por la Quebrada Quiulacocha la cual se une al río San Juan aguas arriba de la confluencia con el río Cucalhuai, el cual drena el área de la laguna Cuchis.

La cuenca de la Laguna Yanamate aporta potencialmente una escorrentía superficial al lago de aproximadamente 7.02 km². En buena parte de esta área el basamento es roca caliza. Las superficies rocosas expuestas exhiben rasgos característicos de meteorización por disolución. Muchas de esas áreas dentro de la cuenca parecen drenar internamente dentro de pequeñas depresiones de superficie, desde donde el agua se evapora o infiltra en el basamento rocoso subyacente, por lo que nunca alcanzan el lago. Un área comparativamente grande de drenaje interno se puede apreciar en una cuenca al Norte del punto de descarga de la tubería de agua de la mina. Allí hay una laguna pequeña con un área superficial de cerca de 0.5ha y un área de drenaje de aproximadamente 18ha. Un reconocimiento de esta laguna determinó que ésta no tiene salida superficial. El nivel de la laguna dentro de la cuenca parece ser comparativamente estable, con fluctuación menor que 1m de acuerdo con el desarrollo vegetacional en los bordes. Cuando el nivel del agua se eleva en la laguna en respuesta a una escorrentía, ésta aparentemente descarga hacia un conducto kárstico ubicado en el borde este del lago.

En el Noreste de la laguna Yanamate, los cursos tributarios del río Huallaga, incluyendo las quebradas de Mantaragra, Milupucra y Sharpa aparecen como flujos de agua corriente a elevaciones de aproximadamente 4,300msnm. A unos 6km aproximadamente al Noreste de la laguna Yanamate, estos flujos convergen dentro de la quebrada Tulluraica a una elevación de cerca de 4,000msnm las cuales ingresan en el río Huallaga a una elevación de 3,650msnm a un punto cerca de 10km al nor este de la laguna Yanamate.

Se llevó a cabo una medición del caudal de los cursos de agua durante el mes de Junio del 2000, coincidiendo con la estación de estiaje, para obtener una apreciación del caudal base de los cursos de agua y a partir de esto evaluar la relación potencial de la descarga subterránea que sucede dentro del terreno subyacente de roca caliza. Como nota particular, estos cursos están profundamente cortados dentro de las formaciones de roca caliza y las alturas de la región montañosa de roca caliza están comparativamente secas exhibiendo pocos flujos de escorrentía superficial, lo cual es típico del terreno kárstico. Una gran porción de la precipitación recibida se infiltra dentro de la roca caliza para moverse hacia los puntos de descarga donde los sistemas de flujo kárstico son interceptados por los cursos de agua en las profundidades inferiores del valle.

En el caso de la quebrada Mantaragra, el caudal medido en el extremo aguas abajo fue de 3,070gpm (194 l/s). El área de la cuenca aguas arriba es de aproximadamente 13km² y si el caudal medido en esta área considera toda el agua subterránea en esta época del año, entonces la relación de infiltración en el terreno de roca caliza dentro de la cuenca pudiera ser 54% de la precipitación recibida. Sin embargo, este curso de agua corta mucho más que dos cursos adyacentes y pueden interceptar correspondientemente agua superficial desde estas cuencas. Aguas abajo de la confluencia de todos los tres cursos, el caudal combinado fue de 5,000gpm (315l/s). El área de la captación precipitacional es de aproximadamente 39km². Asumiendo que el caudal base medido es representativo para todo el año, este caudal base sería equivalente al 30% de la precipitación total recibida.

3.2 Geología Superficial

Toda el área de Cerro de Pasco, incluyendo la Laguna Yanamate estuvo sujeta a la glaciación durante la última edad de hielo. La erosión glacial es evidente en los afloramientos de roca en los

alrededores de la laguna y es muy probable que sea la responsable de la excavación de la cuenca de la Laguna Yanamate así como de las otras lagunas, incluyendo Angascancha.

En la cuenca de la Laguna, los últimos períodos de la glaciación estuvieron aparentemente asociados con un tipo de glaciación alpina que retrocedió hacia el Noreste desde el Valle del Río San Juan, a través de la Laguna Cuchis hacia la Laguna Yanamate, hacia las estructuras circulares en las lomadas de roca caliza circundantes. Este retroceso está marcado por morrenas glaciales pequeñas pero prominentes, conformadas de till con abundantes cantos entre la Laguna Cuchis y la Laguna Yanamate, al igual que lomadas de morrenas laterales directamente al Sur de la Laguna Cuchis. La presencia de estas morrenas laterales es también evidente en la cuenca de la Laguna Angascancha. Los suelos glaciales depositados en el área son suelos derivados en gran medida de la erosión de las formaciones de roca caliza, son muy calcáreos y con mucho limo, arena, grava y cantos hechos del material de la roca caliza.

La topografía irregular del fondo de la Laguna Yanamate probablemente refleja tanto la erosión superficial de la roca caliza por la glaciación como la depositación de till glacial sobrepuesto por depósitos lacustres glaciales de limo dentro de las depresiones del basamento rocoso en el fondo del lago.

La naturaleza kárstica de la roca caliza probablemente es anterior al período de glaciación. El karst es un aspecto antiguo de la secuencia de roca, más probablemente desarrollado durante el levantamiento de la región en el Terciario. La erosión glacial posterior habría expuesto canales en algunas áreas de la roca caliza, especialmente en área de depósitos superficiales de poca potencia. En otras áreas, los rasgos kársticos habrían sido enterrados debajo de los depósitos glaciales de mayor potencia, lo cual los habría aislado de la superficie.

Los efectos de la glaciación han dejado la Laguna Yanamate aparentemente directamente conectada con las formaciones de caliza kárstica subyacentes dadas las características del drenaje interno en la cuenca de la laguna. En contraste, la Laguna Angascancha puede que no tenga una conexión hidráulica similar con la roca caliza subyacente debido a los depósitos glaciales subyacentes, esto explica su desarrollo como un reservorio con descarga superficial.

3.3 Geología del Basamento Rocoso

La Laguna Yanamate esta ubicada casi completamente sobre la Formación Chambará (Grupo Pucará), la cual es una formación muy potente de roca caliza de edad Triásica a Jurásica. Los estratos de la formación tienen un rumbo Noroeste hacia el Sureste y forman las prominentes lomadas de roca que se elevan entre Cerro de Pasco, la Laguna Yanamate y la Laguna Angascancha. La secuencia de roca caliza está plegada de varias formas a lo largo de las estructuras sinclinales y anticlinales que se orientan con una tendencia de Noroeste hacia Sureste. La roca caliza está finamente granulada y es de porosidad granular fina pero está fracturada y es de naturaleza kárstica. La susceptibilidad de la roca caliza a las soluciones kárstica está evidenciada por las superficies fuertemente meteorizadas de la roca caliza expuesta, las cuales se han desarrollado desde que los últimos glaciares dejaron el área, y por numerosas áreas en donde el agua de escorrentía superficial drena internamente dentro de depresiones superficiales, tanto en una pequeña escala como en un gran escala como es el caso de la Laguna Yanamate.

Los estratos de caliza de la Formación Chambará han sido inversamente fallados sobre las formaciones más jóvenes, de edad Cretácica a Terciaria, de pizarras, lutitas y capas rojas de roca caliza de la Formación Casapalca hacia el Oeste de la falla Cerro de Pasco. La falla se extiende hacia el Norte, desde la Laguna Yanamate hacia Cerro de Pasco, en donde forma la zona de la caja techo de la mina.

La secuencia de rocas de la Formación Casapalca hacia el Suroeste de la falla Cerro de Pasco subyace el área de la Laguna Cuchis. Esta secuencia de rocas es más blanda y menos resistente a la erosión que la roca dura de la Formación Chambará. Está asociada con terreno más bajo si se la compara con las lomadas de roca caliza de la Formación Chambará. Los estratos de pizarras y las lutitas comprendidas en la Formación Casapalca no son favorables al desarrollo de condiciones kársticas comparados con la Formación Chambará, lo cual explica la capacidad de la Laguna Cuchis para mantener una descarga superficial.

Un aspecto clave para la geología del basamento rocoso en relación al comportamiento hidrogeológico de la Laguna Yanamate es el contraste entre las formaciones Chambará y Casapalca. La Formación Chambará es una secuencia de roca caliza pura, la cual ha desarrollado condiciones kársticas altamente permeables, presumiblemente asociadas con rasgos estructurales pre-existentes. La Formación Casapalca no es de una naturaleza similar debido a las

intercalaciones de las secuencias de pizarras, lutitas y roca caliza que la conforman. Sin embargo, ambas formaciones son calcáreas y proporcionan un alto grado de neutralización para aguas ácidas tales como las de la Laguna Yanamate.

3.4 Hidrogeología

Las condiciones hidrogeológicas asociadas con la Laguna Yanamate han sido evaluadas a través de tres programas de perforación y un reconocimiento geofísico desarrollado entre los años 1998 y 2000. Las investigaciones iniciales incluyeron tres sondajes de 180 m de profundidad, H-1 en el extremo Oeste del lago, H-2 en el extremo Este del lago y H-3 ubicado hacia el Noroeste del lago más allá de las lomadas de roca caliza. Los tres sondajes encontraron agua fresca sin influencia aparente del agua ácida en la laguna. Luego de este programa, se efectuó un reconocimiento geofísico utilizando resistividad eléctrica alrededor del perímetro de la laguna con el fin de evaluar la existencia de una migración lateral en el subsuelo. Las únicas condiciones anómalas fueron encontradas bajo el extremo Oeste del lago, entre la Laguna Yanamate y la Laguna Cuchis. Seguidamente, dos sondajes adicionales de 250 m de profundidad fueron perforados en esta área y designados como DH-4 y DH-5. Una vez más, estos sondajes encontraron agua fresca con concentraciones de sulfatos ligeramente elevadas lo cual puede haber influenciado los resultados arrojados por el reconocimiento geofísico.

Un tercer programa se llevó a cabo en Junio del 2000. El tercer programa incluyó seis sondajes designados, P-1A, P-1B, P-2, P-3, P-4 y P-5. Los sondajes P-1A y P-1B fueron perforados en la misma ubicación (distantes 20 metros) en el extremo Oeste del lago. P-1A fue revestido a través del suelo y avanzado en el basamento rocoso hasta una profundidad de 100 m. El sondaje P-1B fue avanzado a una profundidad de 20.5 m. Todos los sondajes restantes fueron revestidos a través del suelo poco profundo y perforados hasta profundidades entre 92 y 101 metros bajo la superficie.

Los sondajes llevados a cabo en Junio del 2000 fueron efectuados con un equipo de perforación con martillo de fondo y las profundidades a las cuales se encontró el agua fueron registradas así como el caudal, la temperatura y la conductividad del agua encontrada.

Después de las perforaciones, cada sondaje fue desarrollado mediante la inyección de aire por dos horas hasta que se extrajo agua de conductividad constante, después de lo cual se tomaron las muestras de agua. Nuevamente se encontró agua fresca.

La ubicación y elevación de los sondajes fue medida con métodos topográficos y se midieron los niveles del agua subterránea. El programa actual de monitoreo incluyó los sondajes DH-4, DH-5 y desde P-1A hasta P-5. Los sondajes iniciales H-1, H-2 y H-3 se perdieron debido a inundación de terreno por la laguna (H-1) o vandalismo (H-2 y H-3).

La Laguna Yanamate drena internamente en su totalidad. Toda la precipitación, la escorrentía asociada a la cuenca de captación y el agua descargada proveniente de la mina Cerro de Pasco se pierde por los efectos combinados de la evaporación hacia la atmósfera o la infiltración hacia la roca caliza subyacente. El balance de agua de la laguna indica que recibe un total de 13.63 millones $m^3/año$ de agua, de los cuales aproximadamente 9.05 millones $m^3/año$ son de la mina, y los restantes 4.58 millones $m^3/año$ son producto de la precipitación y la escorrentía. En lo referido a las pérdidas, la evaporación constituye 1.02 millones de $m^3/año$, mientras que mediante infiltración se pierden 10.28 millones de $m^3/año$ de agua. La infiltración equivale en promedio a un caudal de 326l/s o 5174usgpm. En los últimos 4 años el lago ha venido incrementando su volumen en aproximadamente 2.33 millones de $m^3/año$.

La roca subyacente es caliza de grano fino y no es porosa. Los caminos que pudieran acomodar el flujo del agua subterránea a estos altos grados de infiltración son considerados ser canales kársticos abiertos a lo largo de sistemas de fracturas desarrollados por soluciones de meteorización. Las fracturas serían similares al orificio de infiltración encontrado en la orilla de una pequeña laguna ubicada inmediatamente al Norte del lago.

La infiltración a través del fondo de la laguna ocurrirá en respuesta a gradientes hidráulicos negativos en donde el nivel de agua en el basamento rocoso está por debajo del nivel de la laguna. Estas condiciones fueron encontradas a lo largo de la orilla Este y Norte del lago en donde las elevaciones del nivel de agua subterránea fueron medidas entre 4353.9msnm y 4356.9msnm comparadas con una elevación del espejo de agua de la laguna de 4358.4msnm.

Los resultados de las investigaciones con sondajes indican que la infiltración desde el lago se mueve verticalmente una considerable profundidad en las formaciones de rocas calizas a través de los conductos kársticos. Esto se ve reflejado en las características químicas del agua encontrada en los sondajes comparadas con las del agua del lago. El agua subterránea de los sondajes adyacentes al lago fue agua fresca de buena calidad y pH neutro en todos los sondajes

hasta profundidades de 250m. El total de los sólidos disueltos en el agua subterránea varía entre aproximadamente 160 y 800mg/l, comparado con el agua del lago en la cual el contenido de los sólidos disueltos está en el rango de los 22,000mg/l en la superficie. El agua ácida infiltrada reacciona con la roca caliza y neutraliza el pH, precipita yeso e hidróxidos de hierro. Sin embargo, el contenido de sólidos totales disueltos del agua de infiltración en la roca caliza debajo del lago, debería estar en el rango de los miles de mg/l y las concentraciones de sulfatos deberían estar cuando menos en el límite de la saturación del yeso, en el rango de 1400 a 1600mg/l. En comparación, las concentraciones de sulfatos en el agua subterránea encontrada en los sondajes varían entre 4 y 326mg/l indicando una muy pequeña migración lateral desde las orillas de la laguna dentro de los primeros 100 a 250m en la roca caliza.

En alguna profundidad, el agua empezará a moverse lateralmente hacia los puntos del drenaje regional. Lo más probable es que el agua infiltrada se quede en la formaciones kársticas de roca caliza y se mueva hacia los puntos de descarga para estas formaciones, los cuales incluyen la mina y la cuenca del río Huallaga hacia el Este. Se considera poco probable que el agua podría estar moviéndose hacia el Oeste hacia la cuenca del río San Juan a través de las secuencias de capas rojas y volcánicas de la Formación Casapalca. Asimismo, la experiencia de la mina es que en su mayor parte, el agua subterránea encontrada en la mina descarga a través de los sistemas de la falla Cerro de Pasco dentro de las calizas de la Formación Chambará en la caja techo, mientras que la caja piso compuesta por sistema volcánico es comparativamente seca.

La Laguna Angascancha, ubicada al Sureste de la Laguna Yanamate, se encuentra en la misma formación de roca caliza a una elevación de aproximadamente 27m por debajo del nivel de la Laguna Yanamate. Sin embargo, no existen indicaciones de ninguna influencia de la Laguna Yanamate en la calidad de agua de esta laguna. El agua en la laguna Angascancha es bastante fresca con un contenido total de sólidos disueltos de 150mg/l indicando que el agua de la laguna es una combinación de descarga de agua subterránea desde la roca caliza y escorrentía superficial.

Se colectaron muestras de agua de las quebradas Mantarangra y Sharpa, inmediatamente aguas arriba de su punto de confluencia y 6km al Noreste de la Laguna Yanamate. Estas ubicaciones tienen una elevación de aproximadamente 4000msnm, cerca de 358m por debajo del nivel de la Laguna Yanamate. El agua encontrada fue fresca con un contenido total de sólidos disueltos de 130 a 210mg/l, un valor de pH neutro y con valores de alcalinidad entre 65 y 211 mg/l (expresado

como carbonato de calcio). Colectivamente, el caudal de agua fue de aproximadamente 400 usgpm.

Considerando que la infiltración del agua de mina depositada en la laguna ha venido ocurriendo por aproximadamente 20 años, los resultados obtenidos de las muestras se consideran representativos de un efecto neto en la calidad del agua superficial y subterránea. No se aprecia ninguna influencia de la Laguna Yanamate en las características químicas del agua encontrada tanto en los cuerpos de agua superficiales, así como en las muestras de agua subterránea obtenidas.

En una escala regional, las investigaciones llevadas a cabo sobre la calidad del agua superficial y subterránea alrededor de la Laguna Yanamate han indicado que el agua ácida que infiltra desde el lago es neutralizada y que los contenidos totales de sólidos en suspensión en el agua, incluyendo hierro y sulfatos son precipitados en las formaciones de roca caliza junto con los metales pesados. Los resultados netos de la neutralización del agua infiltrada, incluyendo la influencia de la mezcla del agua con agua fresca a lo largo del camino por donde infiltra, hace que no se aprecie una influencia negativa del agua de la Laguna Yanamate en las cuencas adyacentes.

3.5 Calidad de Agua Superficial y Subterránea

Se tomaron muestras de agua en cuerpos de agua superficial para evaluar la calidad de agua en las cuencas del río San Juan y el río Huallaga. El pH y la conductividad en los puntos de monitoreo fueron medidos in-situ y a la vez se colectaron muestras de agua y se enviaron al laboratorio para su análisis por acidez, alcalinidad, sólidos totales disueltos, sólidos totales suspendidos, aniones y cationes metálicos. Las concentraciones de los parámetros analizados se compararon con los criterios de la Ley General de Aguas para Uso III (actividades agrícolas y de pastoreo).

Los resultados muestran que todas las muestras de agua cumplen con los criterios de calidad de agua para el Uso III en todos los puntos de monitoreo. El punto CP-1 coincide con el punto de monitoreo 215 de Paragsha y es el efluente total de Cerro de Pasco, colectando aguas servidas y otros efluentes. Las altas concentraciones de plomo, zinc y cobre se deben al hecho que el valor determinado corresponde a metales totales y no disueltos. Considerando el valor de 233 mg/l de TSS, estos valores no son extraños.

Se tomaron muestras de agua en los pozos de monitoreo instalados para evaluar la calidad de agua subterránea en la zona de estudio. Se midió pH y conductividad in-situ y en laboratorio. Se tomaron muestras de agua, las cuales fueron enviadas a un laboratorio para su análisis por acidez, alcalinidad, sólidos totales disueltos, aniones y cationes metálicos. Los resultados fueron comparados con los criterios de calidad de agua de la Ley General de Agua-Uso I (agua para abastecimiento doméstico con simple desinfección)

Los resultados no muestran la presencia de una influencia de la Laguna Yanamate en la calidad de agua subterránea en la zona de estudio. Las concentraciones de los parámetros medidos están por debajo de los criterios de calidad de agua con la excepción del pozo DH-4 para el arsénico y de los pozos DH-5, P-2, P-3 y P-5 para el níquel. En lo referido al arsénico, es importante continuar con el monitoreo de los pozos para poder confirmar si se trata de un valor aislado o si es el resultado de migración desde la Laguna Yanamate. El límite de níquel de la Ley General de Aguas es un valor por debajo de los límites establecidos internacionalmente.

3.6 Balance de Agua de Yanamate

El balance de agua de la Laguna Yanamate ha sido preparado en base al análisis de los siguientes parámetros:

- Precipitación.
- Evaporación.
- Descargas de Agua Ácida (Combinación de Agua Barren y Refinado).
- Escorrentía Superficial.
- Infiltración.

El cálculo del área del espejo de agua y los volúmenes de almacenamiento de la Laguna Yanamate se realizó utilizando las curvas elevación-volumen y elevación-área.

3.6.1 Precipitación

Para efectos del cálculo de la precipitación que directamente reportó hacia la Laguna Yanamate, se multiplicó el valor mensual de la precipitación por el área del espejo de agua de la laguna,

obteniéndose el volumen de agua correspondiente a la precipitación mensual para el periodo comprendido entre 1996 y 1999.

3.6.2 Evaporación

Para efectos del cálculo de la evaporación que directamente aportó a la Laguna Yanamate, se corrigió el valor de la evaporación absoluta por un factor de evaporación en lagos equivalente a 0.7. Este factor permite convertir evaporaciones absolutas en evaporaciones en cuerpos de agua tales como lagunas. El valor corregido de evaporación para cada mes se multiplicó por el área del espejo de agua para calcular el volumen de agua evaporada desde la laguna mensualmente durante el periodo comprendido entre 1996 y 1999.

3.6.3 Descargas de Agua Ácida

Los valores informados por Cerro de Pasco han sido corregidos teniendo en cuenta los resultados de la evaluación del sistema de bombeo en la Planta de Extracción por Solventes y Electrodeposición y la revisión de los registros de bombeo correspondientes a 1999. Para la evaluación del sistema de bombeo se realizaron mediciones de caudal para todas las combinaciones posibles de operación de las bombas. Una conclusión de la evaluación fue que debía aplicarse un factor de corrección a todos los valores reportados para el periodo entre 1996 y 1999 equivalente a 1.29. Es decir, que los valores de descarga reales de agua ácida utilizados para el balance de agua son 29% más elevados que los valores informados por Cerro de Pasco.

3.6.4 Escorrentía Superficial

La escorrentía superficial que aporta hacia la Laguna Yanamate se calculó multiplicando la precipitación por el área de la cuenca de captación y afectando el resultado por un factor de escorrentía superficial. Este factor fue determinado en base a la experiencia del personal de Golder y al reconocimiento hidrogeológico de campo. El promedio ponderado del factor de escorrentía aplicado equivale a 0.7 con una rango de variación entre 0.5 para los meses de menor lluvia y 0.8 para los meses más lluviosos. El área de la cuenca utilizada para el cálculo de la escorrentía superficial equivale a 7.017km².

3.6.5 Infiltración

La infiltración constituye la variable desconocida para el balance de agua y fue calculada determinísticamente a partir de los datos existentes para el periodo entre 1996 y 1999. Se aplicó la siguiente ecuación para el cálculo de la infiltración:

$$\text{Volumen}_n - \text{Volumen}_{n-1} = \text{Precipitación}_n + \text{Descarga}_n + \text{Escorrentía}_n - \text{Evaporación}_n - \text{Infiltración}_n$$

donde:

- Volumen_n = Volumen de la laguna al finalizar el mes n.
- Volumen_{n-1} = Volumen de la laguna al finalizar el mes n-1.
- Descarga_n = Volumen de descarga de agua acida durante el mes n.
- Escorrentía_n = Volumen de agua de escorrentía superficial durante el mes n.
- Evaporación_n = Volumen de evaporación desde la laguna durante el mes n.
- Infiltración_n = Volumen de la infiltración desde la laguna durante el mes n.

3.6.6 Resultados

El detalle de los resultados del balance de agua para la Laguna Yanamate en lo correspondiente al período entre Enero de 1996 y Diciembre de 1999.

• Entradas		
- Precipitación		6,338,289 m ³
- Escorrentía		11,988,277 m ³
- Descargas		36,188,555 m ³
• Salidas		
- Evaporación		4,062,656 m ³
- Infiltración		41,117,815 m ³
• Ganancia		9,334,651 m ³

Los resultados muestran que el balance de agua de Yanamate viene siendo controlado fuertemente por las descargas de agua ácida provenientes de Cerro de Pasco y por la infiltración

de grandes volúmenes de agua en el subsuelo. La diferencia de nivel y de volumen en la laguna para el mismo periodo se lista a continuación:

•	Inicio de 1996		
-	Volumen	10,154,012m ³	
-	Elevación	4,352.84msnm	
•	Final de 1999		
-	Volumen	19,488,663m ³	
-	Elevación	4,357.64msnm	

Durante el período analizado, el volumen de agua almacenado en la laguna se ha incrementado en más de 9 millones de metros cúbicos (habiéndose prácticamente duplicado), significando esto un incremento en el nivel del espejo de agua de cerca de 5 metros. El incremento en la elevación del nivel de la laguna no ha sido más pronunciado dado que la curva de elevación-volumen muestra que para elevaciones mayores la capacidad de almacenamiento de la cuenca se incrementa en una proporción mucho mayor que para elevaciones menores.

El análisis muestra también que de continuar con el volumen actual de descarga hacia la laguna, tanto el volumen de almacenamiento, así como la elevación del espejo de agua tenderán a elevarse a niveles por encima de los actuales. Finalmente, los resultados del cálculo de la infiltración para el período estudiado han permitido generar datos de infiltración mensuales para cuatro años consecutivos, los cuales servirán para realizar la formulación de un modelo probabilístico para la predicción del comportamiento de la laguna en el futuro.

4.0 PROYECCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE YANAMATE EN EL FUTURO

El modelo utilizado para la predicción del comportamiento de la Laguna Yanamate en el futuro ha sido desarrollado con la utilización del programa @RISK. Este programa ha sido diseñado como una herramienta para realizar análisis de riesgos bajo un enfoque probabilístico, lo que permite evaluar la ocurrencia de un evento con una probabilidad asociada al mismo.

Un modelo similar al presentado anteriormente fue desarrollado con el programa @RISK asignando funciones probabilísticas a cada uno de las variables del modelo. Estas asignaciones fueron hechas después de analizar el comportamiento de cada variable y de compararlo con

modelos probabilísticos conocidos. Las variables fueron analizadas en periodos mensuales y para cada periodo se calcularon los promedios aritméticos, las desviaciones estándar y las correlaciones entre un periodo y el subsiguiente.

La misma ecuación utilizada para la determinación del balance de agua de la Laguna Yanamate fue utilizada para el modelo probabilístico. Para cada valor de volumen determinado por la ecuación se determinó la elevación y el área del espejo de agua correspondiente.

Las siguientes condiciones fueron determinadas para cada simulación efectuada:

- Número de Iteraciones por Simulación = 1000.
- Tipo de Muestreo = Latin Hipercube.

Las correlaciones consideradas relevantes para las simulaciones fueron escogidas de acuerdo al siguiente criterio:

- Para la precipitación, correlaciones mayores que 0.33.
- Para la evaporación, correlaciones mayores que 0.34.
- Para la descarga y las infiltraciones, correlaciones mayores que 0.90.

Los valores límite para las correlaciones relevantes fueron determinados en función de la cantidad de datos históricos disponibles para cada variable una función de sensibilidad probabilística. Como es lógico, las variables con mayor información disponible para el análisis como son evaporación (23 registros históricos) y evaporación (19 registros históricos) obtuvo valores de correlación relevante menores que las variables con menores registros históricos como son la descarga y las infiltraciones (4 registros históricos).

4.1 Calibración del Modelo

El modelo probabilístico fue calibrado mediante la realización de 3 simulaciones para las elevaciones finales de la laguna para los meses desde Enero hasta Julio del 2000. Los resultados fueron comparados con las elevaciones reales medidas en el campo. Cada simulación fue realizada con 3 series de valores de coeficientes de escorrentía distintas (los coeficientes de

escorrentía constituyen las únicas variables del modelo cuyos valores podrían ser cambiados determinísticamente). Se escogió para calibrar el modelo los resultados que arrojaron valores promedio más cercanos a los valores reales medidos en el campo.

Como resultado de la calibración del modelo se determinaron los coeficientes de escorrentía para la cuenca de Yanamate. Los coeficientes determinados varían mensualmente desde 0.5 como mínimo en la temporada de estiaje hasta 0.8 como máximo en la temporada de lluvias. El valor promedio ponderado del coeficiente de escorrentía para la cuenca de Yanamate es de 0.7.

4.2 Proyecciones del Comportamiento Futuro

Una vez calibrado el modelo, se utilizó @RISK para realizar simulaciones del comportamiento de la Laguna Yanamate en el futuro (a partir de Agosto del 2000 hasta Diciembre del 2004) bajo tres escenarios distintos:

- Escenario 1: Descarga hacia Yanamate de 4500 usgpm (descarga actual).
- Escenario 2: Descarga hacia Yanamate de 3375 usgpm.
- Escenario 3: Descarga hacia Yanamate de 2250 usgpm.

Se escogió la elevación del espejo de agua de la laguna como parámetro de salida (output) para la simulación. Las simulaciones fueron efectuadas siguiendo las mismas condiciones descritas para la formulación del modelo (1000 iteraciones y método de muestreo Latin Hipercube). Se definió como nivel crítico para la evaluación un nivel arbitrario correspondiente a 4359.72msnm, elevación equivalente a 1 metro por debajo del nivel de la carretera en el sector Este de la laguna, en donde el espejo de agua de la laguna se encuentra lo más cerca del camino. Este valor representa una situación extremadamente crítica y no se recomienda como un nivel crítico para el manejo de la laguna en el futuro.

- **Escenario 1**

Los resultados de la simulación muestran que existe una tendencia general ascendente para el nivel del espejo de agua de la laguna, existiendo fluctuaciones en el nivel correspondientes a la ocurrencia del periodo de lluvias y al periodo de estiaje. De acuerdo a los resultados de la

simulación, las probabilidades que el nivel de la laguna esté por debajo del nivel crítico son las siguientes:

- 100% desde Agosto del 2000 hasta Julio del 2001.
 - 95% en Agosto del 2001.
 - 85% en Noviembre del 2001.
 - 75% en Diciembre del 2001.
- **Escenario 2**

Los resultados de la simulación muestran que existe, durante los primeros meses, una ligera tendencia ascendente del nivel del espejo de la laguna con fluctuaciones ocasionadas por la ocurrencia sucesiva de los periodos de lluvias y estiaje. Durante los últimos meses del periodo estudiado el nivel de la laguna tiende a estabilizarse. De acuerdo a los resultados de la simulación las probabilidades que el nivel de la laguna esté por debajo del nivel crítico son las siguientes:

- 100% desde Agosto del 2000 hasta Agosto del 2003.
 - 95% a partir de Setiembre del 2003 en adelante sin ser nunca menor.
- **Escenario 3**

Los resultados de la simulación muestran una tendencia general decreciente con fluctuaciones correspondientes a la ocurrencia de los periodos de lluvia y estiaje. De acuerdo a los resultados, la probabilidad que el espejo de la laguna este por debajo del nivel crítico es de 100% desde Agosto del 2000 en adelante.

5.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La evaluación hidrológica e hidrogeológica del área de la Laguna Yanamate y alrededores no ha detectado una influencia negativa en la calidad de agua superficial o subterránea en los cuerpos del agua estudiados hacia la cuenca del río Huallaga y la cuenca del río San Juan. En una escala regional podemos decir que el agua que infiltra desde la Laguna Yanamate es neutralizada por la roca caliza subyacente y se mueve con una gradiente hidráulica vertical utilizando conductos kársticos para moverse. No existe descarga superficial desde la laguna a otros cuerpos de agua.
- El balance de agua de la Laguna Yanamate muestra que si bien la cantidad de agua que se infiltra desde la laguna hacia la roca subyacente es mayor que el agua que es bombeada desde la mina Cerro de Pasco, la laguna ha incrementado su volumen de agua y por consiguiente el espejo de agua se ha elevado. Esta tendencia se mantendrá si no se reducen en forma significativa las cantidades de agua que son vertidas. El programa de separación de aguas neutras planteado actualmente permitirá alcanzar una reducción de cerca del 50% en las descargas de agua ácida hacia Yanamate con lo cual la tendencia en el comportamiento de la laguna se revertirá y podrá apreciarse un decrecimiento en el nivel del espejo de agua una vez que el programa entre en operación a toda su capacidad.
- En los 20 años durante los cuales la Laguna Yanamate ha venido siendo utilizada como depósito de agua ácida, no se ha notado la influencia de descargas de aguas ácidas desde la laguna a ningún curso de agua superficial, por lo tanto, basándose en esta experiencia, es posible que la Laguna Yanamate siga siendo utilizada para el manejo de las aguas ácidas de Cerro de Pasco. Sin embargo, el uso continuo de la Laguna Yanamate como un depósito de aguas ácidas requiere de la elaboración de un plan de manejo ambiental que contemple lo siguiente:
 - Plan de Manejo Operativo, incluyendo los procedimientos para el registro de las descargas y el manejo de un balance de agua.
 - Plan de Seguridad, incluyendo los procedimientos para la protección de la población y la fauna.
 - Plan de Contingencia, incluyendo los procedimientos para el control de derrames desde la tubería y la neutralización del agua en caso que se suspende la operación de bombeo. Se recomienda que se implemente un sistema de neutralización de agua a ser utilizado en estos casos (proceso batch). El sistema de neutralización de agua más efectivo lo

constituye uno que combine el uso de caliza y cal como agentes neutralizantes para proceder luego a mezclar los lodos generados con relaves para su disposición final en Ocroyoc.

- Plan de Monitoreo, incluyendo agua superficial, agua subterránea y parámetros meteorológicos.
- Plan de Recuperación, incluyendo un programa para el manejo de suelos contaminados una vez que la laguna empiece a bajar de nivel y alcance un equilibrio.
- Plan de Cierre, delineando la estrategia para el abandono de las instalaciones una vez que la mina paralice.