

ANEXO 5.2 HIDROGEOLOGÍA



EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PRELIMINAR CERRO NEGRO NORTE

INFORME FINAL
Marzo 2007





www.artoisconsulting.cl

31 de marzo de 2007

Compañía Minera del Pacifico S.A.
Brasil 1050
Vallenar
III Región
CHILE

Sr. Alex Yañez
Ingeniero Geotécnico

Estimado Alex:

Re: Evaluación Hidrogeológica Preliminar – Cerro Negro Norte
Orden de Compra No.: 53.089

Adjunto dos copias del informe final que presenta una evaluación preliminar de las condiciones hidrogeológicas asociadas con el proyecto Cerro Negro Norte. Se incluye una serie de recomendaciones para implementar en terreno.

Sin otro particular, se despide

Atentamente,

ARTOIS CONSULTING LIMITADA

Jan J. Van Hooydonck
Consultor Hidrogeólogo (M.Sc., C.Geol., F.G.S.)

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto Cerro Negro Norte, ubicado a 32 km al norte de Copiapó (III Región), consiste en la explotación de un yacimiento ferrífero a través de un rajo abierto (2500 m x 1000 m x 300 m). En los sondajes de exploración se han detectado la presencia de agua subterránea a profundidades de 100 m bajo la superficie. Compañía Minera del Pacífico S.A. (CMP) contrató a Artois Consulting Ltda. (Artois) para evaluar las implicaciones que podría tener la presencia de agua en el desarrollo minero.

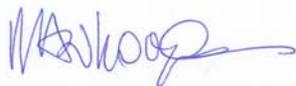
En base de los escasos datos hidrogeológicos e interpolaciones con datos geotécnicos, se concluye lo siguiente:

1. El área del yacimiento se caracteriza por unidades geológicas poco permeables, constituyendo formaciones ígneas y metamórficas. Sin embargo, las fracturas y diaclasas, especialmente aquellas sin relleno de arcilla, permiten la filtración y la circulación de agua subterránea a profundidades mayores de 100 m.
2. Por lo tanto, bajo 100 m de profundidad (es decir: 1000 a 1200 msnm), el desarrollo minero se verá afectado por la filtración de agua subterránea. Considerando un rajo de 300 m de profundidad, se estima que alrededor de 30 a 50% de los recursos de hierro se encuentra actualmente bajo el nivel de agua.
3. La alta tasa de evaporación y la actividad minera (retiro del mineral saturado) actuarán para reducir el impacto de agua dentro del rajo. Sin embargo, en lugares puntuales, puede ser beneficioso de deprimir los niveles de agua. En forma preliminar, se considera una estrategia de desagüe con drenes sub-horizontales, posiblemente complementada con pozo(s) de bombeo. Así se controlará la presión de poros en los taludes y se mejorará el manejo de agua dentro de la operación minera.

4. Se estima que dicho sistema de desagüe interceptará un volumen de entre 1 a 15 L/s. Sin embargo, debido a la gran heterogeneidad de la roca, los flujos pueden variar significativamente. En general, se esperan aumentos temporales al interceptar zonas fracturadas y contactos litológicos. A largo plazo, los flujos de agua tenderán a bajar a caudales del orden de 1 L/s.

Para propósitos legales, ambientales y operacionales, Cerro Negro Norte debiera contar con una red de monitoreo y muestreo de agua, operando a la brevedad. Los datos permitirán un análisis más elaborado para, posteriormente, desarrollar sistemas de drenaje a nivel de ingeniería de detalle.

ARTOIS CONSULTING LIMITADA



Jan J. Van Hooydonck
Consultor Hidrogeólogo (M.Sc., C.Geol., F.G.S.)

Informe No. ____ de ____ (copia PDF)

Fecha: _____

TABLA DE CONTENIDOS

Sección	Página
RESUMEN EJECUTIVO	I
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del Proyecto	1
1.2 Objetivo y Alcance del Trabajo	2
2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES	3
2.1 Descripción del Plan Minero	3
2.2 Descripción de la Cuenca Hidrográfica	3
2.3 Datos Meteorológicos	4
2.4 Resumen del Marco Geológico	5
2.5 Resumen de la Geología Local y Análisis Estructural	5
2.6 Niveles de Agua en Sondajes de Exploración	8
2.7 Programa Actual de Perforación de Sondajes Geotécnicos	9
3 INTERPRETACIÓN Y ANALISIS DE DATOS	10
3.1 Balance de Agua Subterránea	10
3.2 Análisis de Flujo de Agua Subterránea	11
3.3 Estimación de Parámetros Hidrogeológicos	11
3.4 Modelo Hidrogeológico Conceptual	12
3.5 Estimación Preliminar de Volúmenes de Drenaje	13
4 MÉTODOS PRELIMINARES PARA EL CONTROL DE AGUA	15
4.1 Posibles Interferencias con la Operación Minera	15
4.1.1 Impactos durante la Planificación y Construcción	15
4.1.2 Impactos durante la Operación	15
4.1.3 Consideraciones para el Plan de Cierre	16
4.2 Drenes Sub-Horizontales	17
4.3 Pozos de Bombeo	17
4.4 Circuito de Drenaje	18
5 RECOMENDACIONES	19
5.1 Plan de Captación de Datos Hidrogeológicos	19
5.2 Documentación y Registros	20
5.3 Cronograma del Plan de Trabajo	21
6 CONCLUSIONES	22
7 REFERENCIAS	24

TABLAS

<i>Tabla 2-1</i>	<i>Datos Pluviométricos Regionales</i>	4
<i>Tabla 2-2</i>	<i>Resumen de la Litología y Análisis Estructural</i>	6
<i>Tabla 2-3</i>	<i>Resumen de los Niveles de Agua Subterránea por Sector</i>	8
<i>Tabla 3-1</i>	<i>Estimación de Parámetros Hidrogeológicos</i>	12
<i>Tabla 3-2</i>	<i>Estimación de Volúmenes de Drenaje</i>	14
<i>Tabla 5-1</i>	<i>Plan de Acción: Programa Hidrogeológico año 2007</i>	21

FIGURAS

Figura 1.1	Cerro Negro Norte: Plano de Ubicación.
Figura 2.1	Plano Conceptual de la Infraestructura Minera.
Figura 2.2	Delineación de la Cuenca Hidrográfica.
Figura 2.3	Plano Geológico Local con Ubicación de Sondajes.
Figura 2.4	Ubicación Sondajes con / sin Registros de Agua.
Figura 3.1	Plano Piezométrico y Dirección de Flujo.
Figura 3.2	Perfiles Hidrogeológicos.
Figura 3.3	Estimación Preliminar de Volúmenes de Drenaje.
Figura 4.1	Condiciones de Cierre: "Pit Lake" Cerro Imán.
Figura 4.2	Aplicación de Conceptos de Drenaje.

ANEXOS

Anexo A	Datos Geotécnicos (RQD y porosidad).
Anexo B	Niveles de Agua en Sondajes de Exploración.
Anexo C	Procedimientos Pruebas "In-situ" en Sondajes Geotécnicos.
Anexo D	Procedimientos Campaña Hidrogeológica.

1 INTRODUCCIÓN

El día 24 de enero de 2007, Compañía Minera del Pacífico (CMP) contrató a la empresa Artois Consulting Ltda. (Artois) para realizar una evaluación hidrogeológica preliminar del proyecto Cerro Negro Norte, III Región.

El trabajo forma parte de la evaluación geotécnica de dicho yacimiento.

1.1 *Descripción del Proyecto*

El yacimiento ferrífero Cerro Negro Norte está ubicado a 32 km al norte de Copiapó y 42 km al este de Caldera, III Región (ver Figura 1.1). Es un yacimiento vetiforme que aflora en superficie con una longitud de 3000 m y una potencia de 200 m, constituyendo un recurso de más de 260 millones de toneladas entre recursos magnéticos y no magnéticos.

El proyecto requiere la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual y el desarrollo de un programa de investigación y monitoreo para dimensionar la posible interferencia del agua subterránea en el desarrollo de la mina.

1.2 Objetivo y Alcance del Trabajo

CMP requiere una **asesoría en hidrogeología** que permita dimensionar y anticipar las condiciones hidrogeológicas durante el futuro desarrollo minero. El trabajo fue realizado de acuerdo al alcance presentado en las bases de licitación (22 diciembre 2006), resumiendo las actividades especificadas en las siguientes tareas principales:

- Tarea 1: Revisión de Antecedentes y Visita a Terreno;
- Tarea 2: Interpretación e Análisis;
- Tarea 3: Diseños Preliminares de Métodos de Control; y
- Tarea 4: Recomendaciones.

Este informe final presenta los resultados asociados con las cuatro tareas del proyecto.

El contenido de este informe es una descripción de la opinión profesional de la empresa Artois Consulting Ltda. en base de la información disponible al momento de realizar el trabajo. La evaluación fue realizada por un consultor hidrogeólogo con registro profesional de "Chartered Geologist" y está basada en datos existentes hasta el día 2 de febrero de 2007.

2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Durante los días 1 y 2 de febrero de 2007, personal de Artois realizó una visita de reconocimiento a la faena Cerro Negro Norte. A continuación, se presentan solamente los resultados y observaciones con relevancia para la evaluación hidrogeológica.

2.1 Descripción del Plan Minero

El desarrollo del yacimiento ferrífero Cerro Negro Norte forma parte de la segunda fase del proyecto denominado “Hierro Atacama”, y constituye un rajo, una planta de proceso, un ducto para el transporte hasta la puerta, botaderos y un tranque de relaves.

La mina debiera estar operativa en el año 2010, manteniendo una vida útil de unos 20 años y produciendo aproximadamente 4 millones toneladas anuales de “*pellets feed*” (CAP 2004). Para esa producción, se anticipa un requerimiento de 120 a 150 L/s de agua (CMP comunicación personal 2007).

Figura 2.1 presenta una vista conceptual del proyecto. El rajo final tendrá unos 2500 m de largo, 1000 m de ancho y unos 300 m de profundidad. La ubicación final de los botaderos y el tranque de relave está en estudio.

2.2 Descripción de la Cuenca Hidrográfica

El yacimiento de Cerro Negro Norte se encuentra en la Cordillera de la Costa a una altura entre 1.100 a 1.500 msnm. Sus coordenadas geográficas son N 7.001.600 y E 366.800, ubicándose en la cuenca de la Quebrada del Chango que desemboca al mar unos 40 km al norte de Caldera. En la Figura 2.2, se observa que el sitio está ubicado fuera de la cuenca hidrográfica del Río Copiapó.

La sub-cuenca hidrográfica que encierra el yacimiento tiene una superficie de aproximadamente 20 km². La cuenca esta formada superficialmente por lomajes suaves rodeado por cerros apuntados. El terreno demuestra evidencia de aluviones, productos

de lluvias torrenciales en el pasado. En la actualidad, está ausente cualquier tipo de escorrentía superficial.

2.3 Datos Meteorológicos

Durante el último trimestre de 2006 fue instalada una estación meteorológica en el área del campamiento Chamo, a unos 15 km al sur del proyecto. Se mide la precipitación, la temperatura ambiental y la dirección y la velocidad del viento.

Debido al corto periodo del monitoreo local, la Tabla 2.1 resume los datos pluviométricos obtenidos en las estaciones meteorológicas de Caldera (10 msnm) y Copiapó (380 msnm).

Se observan condiciones desérticas con una tasa de precipitación media anual de aproximadamente 20 mm/año. Sin embargo, cuando se presenta el evento del Niño (tal como ocurrió en 1982, 1987, 1992 y 1997) se registran precipitaciones muy superiores a la media. A su vez, también es común la ocurrencia de años sin registro de precipitaciones o con valores especialmente bajos (precipitación anual inferior a 10 mm) (Golder 2006).

Tabla 2-1 Datos Pluviométricos Regionales

Estación	Altura (msnm)	Años Registros	Promedio (mm/año)	PE 10% (mm/año)	PE 50% (mm/año)	PE 85% (mm/año)
Caldera	10	9 (1992-2000)	23,1	95,5	8,4	0,3
Copiapó	380	30 (1971-2000)	19,6	133,5	0,5	0,0

Fuente: Golder 2006

Se asume que la evaporación potencial anual varía entre 1.400 y 1.900 mm/año (Golder 2006, Artois 2006). Bajo estas condiciones climáticas, se produce una recarga de agua subterránea poco sostenida y muy limitada.

2.4 Resumen del Marco Geológico

El yacimiento Cerro Negro Norte forma parte de la franja ferrífera chilena, un cinturón mineralizado de aproximadamente 600 km de longitud y unos 30 km de ancho que se ubica en la Cordillera de la Costa de la III y IV región. La franja coincide con la línea de emplazamiento de las rocas intrusivas (Cretácico Superior) y estructuras regionales antiguas (Mega Falla de Atacama).

En la zona de contactos con las rocas estratificadas (lavas, brechas y sedimentos del Cretácico Inferior) se produce una faja metamórfica de contacto la cual hospede la mineralización de hierro (CMP 2006).

Fallas y fracturas de tendencia N S y N.N.E. se ubican paralelos a las estructuras regionales y se constituyen en el lugar propicio para el relleno y la depositación de la mineralización de hierro. Además, se identifican estructuras de rumbo W.N.W. produciendo una serie de bloques con movimientos de desplazamiento horizontal y vertical. En este modelo estructural se reconocen los distintos bloques de Cerro Negro Norte hasta Cerro Negro Sur y especialmente la gran falla Emplantillado que mueve el primer depósito con respecto al segundo en aproximadamente 300 m (CMP 2006).

2.5 Resumen de la Geología Local y Análisis Estructural

Figura 2.3 presenta la geología local y las estructuras principales en el área del yacimiento. Actualmente, se está realizando una campaña de sondajes geotécnicos en las afueras del cuerpo mineralizado para definir las unidades y estructuras periféricas (ver Sección 2.7).

Aparte de los depósitos superficiales (aluvio y coluvio) al sur y este del área minera, se distingue 4 tipos de litología, 3 tipos de mineralización y 4 lineamientos estructurales importantes:

- **Litología:** Las unidades geológicas comprenden los cuerpos intrusivos (tal como diorita, microdiorita, granodiorita y pórfido monzonítico), meta-andesita (con

actonolita), skarn (con anfibola) y brechas (de turmalina). La meta-andesita, la cual forma el cuerpo mineralizado mas voluminoso, tiene una orientación N-S;

- **Mineralización:** La mineralización se presenta como hierro masivo en la meta-andesita, magnetita y hematita (en cuerpos lenticulares, vetas, vetillas y diseminado), y relleno en fracturas (junto con óxidos de Cu, calcita y clorita);
- **Estructuras:** Las familias de estructuras sub-verticales principales son N-S, N.E. y (W).N.W. También se reconoce un set sub-horizontal con rumbo NW y manteo SW.

Para fines de identificación, el área del yacimiento está subdivido en 5 sectores (Beduino, Augusta, Abanderada, Veta Central y Cata Alfaro). En base del mapeo superficial (Ingeroc 2006) y los sondajes de exploración (CMP 2004-2006), se resumen la litología y análisis estructural por cada sector en Tabla 2.2.

Tabla 2-2 Resumen de la Litología y Análisis Estructural

Sector	Litología	RQD⁽¹⁾	FF⁽¹⁾ (m⁻¹)	K⁽¹⁾⁽²⁾ (m/s)
Beduino	Meta-Andesita	84 (56-100)	4 (0-8)	2×10^{-7} $(3 \times 10^{-12} - 5 \times 10^{-5})$
	Meta-Andesita con Fe masivo	76 (23-97)	6 (2-14)	4×10^{-5} $(2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-4})$
Augusta	Meta-Andesita ⁽³⁾	87 -	3 -	2×10^{-5} -
	Meta-Andesita con Fe masivo	87 (49-100)	4 (0-10)	3×10^{-5} $(2 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-4})$
Abanderada	Meta-Andes. con Fe masivo ⁽³⁾	85 -	3 -	2×10^{-6} -
	Fe masivo	91 (85-99)	4 (3-5)	7×10^{-6} $(3 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-3})$
	Diorita	77 (66-89)	4 (3-4)	3×10^{-6} $(3 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-5})$
Veta Central	-	-	-	-
Cata Alfaro	Skarn con Fe masivo	71 (62-89)	3 (2-5)	1×10^{-6} $(5 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-6})$

1. La tabla muestra los valores promedios con los rangos entre paréntesis. Todos los valores sin decimales;
2. Valor K calculado en base de la frecuencia de fracturas y apertura (ver Anexo A);
3. En base de un solo dato.

La calidad de la roca ígnea-metamórfica, y su potencial de circular aguas, depende de la alteración, la cantidad y conectividad de las discontinuidades (fracturas, diaclasas, contactos litológicos, etc.). Para el análisis hidrogeológico, se destacan principalmente la intensidad de las fracturas, la apertura y su respectivo tipo de relleno (Hoek et.al. 1981).

Se concluye lo siguiente:

- La meta-andesita con hierro masivo demuestra el más amplio rango de calidad, con un valor de RQD variando entre 23 a 100. La frecuencia de fracturas mide desde 0 hasta 14/m, la cual se traduce en un extenso rango de permeabilidad (10^{-6} a 10^{-4} m/s).
- La meta-andesita sin mineralización es generalmente menos fracturada, la cual se demuestra en su valor de RQD (56-100) y una frecuencia de fracturas de 0 a 8/m. En base de estos datos, se asume que fuera de las zonas mineralizadas la roca es impermeable (10^{-12} a 10^{-8} m/s) aumentando su permeabilidad solamente a lo largo de fracturas (10^{-7} - 10^{-5} m/s).
- Las rocas de caja (tales como diorita y skarn) son generalmente de moderada a buena calidad (62-89) con una frecuencia de fractura no superior a 5/m. La permeabilidad varía entre 10^{-7} a 10^{-5} m/s.
- Hierro masivo: Generalmente, demuestra un alto valor de RQD (85-99). Sin embargo, se presentan fracturas con una apertura suficiente para elevar la permeabilidad a valores entre 10^{-7} a 10^{-3} m/s.

Los cálculos para convertir los datos geotécnicos en una estimación de permeabilidad están presentados en Anexo A. Cabe mencionar que el mapeo de celdas geotécnicas fue realizado específicamente para registrar zonas de fracturas y diaclasas. Por lo tanto, los valores de permeabilidad no son representativos por el macizo rocoso sino por estas zonas aisladas con fracturamiento.

2.6 Niveles de Agua en Sondajes de Exploración

Anexo B presenta todos los niveles de agua medidos en los sondajes de exploración durante su perforación. Figura 2.4 presenta un plano con los sondajes con registros de existencia de agua. Se aprecia que todos los sondajes se ubican dentro el perímetro del rajo, lo cual limita la interpretación de las condiciones hidrogeológicas.

Durante la visita a terreno, 21 sondajes fueron inspeccionados de los cuales 13 permitieron la medición nuevamente del nivel de agua¹. Tabla 2.3 presenta un resumen de los resultados por sector.

Tabla 2-3 Resumen de los Niveles de Agua Subterránea por Sector

Sector	Nivel de Agua Subterránea			
	Min. (msnm) ⁽¹⁾	Max. (msnm)	Promedio (msnm)	Promedio (mbs) ⁽²⁾
Beduino	1009	1123	1077	102
Augusta	1103	1211	1137	113
Veta Central	1138	1238	1193	88
Abanderada ⁽³⁾	-	-	1175	192
Cata Alfaro	-	-	-	-

1. msnm: metros sobre nivel del mar; 2. metros bajo superficie; 3. Nivel de agua en el sector Abanderada en base de un sondaje de 192 m que fue abandonado por ingreso de agua.

Los datos indican que el nivel de agua subterránea se encuentra generalmente entre 80 y 115 m bajo la superficie (mbs). En el sector Abanderada, en áreas que coinciden con una mayor elevación topográfica, aumenta la profundidad hasta 192 m.

En cuanto a la elevación piezométrica (medida en msnm), se aprecia una gradual disminución de los niveles hacia el sur con valores promedios bajando desde 1193 msnm (Veta Central) hacia 1077 msnm (sector sur). Este descenso genera un flujo de agua subterránea hacia el sur / sur-este, a un gradiente hidráulica alta de 0.1 (o 10%).

¹ En comparación con los niveles medidos durante la perforación, el nivel de agua ha subido entre 10 a 20 m. Esta alza se debe probablemente al efecto de estabilización del nivel de agua después de la perforación y no representan un aumento real en los niveles piezométricos.

2.7 Programa Actual de Perforación de Sondajes Geotécnicos

Actualmente, la empresa Geotec Boyles está llevando a cabo una campaña de perforación de sondajes diamantinos con fines geotécnicos². Se perforará un total de 3100 m en 13 sondajes inclinados, mapeando la litología y las características geotécnicas del testigo (método RMR de Bieniawski). La ubicación de los sondajes está incluida en Figura 2.4.

En base a las observaciones preliminares realizadas en los sondajes G07-02 (sector Beduino) y G07-10 (sector Veta Central) durante la visita a terreno, se concluye lo siguiente:

- G07-02: El cuerpo meta-andesita muestra una profunda alteración y oxidación en los primeros 30 m de testigo. En general, se estima que la zona de alteración varía entre 20 a 80 m de espesor (CMP comunicación personal 2007);
- G07-10: La perforación cruza la estructura principal N-S en la meta-andesita, generando extensas zonas de fracturamiento (5 a 10 m). Se observa una porosidad secundaria, mineralización (actinolita) y alteración (clorita).

Se recomienda complementar el análisis geotécnico con pruebas de permeabilidad in-situ en los sondajes (Ej. método del Lugeon Mejorado) para poder definir la potencial de auto-drenaje de los taludes.

² Los sondajes permiten (a) recuperar muestras “in-situ” geomecánicas de los taludes de la mina (es decir: fuera del área mineralizada), (b) establecer el tipo y la orientación de los contactos, y (c) establecer las características de las estructuras para mejorar el modelo estructural. Los sondajes no incluyen objetivos específicamente hidrogeológicos.

3 INTERPRETACIÓN Y ANALISIS DE DATOS

A través de una interpretación y análisis de los datos existentes, se presenta un modelo hidrogeológico conceptual. El modelo conceptual permite simplificar las condiciones naturales pues identifica solamente los aspectos más importantes que controlan el régimen hidrogeológico.

El modelo conceptual es una hipótesis que representa la mejor interpretación de las condiciones hidrogeológicas, en base de los datos recopilados hasta el momento. Datos adicionales obtenidos a través de pruebas “*in-situ*” y monitoreo pueden mejorar la interpretación sucesivamente.

3.1 Balance de Agua Subterránea

Los recursos de agua subterránea en la sub-cuenca son creados por la infiltración de precipitaciones, la infiltración de la escorrentía y la percolación de agua subterránea a través de lineamientos estructurales.

La alta tasa de evaporación³ (1.400 - 1.900 mm/año o hasta 200 veces la precipitación promedio anual) no permite la generación repetida de escorrentía superficial y subterránea. Solamente durante eventos de precipitación mayor (Ej. evento el Niño con mas de 100 mm/año) se espera una filtración mínima de agua. Sin embargo, no superaría más de 6 a 9% de la tasa de precipitación a largo plazo (Houston 2006). Bajo estas condiciones asumidas, la cuenca de Cerro Negro Norte (20 km²) generaría aproximadamente 20.000 a 40.000 m³/año, equivalente a 1 L/s en recarga de agua subterránea⁴.

Además de esta mínima cantidad de agua, los lineamientos estructurales que crucen los límites topográficos de la cuenca podrían permitir la circulación de agua subterránea.

³ Debido a la mínima precipitación y la alta tasa de evaporación, no existe una abundancia de vegetación. Por lo tanto, en esta estimación preliminar, no se considera la pérdida debido a la evapo-transpiración.

⁴ El cálculo se basa en una tasa de infiltración de 1 a 2 mm/año multiplicado por el área de la cuenca.

Para propósitos de esta evaluación, dicho aporte lateral es considerado cero hasta que se compruebe lo contrario.

3.2 Análisis de Flujo de Agua Subterránea

Figura 3.1 presenta un plano piezométrico para el área de la mina. Se observa que los datos hidrogeológicos cubren alrededor del 60% del área del rajo. Por lo tanto, las observaciones acerca de los posibles impactos a las operaciones mineras son muy preliminares.

Figura 3.2 presenta una serie de perfiles transversales y un perfil longitudinal que demuestran las condiciones hidrogeológicas interpretadas en los distintos sectores de la mina.

Se observa lo siguiente:

- Se presenta una dirección de flujo de agua subterránea hacia el sur y sur-este a través de un gradiente hidráulica de 0.1 (10%). Esta gradiente es relativamente alta, indicando la baja permeabilidad de los estratos;
- Las estructuras W.N.W parecen inducir un grado de permeabilidad y canalizan el agua subterránea. Este drenaje subterráneo coincide con la orientación de las quebradas visibles en la superficie;
- Aunque menos evidente, las estructuras N.E. parecen obstruir el drenaje de agua subterránea, formando barreras impermeables.

3.3 Estimación de Parámetros Hidrogeológicos

Aparte de los niveles de agua, no existen datos hidrogeológicos medidos en terreno. Por lo tanto, los parámetros hidrogeológicos presentados en la Tabla 3.1 solamente representan órdenes de magnitud que fueron basados en las características geotécnicas y rangos publicados en la literatura técnica (Envirobase 2006). Deben ser verificados con pruebas “*in-situ*” de permeabilidad.

Todas las unidades se caracterizan por una baja permeabilidad (menor a 10^{-7} m/s), la cual aumenta debido a la frecuencia y apertura de fracturas (10^{-7} a 10^{-5} m/s). Consecuentemente, la transmisividad⁵ se mantiene en rangos menores de 200 m²/día. Se aprecia el reducido coeficiente de almacenamiento (<1%) típico para rocas fracturadas, el cual puede subir en zonas meteorizadas.

Tabla 3-1 Estimación de Parámetros Hidrogeológicos

Unidad Geológica	Valor K ⁽¹⁾ (m/s)	Espesor Sat. ⁽²⁾ (m)	Valor T ⁽³⁾ (m ² /d)	Valor S ⁽⁴⁾ (%)
Roca Ígnea-Metamórfica Sin Fracturas	10^{-12} - 10^{-8}	200	≤0.1	0.001-0.1
Meta-Andesita Fracturada	10^{-7} - 10^{-5}	200	2-200	0.01-1
Meta-Andesita Meteorizada	10^{-7} - 10^{-5}	10	0.1-10	0.1-10
Meta-Andesita con Fe ⁽⁵⁾	10^{-6} - 10^{-5}	200	20-200	0.01-1
Rocas de Caja (Diorita, Skarn)	10^{-7} - 10^{-5}	200	2-200	0.01-1

1. Valor K: valor de conductividad hidráulica saturada; 2. Espesor saturada representa el espesor entre el nivel piezométrico y el fondo del rajo final; 3. Valor T: valor de transmisividad; 4. Valor S representa el coeficiente de almacenamiento; 5. Valores mayor de 10^{-5} m/s fueron eliminados porque no coinciden con el rango habitual presentado en la literatura técnica para estos tipos de rocas.

3.4 Modelo Hidrogeológico Conceptual

Tal como fue indicado anteriormente, el modelo conceptual representa la mejor interpretación de los datos disponibles actualmente. Esta hipótesis está basada en los limitados datos de terreno y la experiencia de Artois en ambientes similares. Se espera mejorar los conceptos de flujo a través de pruebas “*in-situ*” y un plan de monitoreo.

A continuación, se presentan los conceptos básicos aplicados:

- **Nivel de Agua:** El nivel piezométrico se encuentra a una elevación de 1000 a 1200 msnm, promoviendo un flujo de agua subterránea hacia el sur / sur-este;
- **Recarga y Descarga:** El área del yacimiento no recibe una significativa recarga y la circulación de agua está limitada por rocas poco permeables. No se ha observado una descarga de agua subterránea hacia la superficie. Por lo tanto,

⁵ La transmisividad equivale al espesor saturado multiplicado por la conductividad hidráulica.

se espera que los niveles piezométricos se mantengan estáticos a corto y mediano plazo;

- Régimen Hidrogeológico: Las fallas, fracturas, micro-fracturas y diaclasas, especialmente aquellas que no tienen un relleno arcilloso, aumentan la permeabilidad de la roca, canalizando el agua por estas vías. El régimen de flujo es controlado por esta porosidad “secundaria” ya que el macizo rocoso es considerado poco permeable. Se esperan condiciones de flujo no-confinados (es decir: libre) aunque se pueden generar presiones hidráulicas en las fracturas.

3.5 *Estimación Preliminar de Volúmenes de Drenaje*

En base de los conceptos anteriormente mencionados, no se considera el área del yacimiento un acuífero⁶ sino más bien una formación rocosa saturada. La formula Dupuit permite una primera estimación del volumen de drenaje:

$$Q = \Pi K \frac{h_1^2 - h_w^2}{\ln(r_1/r_w)}$$

Donde

- Q: volumen de bombeo (m³/s)
- K: conductividad hidráulica (m/s)
- h₁: carga hidráulica estable a distancia r₁ (m)
- h_w: carga hidráulica estable en el pozo de bombeo (m)
- r₁: distancia entre mina y piezómetro (m)
- r_w: radio del pozo de bombeo (m)

Los resultados están resumidos en Tabla 3.2 y Figura 3.3.

⁶ La definición de acuífero es variable, dependiendo del autor. Artois propone la descripción mas respetada, tal como fue usada por Driscoll (Driscoll 1986), Fetter (Fetter 1994), Price (Price 1994), etc.: “Un acuífero es una formación geológica que mantiene un volumen de agua suficientemente alta para su uso beneficioso y económico como recurso hídrico extraíble a través de pozos de bombeo”.

Tabla 3-2 Estimación de Volúmenes de Drenaje

Depresión (m)	Valor Mínimo (L/s)	Valor Máximo (L/s)	Mejor Estimación (L/s)
0	0	0	0
50	3	31	11
100	4	41	14
150	4	47	15
200	4	47	15

Volumen de drenaje calculado en base de la formula Dupuit.

En base de un rango de permeabilidades regionales⁷ de 10^{-8} a 10^{-7} m/s, se concluye lo siguiente:

- Al profundizar las labores, se espera un aumento en las filtraciones de agua subterránea. En base de la mejor estimación, se anticipa un aumento desde 0 a 15 L/s, debido al continuo drenaje de agua almacenada en las fracturas;
- Cabe mencionar que los valores extremos varían entre 4 L/s (baja permeabilidad) y 47 L/s (alta permeabilidad). Estos altos caudales podrían ocurrir en lugares puntuales (Ej. al interceptar una zona de falla) pero, probablemente, no se sostendrán a lo largo del tiempo.

La ecuación Dupuit no considera las condiciones de borde (es decir: asume una formación hidrogeológica infinita) y puede sobreestimar el flujo a largo plazo. Tomando en cuenta la limitada recarga que acaece la zona, eventualmente, las infiltraciones tendrán a disminuir a valores del orden de 1 L/s (método de cálculo: balance de agua, Sección 3.1). El comportamiento del flujo natural hacia el rajo esta presentado, en forma conceptual, en Figura 3.3 (línea roja).

Se espera mejorar la estimación de los volúmenes de drenaje a través de pruebas de permeabilidad *"in-situ"* (Ej.: pruebas de bombeo o *"air-lift"*).

⁷ Tal como fue explicado anteriormente, debido al mapeo de zonas fracturadas, existe una tendencia de sobreestimar la permeabilidad del macizo rocoso. Se anticipa una permeabilidad regional menor a lo que fue observado en base de las características geotécnicas.

4 MÉTODOS PRELIMINARES PARA EL CONTROL DE AGUA

La alta tasa de evaporación y la actividad minera (retiro del mineral saturado) actuarán para reducir el impacto de agua dentro del rajo. Sin embargo, en lugares puntuales, puede ser beneficioso de deprimir los niveles de agua.

A continuación, se presentan las interferencias que podrían causar las supuestas condiciones hidrogeológicas en la planificación, la explotación y el cierre del proyecto Cerro Negro Norte. Se incluye una serie de contingencias conceptuales para disminuir el impacto.

4.1 Posibles Interferencias con la Operación Minera

4.1.1 Impactos durante la Planificación y Construcción

Debido a la presencia de aguas subterráneas en el área del proyecto se requiere establecer las condiciones hidrogeológicas de línea base y el marco legal de las pertenencias de las aguas subterráneas⁸.

Este informe es el primer documento que resume las condiciones hidrogeológicas actuales en el área del rajo. Sin embargo, en forma general, también se requiere una evaluación de las condiciones aguas arriba y aguas abajo del área del proyecto (incluyendo los sectores de la planta, los botaderos y el tranque de relave). Es crítico incluir un análisis hidro-químico para todas las áreas del proyecto.

4.1.2 Impactos durante la Operación

La presencia de agua subterránea a los niveles de 1000 a 1200 msnm, causará los siguientes impactos durante la operación:

⁸ En relación a agua subterránea, el Código de Agua indica lo siguiente: “Corresponde a los dueños de las pertenencias mineras, dentro de ellas, el derecho de aprovechamiento de las aguas halladas en sus labores mientras que conservan el dominio de sus pertenencias en la medida necesaria para su respectiva explotación”.

- Excavación de material húmedo: Bajo el nivel de agua, la roca será parcialmente o totalmente saturada. Se estima que alrededor de 30 a 50% de los recursos de hierro se ubican bajo el nivel piezométrico, la cual afectaría principalmente el uso de los explosivos y el método de tronar.
- Transporte y tratamiento de material húmedo: Bajo el nivel de agua, aumenta la humedad de la roca, entregando parte del agua intersticial a la planta de proceso. En base de los resultados de porosidad entregado por CMP (CMP 2007), se estima un volumen promedio de agua de 0.001 m³ (1 L) por tonelada de material mineralizado “*in-situ*” (ver Anexo A). Sin embargo, la alta tasa de evaporación y la manipulación del material tenderán a bajar la humedad antes de la llegada a la planta⁹.
- Estabilidad: Bajo el nivel de agua, aumenta gradualmente la presión de poros que, sin ser drenado, podría causar deslizamientos y derrumbes. Estas condiciones, aunque no necesariamente son visibles en la cara de la pared debido a la alta tasa de evaporación, debieran ser incorporados en el análisis geotécnico;
- Abastecimiento: En base de una primera estimación, el volumen de agua subterránea extraído puede ser usado en el proceso minero (120 a 150 L/s). No obstante, será un aporte relativamente menor, probablemente no superando los 10% del volumen total requerido.

4.1.3 Consideraciones para el Plan de Cierre

La presencia de agua subterránea puede complicar las condiciones de cierre. Generalmente, se anticipa dos impactos importantes:

- El cambio físico causado en el régimen hidrogeológico: Debido a la evacuación de agua subterránea, se deprime los niveles de agua resultando en un cambio temporal o permanente en la dirección de flujo de agua subterránea. Aunque no necesariamente se produce las mismas condiciones que la mina Cerro Imán (ubicada 20 km al sur-oeste del proyecto, ver Figura 4.1), en este momento no

⁹ Para la ingeniería básica y el diseño preliminar de la planta, se recomienda usar los valores de humedad medidos en otras faenas de CMP (Por ejemplo: Romeral).

se puede desatender el efecto de una inundación parcial del rajo y la formación, a largo plazo, de un lago (“*pit lake*”);

- El cambio químico causado en el régimen hidrogeológico: Se esperan cambios debido a la infiltración de aguas y la movilización de sales en el subsuelo, (Ej. asociadas con el tranque de relave), la exposición de minerales, la formación de un lago y la concentración de sales en el agua debido a la evaporación, etc...

A continuación, se presentan los conceptos generales de drenaje para guiar el trabajo a realizar durante los próximos meses.

4.2 Drenes Sub-Horizontales

La mina actuará como un pozo regional, interceptando aguas naturales y/o industriales que se canalizan a través de las fracturas principales.

Bajo estas circunstancias, la instalación de drenes sub-horizontales podría ser una opción factible para drenar la roca y bajar la presión tras las paredes de los taludes. Específicamente, las estructuras N.E con un manto sub-vertical parecen generar condiciones favorables para la intercepción de agua a través de este método de drenaje.

Es un drenaje pasivo y la eficiencia de desagüe dependerá de las distancias entre las estructuras verticales, la permeabilidad de la roca y la presión de agua. Estas características debieran ser confirmadas con pruebas in-situ de permeabilidad (Ej. pruebas de Lugeon Modificado). El área de investigación se concentrará en todos los sectores, pero principalmente en los lados este y oeste del rajo (ver Figura 4.2).

4.3 Pozos de Bombeo

Contrario a los drenes sub-horizontales, un pozo de bombeo constituye un método activo para controlar las filtraciones en la mina, interceptando el agua antes que se presente en la excavación. A través de los pozos, se mantiene un caudal de bombeo más estable que permite una mejor planificación y manejo de aguas. La eficiencia del desagüe depende principalmente de la profundidad de los niveles de agua y la permeabilidad de la roca.

Las intersecciones de las estructuras principales, específicamente asociadas con los lineamientos W.N.W., parecen generar condiciones favorables para la aplicación de este método de drenaje. No obstante, la profundidad del nivel de agua (<100 m) y el limitado volumen de agua esperada por pozo, podría ser un factor limitante en su aplicación. El área de investigación se concentrará en los sectores Veta Central y Beduino (ver Figura 4.2).

4.4 Circuito de Drenaje

Debido a las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas, no existe la necesidad de mantener un circuito permanente de drenaje de agua superficial y subterránea durante la fase inicial de la explotación (menos de 100 m de profundidad).

Además, se asume que un circuito de evacuación de aguas no será necesario si los volúmenes de drenaje se mantienen por debajo o dentro el rango estimado de 1 a 15 L/s ya que la evaporación desde el rajo ampliamente superaría el volumen entrante.

Sin embargo, bajo el nivel de 1200 msnm en el sector Veta Central y 1100 msnm en los sectores Augusta y Beduino, podría ser beneficioso la instalación de un circuito de drenaje (Ej: red de tuberías de HDPE) para el aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos. En forma conceptual, se anticipa que este circuito de drenaje unirá los drenes subhorizontales que reducen la presión de poros y aquel pozo de bombeo dentro o fuera del perímetro del rajo.

5 RECOMENDACIONES

Se presenta una serie de recomendaciones para implementar durante el año 2007. Dependiendo de los resultados obtenidos en cada etapa del trabajo, se ajustará el plan de acción y las tareas pendientes.

5.1 *Plan de Captación de Datos Hidrogeológicos*

A corto plazo (durante el año 2007), se recomienda iniciar un programa de monitoreo y pruebas hidrogeológicas autónomas.

Actualmente existen pozos de observación que pueden ser habilitados como puntos de monitoreo, instalando tubería de 2" de PVC ranurados en los 18 m más profundos. Se recomienda iniciar el programa de habilitación en los 13 sondajes identificados en el Anexo A.

En el mediano plazo, esta red de monitoreo inicial debería ser ampliada a todas las áreas involucradas en la operación (Ej. área rajo, botaderos, planta, tranque de relave) además de las áreas aguas arriba y aguas abajo de las instalaciones. Así Cerro Negro Norte contará con una red de monitoreo y muestreo de agua para propósitos legales, ambientales y operacionales.

Durante la siguiente campaña de perforación diamantina, o en los sondajes geotécnicos recientemente perforados, se recomienda incluir pruebas "*in-situ*" de permeabilidad con sistema "*packer*" (tipo Lugeon Mejorado). Los procedimientos están resumidos en Anexo C.

Además, se recomienda perforar pozos verticales de observación (para medir niveles y la calidad de agua) usando el método de aire reverso (4 o 6" diámetro). Durante la perforación, se realizará pruebas de "*air-lift*" para cuantificar los volúmenes de agua subterránea interceptada. Los procedimientos están resumidos en Anexo D. Los pozos

de observación, y una selección de los sondajes de exploración, se completarán como puntos de monitoreo fijos.

En base de los resultados obtenidos en las pruebas de “*air-lift*”, se evaluará la necesidad de perforar pozos de bombeo para mejorar el modelo conceptual y averiguar el potencial de este método de drenaje.

5.2 Documentación y Registros

El objetivo de este análisis hidrogeológico es aportar información al estudio de ingeniería de detalle previsto para final del año 2007.

En base de los datos recogidos, se definirá un modelo hidrogeológico conceptual más elaborado, reduciendo el rango de las variables. Además, el nuevo modelo abarcará el área de la mina, las instalaciones y sus alrededores, identificando las condiciones de borde que controlan el flujo a largo plazo.

Específicamente, se intentará definir con mayor detalle la línea base hidrogeológica (niveles y calidad de agua antes de la intervención minera), las condiciones de operación (necesidad de drenaje, circuito de evacuación, impacto en la operación) y las condiciones de cierre (impactos físicos y químicos a largo plazo).

Debido a requerimientos internos y/o externos (Ej. CONAMA), podría ser necesario convertir el modelo conceptual en un modelo computacional. El tipo de modelo dependerá del objetivo final.

5.3 Cronograma del Plan de Trabajo

Se presenta un cronograma en Tabla 5.1 (carta gantt) que identifica las tareas principales y los plazos recomendados.

Tabla 5-1 Plan de Acción: Programa Hidrogeológico año 2007

Actividad	2007											
	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Estudio Preliminar												
• Medición Niveles Agua												
• Análisis												
Campaña Hidrogeológica												
• Medición Niveles Agua												
• Perforación y Pruebas ⁽¹⁾												
• Análisis Preliminar ⁽²⁾												
• Monitoreo y Muestreo												
Análisis y Diseño												
• Información para Línea Base												
• Revisión Modelo Conceptual												
• Plan Manejo de Agua												

1. El periodo de perforación es de 2 meses, lo cual se alargará a 4 meses si se perforan los pozos de bombeo (estimación);
2. Se requiere un análisis preliminar después de la instalación de los pozos de observación para evaluar la necesidad de los pozos de bombeo.

6 CONCLUSIONES

Los niveles de agua observados en los sondajes de exploración constituyen los únicos datos hidrogeológicos medidos hasta el momento en el área del proyecto Cerro Negro Norte.

En base de las características geotécnicas y los datos meteorológicos, se logró establecer una serie de conceptos hidrogeológicos preliminares para el área de la mina los cuales se resumen a continuación:

- El nivel del agua subterránea se encuentra generalmente a unos 100 m bajo la superficie y corresponde a un nivel piezométrico de entre 1000 y 1200 msnm. Eso significa que alrededor de 30 a 50% de los recursos mineros se encuentran bajo el nivel de agua.
- Las rocas ígneas y metamórficas son generalmente de baja permeabilidad. El flujo de agua subterránea ocurre a través de fracturas y diaclasas, especialmente aquellos sin relleno arcilloso. Se anticipa un flujo hacia el sur y sur-este bajo un gradiente hidráulico de 10%.
- Se asume que la baja permeabilidad mantendrá un limitado aporte de agua subterránea hacia la excavación, variando entre 1 a 15 L/s. La alta tasa de evaporación y la operación minera reducirán el volumen dentro del rajo. Sin embargo, en lugares puntuales, el nivel de agua podría causar complicaciones en la operación de la mina, principalmente afectando la estabilidad de los taludes (presión de poros) bajo 1000 a 1200 msnm.

Para propósitos legales, ambientales y operacionales, Cerro Negro Norte debiera contar con una red de monitoreo y muestreo de agua, operando a la brevedad.

ARTOIS CONSULTING LIMITADA



Jan J. Van Hooydonck
Consultor Hidrogeólogo (M.Sc., C.Geol., F.G.S.)

7 REFERENCIAS

- Artois Consulting, Minera Michilla: Revisión de Antecedentes Hidrogeológicos, Informe Final (Octubre 2006).
- CAP, Primer Encuentro de Inversionistas Chile, Presentación Powerpoint preparado por Jaime Charles C., Gerente General (Abril 2006).
- CMP, Zonificación textural en Mineralización de Hierro, Cerro Negro Norte, Comuna Copiapó, Provincia de Copiapó, III Región, elaborado por J. Villagran y M. Gómez, Informe Interno (Octubre 2006).
- Driscoll F.G., Groundwater and Wells, 2nd edition, 1986.
- Golder Associates, Diagnóstico de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Copiapó y Proposición de un Modelo de Explotación Sustentable, Informe Final (Junio 2006).
- Fetter C.W., Applied Hydrogeology, 3rd edition, 1994.
- Hoek E. and Bray J.W., Rock Slope Engineering, Revised 3rd Edition, 1981.
- Ingeroc, Mapeo de celdas geotécnicas, Hoja de Cálculo (Octubre 2006).
- Price M., Introducing Groundwater, 4th edition, 1994.

FIGURAS



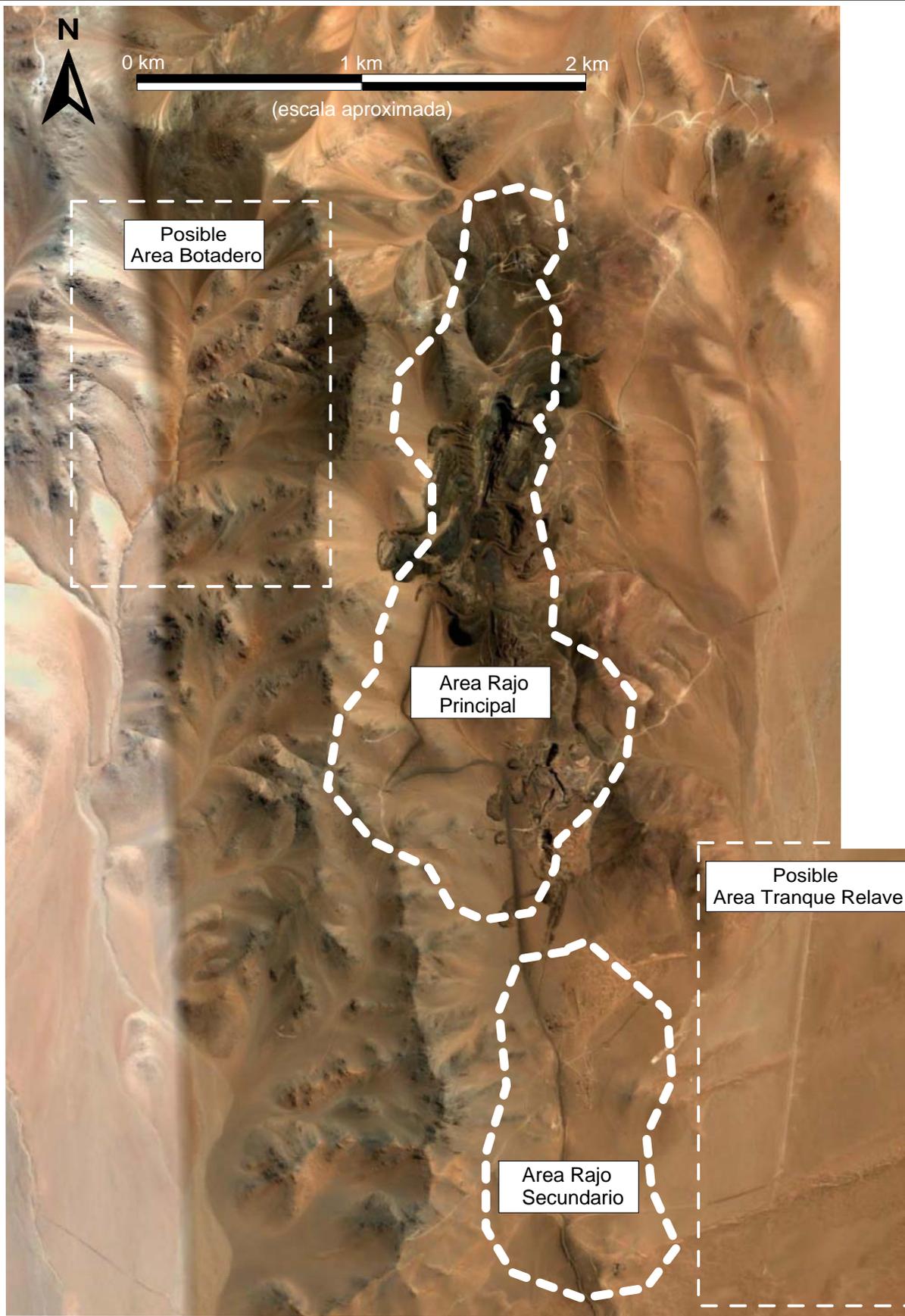
Cerro Negro Norte: Plano de Ubicacion



Cerro Negro Norte: Evaluacion Hidrogeologica

Proyecto No. 210.01.07

Figura No.: 1.1



Cerro Negro Norte: Plano de Infraestructura (preliminar)



Cerro Negro Norte: Evaluacion Hidrogeologica

Proyecto No.: 210.01.07

Figura No.: 2.1

7003000

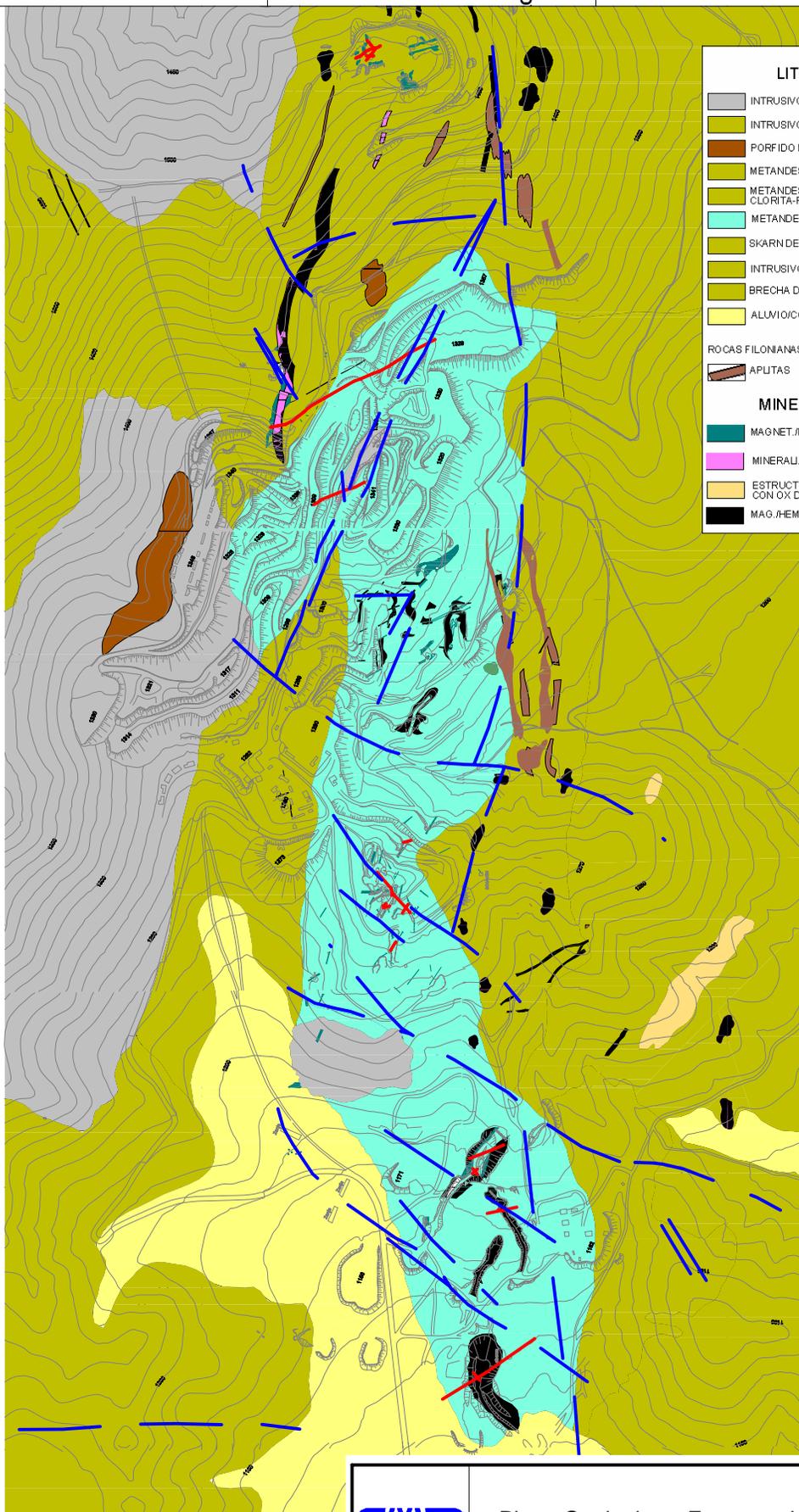
7002500

7002000

7001500

7001000

7000500



LITOLOGIA	
[Grey Box]	INTRUSIVO DIORITICO
[Light Green Box]	INTRUSIVO GRANODIORITICO-TONALITICO
[Brown Box]	PORFIDO MONZONITICO
[Yellow-Green Box]	METANDESITA DE FELDSPATO-ACTINOLITA-CUARZ
[Light Green Box]	METANDESITA SILICIFICADA CON ACTINOLITA CLORITA-FELDSPATO
[Cyan Box]	METANDESITA DE ACTINOLITA-FELDSPATO
[Light Green Box]	SKARN DE ANFIBOLITA
[Light Green Box]	INTRUSIVO MICRODIORITICO
[Yellow-Green Box]	BRECHA DE TURMALINA
[Light Yellow Box]	ALUMIO/COLUVIO
ROCAS FILONIANAS	
[Brown Box]	APLITAS
MINERALIZACION	
[Dark Green Box]	MAGNET./HEMAT. -CUERPOS LENTICULARES Y VETA
[Pink Box]	MINERALIZACION DE HIERRO CON GANGA DE SILICI
[Orange Box]	ESTRUCTURA LIMONITA,HEMATITA,SILICE Y CALCIT CON OX DE CU EN FRACTURA
[Black Box]	MAG./HEMAT. EN VETILLAS Y DISEMINADA

N 7002000
N 7001800
N 7001200
7000800

366000

366500



Plano Geologico y Estructural



Cerro Negro Norte: Evaluacion Hidrogeologica

Proyecto No.: 210.01.07

Figura No.: 2.3

7003000

7002500

7002000

7001500

7001000

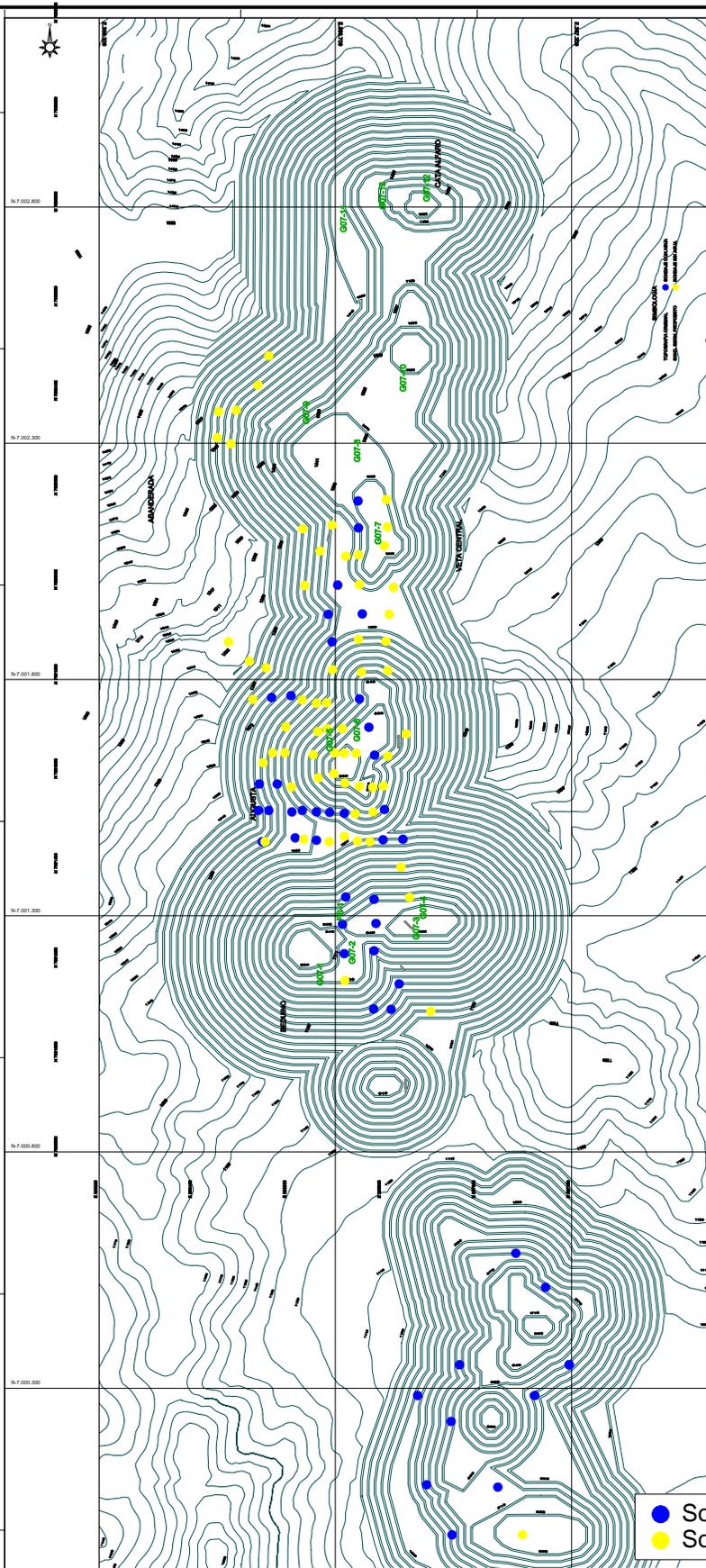
7000500

7000000

6999500

366000

366500



- Sondajes CON presencia de agua
- Sondaje SIN presencia de agua



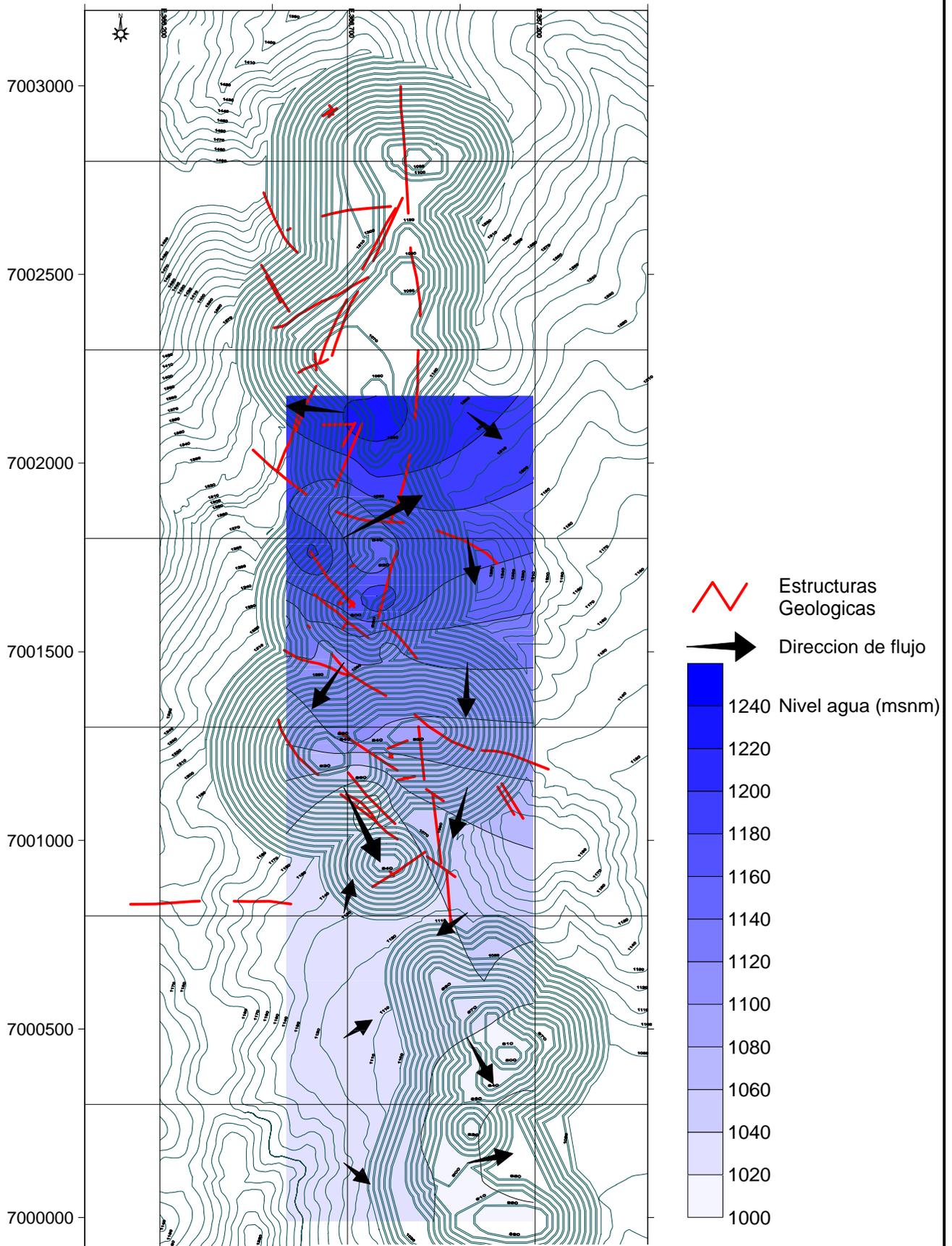
Sondajes con / sin registros de Agua



Cerro Negro Norte: Evaluacion Hidrogeologica

Proyecto No.: 210.01.07

Figura No.: 2.4



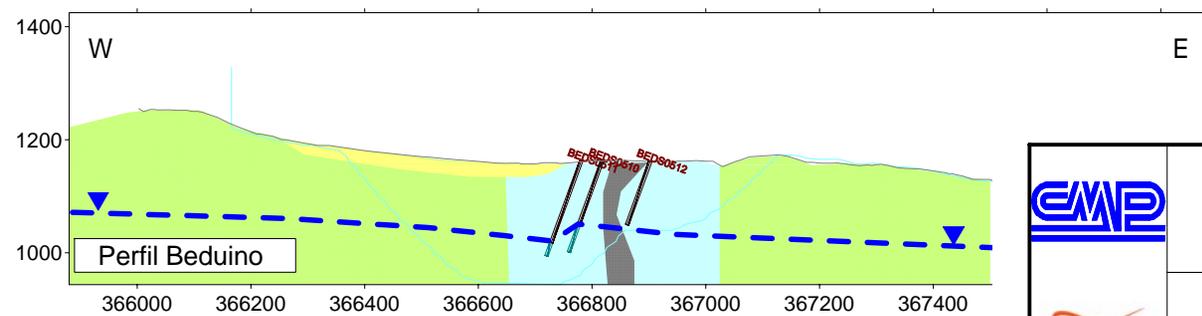
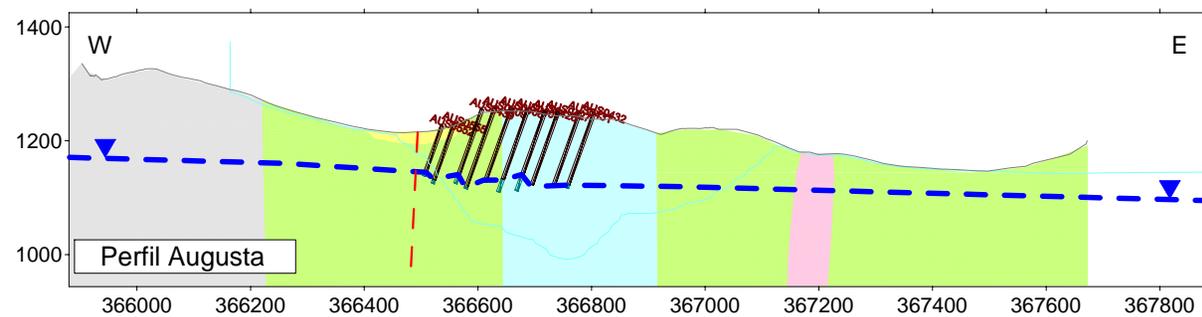
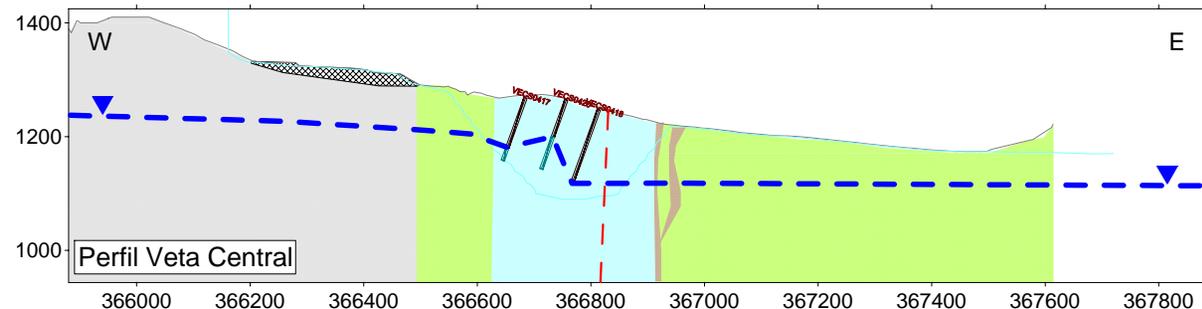
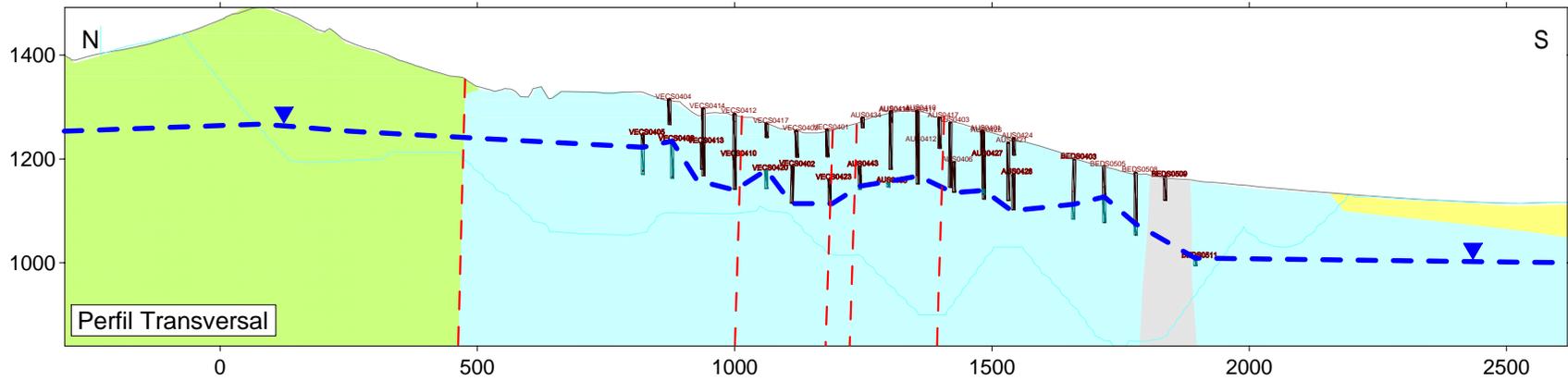
Plano Piezometrico



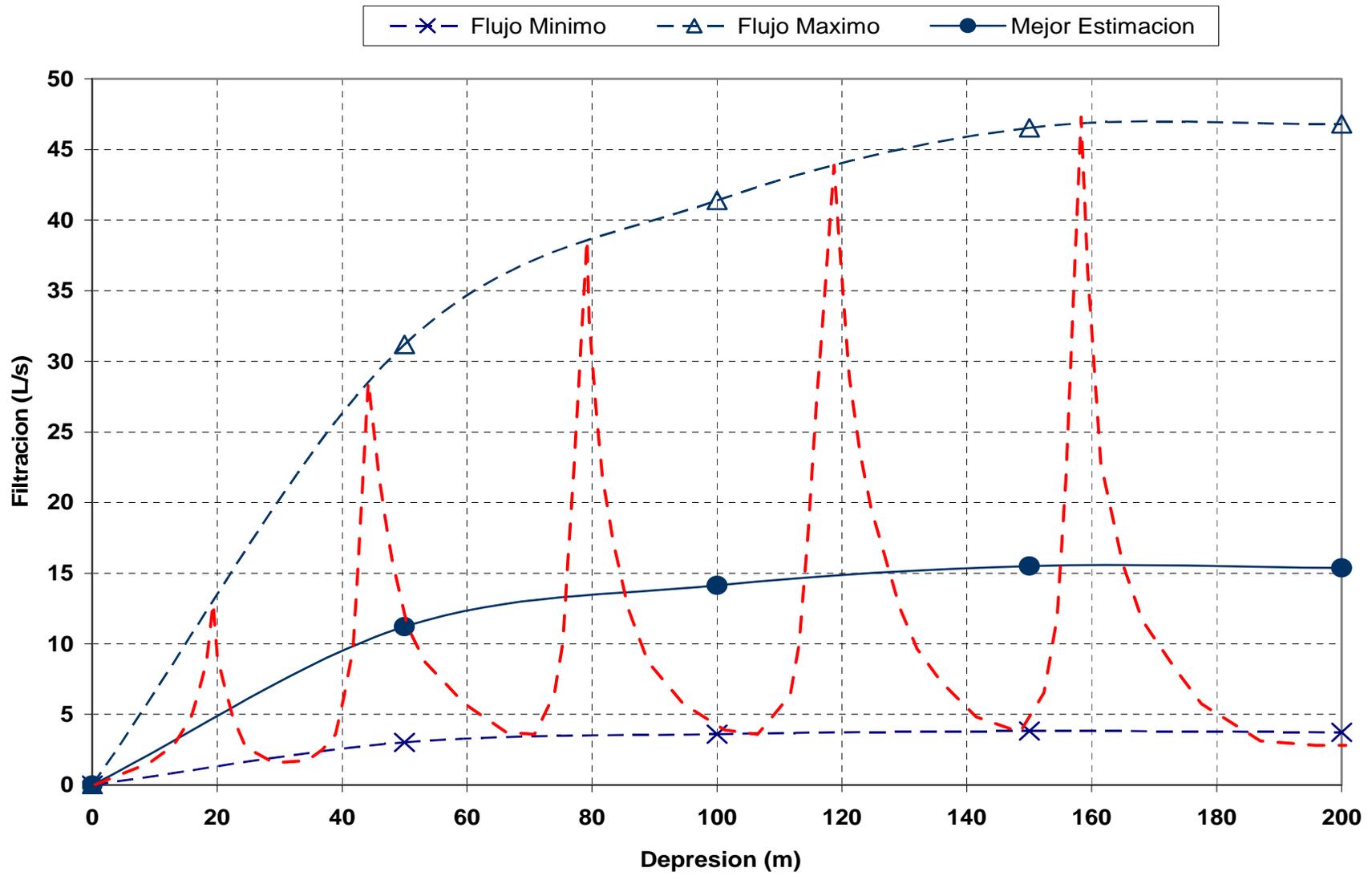
Cerro Negro Norte: Evaluacion Hidrogeologica

Proyecto No.: 210.01.07

Figura No.: 3.1



Infiltración de Agua Subterránea (Dupuit)



Nota:
Curva roja presenta el comportamiento conceptual de flujo hacia el rajo sin sistema de drenaje.



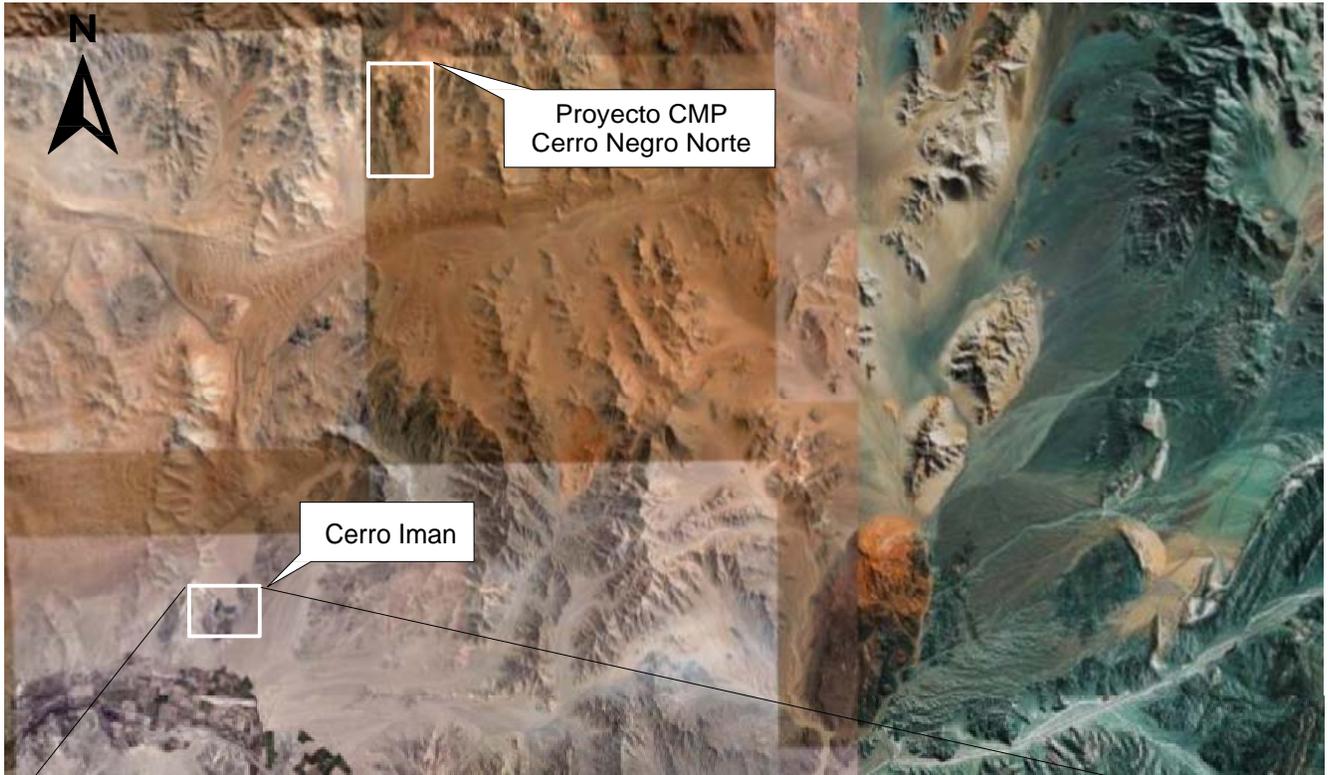
Estimacion Preliminar de Volumenes de Drenaje



Cerro Negro Norte: Evaluacion Hidrogeologica

Proyecto No. 210.01.07

Figura No.: 3.3



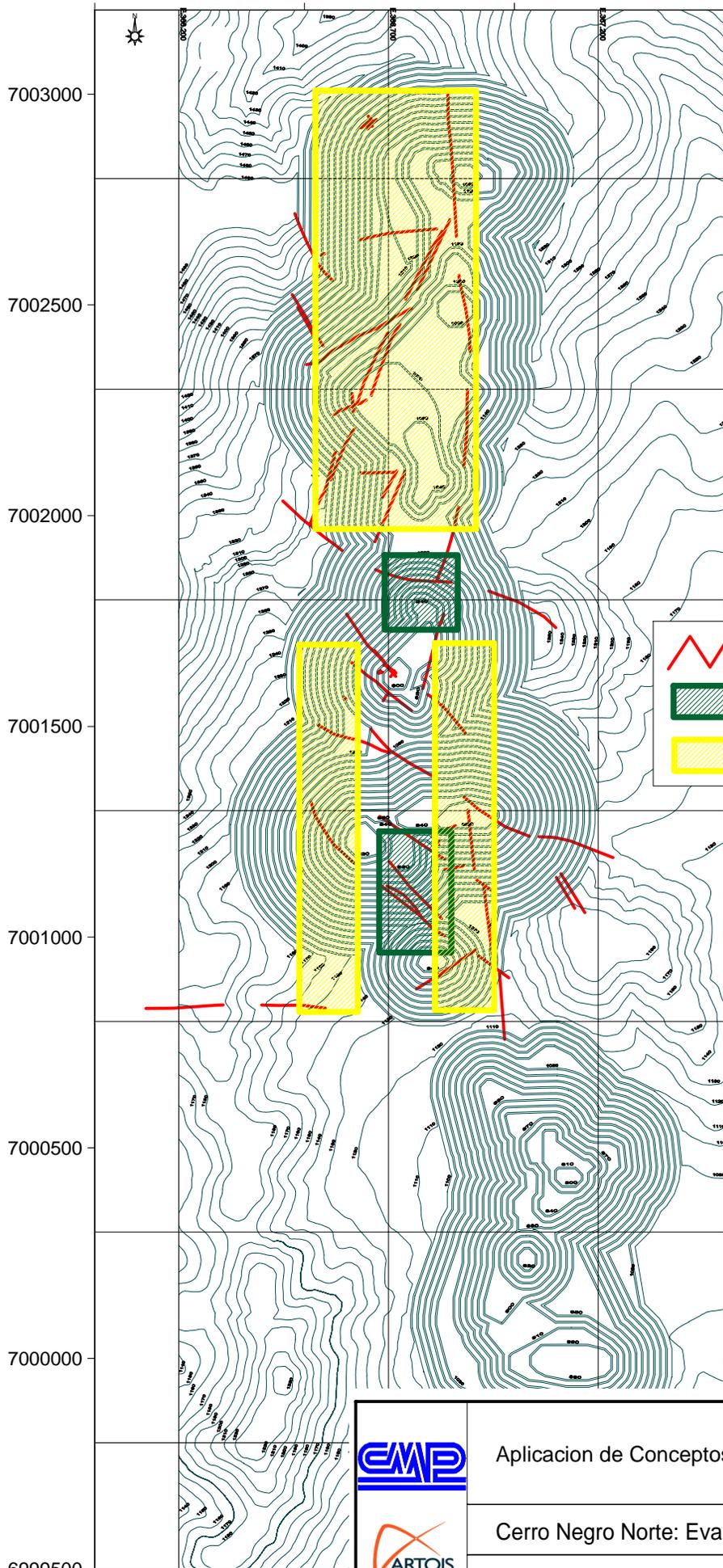
Condiciones de Cierre: Ejemplo Cerro Iman



Cerro Negro Norte: Evaluacion Hidrogeologica

Proyecto No.: 210.01.07

Figura No.: 4.1



-  Estructuras Geologicas
-  Area posiblemente apto para pozos de bombeo.
-  Area posiblemente apto para drenes sub-horizontales.



Aplicacion de Conceptos de Drenaje



Cerro Negro Norte: Evaluacion Hidrogeologica

Proyecto No.: 210.01.07

Figura No.: 4.2

6999500
366000

366500

ANEXO A

Datos Geotécnicos (RQD y porosidad)

Estimacion de permeabilidad en base de datos geotecnicos

$$K = \frac{g \times E^3}{12 \times A \times B}$$

- g acceleration due to gravity
- E average aperture
- A cinematic viscosity
- B average fracture or joint spacing
- K permeability in the direction of a set of smooth parallel joints in a rock mass.

(from Hoek and Bray: Rock Slope Engineering, Third revision, 1981)

Datos Geotecnicos Medidos en Terreno (Ingedroc 2006)

Datos Interpretados por Artois

Celda	Sector	Coordenadas		RQD	GSI	RMR	FF	Espesor	Litologia	Intervalos (B)	Espesor (E)		Visco. C. (A)	K	
		Norte	Este								cm	cm			
C-1	Beduino	7000920.6	366821.5	90.25	60	66	7.5	0.200	Andesita	13.3	0.02	981	0.0101	0.0049	5E-05
C-2	Beduino	7000941.6	366822.3	90.25	66	66	2.5	0.200	Andesita	40.0	0.02	981	0.0101	0.0016	2E-05
C-3A	Beduino	7001110.6	366895.4	55.6	45	51	6.0	0.050	Andesita	16.7	0.005	981	0.0101	0.0001	6E-07
C-3	Beduino	7001217.9	366804.0	100	38	51	0.0		Andesita	1000.0	0.01	981	0.0101	0.0000	8E-08
C-7	Beduino	7001195.8	366779.0	82	45	52	3.3	0.001	Andesita	30.0	0.0001	981	0.0101	0.0000	3E-12
				83.62			3.9								2E-07 geomean
C-4A	Beduino	7001168.3	366860.9	22.6	38	45	14.0	0.250	Andesita+Fe masivo	7.1	0.025	981	0.0101	0.0177	2E-04
C-4	Beduino	7001226.6	366820.4	93.55	45	49	6.5	0.250	Andesita+Fe masivo	15.4	0.025	981	0.0101	0.0082	8E-05
C-5	Beduino	7001255.2	366839.6	96.85	60	67	2.8	0.300	Andesita+Fe masivo	36.4	0.03	981	0.0101	0.0060	6E-05
C-6	Beduino	7001207.9	366791.1	91.9	48	55	2.3		Andesita+Fe masivo	42.9	0.01	981	0.0101	0.0002	2E-06
				76.225			6.4								4E-05 geomean
C-11	Augusta	7001563.5	366693.4	88.6	45	51	2.7	0.200	Andesita	37.5	0.02	981	0.0101	0.0017	2E-05
															2E-05 geomean
C-8	Augusta	7001563.6	366693.4	88.6	60	66	2.7	0.100	Andesita+Fe masivo	37.5	0.01	981	0.0101	0.0002	2E-06
C-9	Augusta	7001625.2	366682.5	100	65	71	3.0	0.270	Andesita+Fe masivo	33.3	0.027	981	0.0101	0.0048	5E-05
C-10	Augusta	7001645.9	366695.1	98.5	45	51	2.5	0.270	Andesita+Fe masivo	40.0	0.027	981	0.0101	0.0040	4E-05
C-12	Augusta	7001614.5	366713.9	100	38	43	0.3	1.500	Andesita+Fe masivo	400.0	0.15	981	0.0101	0.0683	7E-04
C-13	Augusta	7001728.0	366714.9	49	38	45	10.0	0.200	Andesita+Fe masivo	10.0	0.02	981	0.0101	0.0065	6E-05
C-26	Augusta	7001628.7	366672.6	95.2	55	61	3.0	0.100	Andesita+Fe masivo	33.3	0.01	981	0.0101	0.0002	2E-06
				88.55			3.7								3E-05 geomean
C-14	Abanderada	7002429.1	366637.2	91.9	65	70	3.5	1.000	Fe masivo	28.6	0.1	981	0.0101	0.2833	3E-03
C-15	Abanderada	7002414.9	366650.4	85.3	65	70	3.0		Fe masivo	33.3	0.005	981	0.0101	0.0000	3E-07
C-16	Abanderada	7002342.1	366636.4	95.2	65	71	3.0		Fe masivo	33.3	0.005	981	0.0101	0.0000	3E-07
C-17	Abanderada	7002348.4	366634.4	85.3	50	58	4.5		Fe masivo	22.2	0.005	981	0.0101	0.0000	5E-07
C-18	Abanderada	7002338.9	366636.6	98.5	45	53	5.0	0.300	Fe masivo	20.0	0.03	981	0.0101	0.0109	1E-04
				91.24			3.8								7E-06 geomean
C-19	Abanderada	7002296.5	366613.3	85.3	45	53	3.0		Andesita+Fe masivo	33.3	0.01	981	0.0101	0.0002	2E-06
															2E-06 geomean
C-20	Abanderada	7002252.3	366597.1	88.6	45	52	4.0	0.200	Diorita	25.0	0.02	981	0.0101	0.0026	3E-05
C-21	Abanderada	7002167.6	366574.9	65.5	45	51	3.0	0.050	Diorita	33.3	0.005	981	0.0101	0.0000	3E-07
				77.05			3.5								3E-06 geomean
C-22	Cata Alfaro	7002950.9	366652.7	88.6	55	59	2.0	0.100	Skam+Fe masivo	50.0	0.01	981	0.0101	0.0002	2E-06
C-23	Cata Alfaro	7002936.3	366753.6	62.2	55	63	2.5		Skam+Fe masivo	40.0	0.01	981	0.0101	0.0002	2E-06
C-24	Cata Alfaro	7002872.6	366718.7	62.2	45	52	5.3	0.050	Skam+Fe masivo	18.8	0.005	981	0.0101	0.0001	5E-07
				71			3.3								1E-06 geomean
															5E-06

Datos entregados por CMP (laboratorio)

Unidad Geologica	Densidad Geometrica			n		
	(ton/m3)			(%)		
	max.	min.	prom.	max.	min.	prom.
Brecha de Fierro	3.84	3.22	3.62	0.55	0.34	0.40
Fierro Macizo	4.97	4.48	4.89	0.76	0.13	0.30
Meta-Andesita	3.39	3.04	3.11	0.61	0.32	0.50
Skarn	3.04	2.62	2.81	11.31	2.05	3.46
Diorita	2.75	2.68	2.70	2.74	0.75	2.28

Datos interpretados por Artois

humedad "in-situ"			humedad "in-situ"		humedad "in-situ"	
m3/ton	L/ton		m3/ton	L/ton	m3/ton	L/ton
prom.	prom.		max.	max.	min.	min.
0.001	1.1		0.001	1.4	0.001	1.1
0.001	0.6		0.002	1.5	0.000	0.3
0.002	1.6		0.002	1.8	0.001	1.1
0.012	12.3		0.037	37.2	0.008	7.8
0.008	8.4		0.010	10.0	0.003	2.8

ANEXO B

Niveles de Agua en Sondajes de Exploración

BHID	E	N	Elev (msnm)	Azimut	Inclinacion	Largo (m)	Prof. Agua (m)	Nivel Agua (msnm)	Medicion Enero 2007	Apto para monitoreo
BEDS - 0401	366839	7001403	1215			141			Tapado a 2 m	
BEDS - 0402	366857	7001339	1204			123			89.01	Si, pero parcialmente bloqueado.
BEDS - 0403	366722	7001340	1200	273.65	70	123	93	1107		
BEDS - 0404	366782	7001335	1191	270.3	70	141	86	1105		
BEDS - 0405	366715	7001282	1186	268.711	70	141	63	1123		
BEDS - 0406	366786	7001284	1185	268.15	70	141	87	1098		
BEDS - 0407	366782	7001226	1176	269.84	70	141	99	1077		
BEDS - 0408	366719	7001220	1174	270.512	70	147	105	1069		
BEDS - 0410	366818	7001102	1163	269.87	70	172	117	1046		
BEDS - 0411	366781	7001103	1163	271.39	70	179	154	1009		
BEDS - 0413	366835	7001156	1172	266.98	70	129	110	1062		
BEDS-0505									51.62	Si, pero nivel de agua afectado por sondaje geotecnico.
BEDS-0506									87.46	Si
BEDS-0507									Tapado a 3 m	No
BEDS-0508									Tapado a 1 m	No
AUS - 0401	366688	7001519	1254	271.47	70	153	129	1125		
AUS - 0404	366783	7001640	1277	272.52	70	139	70	1207		
AUS - 0408	366660	7001520	1257	272.38	70	138	135	1122		
AUS - 0409	366630	7001523	1257	269.75	70	150	148	1109		
AUS - 0415	366630	7001757	1280			93			93.3	No, porque agua coincide con fondo del sondaje.
AUS - 0416	366660	7001750	1280			98			98	No, porque agua coincide con fondo del sondaje.
AUS - 0419	366606	7001766	1281	270	70	136	70	1211		
AUS - 0420	366660	7001460	1243	270	70	135	129	1114	97.72	Si, pero obstruccion parcial a 35 m.
AUS - 0422	366615	7001465	1242	270	70	147	123	1119	Tapado a 1 m	No
AUS - 0423	366633	7001462	1243			147			100.75	No, porque hay aceite al fondo del sondaje.
AUS - 0425	366843	7001462	1228	270	70	129	111	1117		
AUS - 0426	366719	7001517	1251	268.7	70	148	117	1134		
AUS - 0429	366773	7001457	1224			128			90.77	Si
AUS - 0430	366801	7001461	1222	270.48	70	147	101	1121	Tapado a 10 m	No, pero hay agua al fondo.
AUS - 0432	366804	7001525	1249	269.74	70	140	134	1115		
AUS - 0435	366771	7001699	1281	273.14	70	144	120	1161		
AUS - 0437	366565	7001762	1281	269.8258	70	114	96	1185	93	No, porque hay barro al fondo del sondaje.
AUS - 0439	366608	7001520	1255	269.5755	70	138	121	1134		
AUS - 0443	366751	7001759	1257	266.52	70	123	116	1141		
AUS - 0548	366547	7001624	1246			195			>150 m	No
AUS - 0549	366539	7001579	1235	271.05	70	147	124	1111		
AUS - 0550	366545	7001457	1218	269.91	70	165	115	1103	Tapado a 1 m	No
AUS - 0552	366537	7001523	1226	267.89	70	93	84	1142	80.2	Si
AUS - 0554	366577	7001579	1244	270	70	141	105	1139	Tapado a 1 m	No
AUS - 0555	366559	7001523	1230	270.17	70	112	105	1125		
VECS - 0403	366693	7001880	1254	266.954	70	135	116	1138		
VECS - 0405	366748	7002178	1309	270.1066	70	147	93	1216		
VECS - 0406	366749	7002121	1301	270.0973	70	147	63	1238		
VECS - 0412	366705	7002000	1287	270.49	70	147	93	1194		
VECS - 0413	366749	7002064	1296			123			118	No, porque hay aceite al fondo del sondaje.
VECS - 0417	366685	7001938	1268	271.77	70	117	93	1175		
VECS - 0419	366823	7001995	1258			129			Tapado a 1 m	No, tapado parcialmente a 1 m pero hay agua
VECS - 0420	366757	7001939	1265	268.86	70	129	69	1196	124-133	No, porque con aceite al fondo del sondaje.
TCLS-0401	366874	7000285	1102			270	70	1032		

BHID	E	N	Elev (msnm)	Azimut	Inclinacion	Largo (m)	Prof. Agua (m)	Nivel Agua (msnm)	Medicion Enero 2007	Apto para monitoreo
TCLS-0402	366963	7000350	1102			0	90	1012		
TCLS-0403	367195	7000350	1090			0	90	1000		
TCLS-0404	367122	7000285	1089			0	90	999		
TCLS-0405	367044	7000091	1091			0	90	1001		
TCLS-0406	366947	6999990	1088			269.78	70	1018		
TCLS-0407	366945	7000230	1096			0	90	1006		
TCLS-0408	367082	7000586	1110			90	70	1040		
TCLS-0409	367145	7000514	1098			0	90	1008		
TCLS-0410	366893	7000096	1098			268.98	70	1028		

min							63	999		
max							154	1238		
average							100	1105		

Sector	Beduino		Augusta		Veta Central		TCLS	
	m	msnm	m	msnm	m	msnm	m	msnm
min	63	1009	70	1103	63	1138	70	999
max	154	1123	148	1211	116	1238	90	1040
average	102	1077	113	1137	88	1193	82	1014

ANEXO C

Procedimientos Pruebas “In-situ” en Sondajes Geotécnicos

PRUEBAS DE PERMEABILIDAD "IN-SITU"

Método Lugeon Mejorado

En **la roca** se realizarán ensayos de inyección de agua limpia a presión, del tipo Lugeon mejorado. Estos ensayos deberán realizarse contra el fondo de la perforación, es decir, deberán ser ejecutados conjuntamente con el avance de la perforación. Se aplicará la siguiente técnica:

- Se aislará la cámara de prueba en el fondo del sondaje, por medio del empleo de un packer wireline neumático. Se podrán elegir cámaras de 3 a 5 m de longitud cada una, y las etapas de presión manométrica de inyección a emplear dependerán de la profundidad de cada cámara de ensayo;
- Si la cámara de ensayo se encuentra muy superficial, o sea a menos de 15 m, entonces la presión manométrica máxima aplicada no debe superar los 3 kg/cm²; se recomienda usar las etapas 1 - 3 - 3 - 1 kg/cm². Dicho valor podrá ser incrementado a 5 kg/cm², entre 15 y 30 m de profundidad, en cuyo caso se pueden emplear las siguientes etapas de presión: 1 - 3 - 5 - 5 - 3 - 1 kg/cm². De 30 a 50 m, se podrá incrementar a 7 kg/cm², en cuyo caso se pueden emplear las siguientes etapas de presión: 1 - 3 - 5 - 7 - 7 - 5 - 3 - 1 kg/cm². Finalmente a profundidades mayores de 50 m, se podrá incrementar a 10 kg/cm², en cuyo caso se pueden emplear las siguientes etapas de presión: 3 - 5 - 7 - 10 - 10 - 7 - 5 - 3 kg/cm²;
- El contratista deberá entregar la curva de pérdida de carga del packer neumático a emplear.

Los intervalos de los ensayos serán determinados en faena, en base de la calidad de la roca, las estructuras interceptadas y la litología perforada. Para propósitos de licitación, se asume que se llevara a cabo un ensayo cada 18 m.

ANEXO D

Procedimientos Campaña Hidrogeológica

1. PROCEDIMIENTOS DE PERFORACION

1.1 Perforación de Pozos de Observación

Los pozos de observación se perforarán usando el método de aire reverso hasta una profundidad nominal de 200 m.

Se aplicara el siguiente sistema de perforación:

- Perforar con sistema aire reverso haciendo minimzando el uso de “espuma” de perforacion; al final se hará una prueba “air lift”, a razón de 1 cada 6 m, cuando se cambia de barra;
- El diámetro del pozo deberá ser suficiente para instalar tuberías de PVC (schedule 80) de 2” de diámetro. Se sugiero un diámetro de perforacion de 4 o 6”.

Se aplicara la siguiente metodología para el mapeo geológico:

- Las muestras de cutting deberán ser guardadas en bolsas plásticas identificables el cutting de cada 2 m de avance;
- Cada 2 m de avance, se tomará una muestra debidamente lavada y guardada en cajas plásticas de “cutting” para su posterior análisis litológico y de contenido arcilloso estimado. El geólogo llevará a cabo la descripción geológica;
- Adicionalmente, se deberá llevar un registro fotográfico sistemático de cada caja de testigo, una vez que se llene con muestras y/o testigos, de la manera ya expuesta.

De acuerdo al perfil estratigráfico encontrado en el pozo, y preparado por el maestro de la perforación conjuntamente con el supervisor y principalmente el geólogo de terreno, se definirá el diseño del pozo de observación. Aquellos tramos de notoria permeabilidad serán habilitados con PVC ranurada (schedule 80, diámetro interno 2”). En el resto del pozo se colocara la tubería de PVC ciega.

Para efectos de cotización, por cada pozo de observación se debe considerar 140 m de tubería PVC ciega y 60 m de PVC ranuradas.

1.2 Perforación de Pozos de Bombeo

Los pozos de bombeo se perforarán usando el método de roto-percusión hasta una profundidad nominal de 200 m.

Se aplicara el siguiente sistema de perforación:

- Perforar con sistema roto-percusión (aire reverso) haciendo uso de lodo biodegradable o agua limpia como fluido de perforación; al final se hará una prueba “air lift”, a razón de 1 cada 6 m, cuando se cambia de barra;
- El diámetro del pozo deberá ser suficiente para instalar cribas de 8” de diámetro.

Se aplicara la siguiente metodología para el mapeo geológico:

- Las muestras de cutting deberán ser guardadas en bolsas plásticas identificables el cutting de cada 2 m de avance;
- Cada 2 m de avance, se tomará una muestra debidamente lavada y guardada en cajas plásticas de “cutting” para su posterior análisis litológico y de contenido arcilloso estimado. El geólogo llevará a cabo la descripción geológica;
- Adicionalmente, se deberá llevar un registro fotográfico sistemático de cada caja de testigo, una vez que se llene con muestras y/o testigos, de la manera ya expuesta.

De acuerdo al perfil estratigráfico encontrado en el pozo, y preparado por el maestro de la perforación conjuntamente con el supervisor y principalmente el geólogo de terreno, se definirá el diseño del pozo de bombeo. Aquellos tramos de notoria permeabilidad serán habilitados con criba inoxidable. En el resto del pozo se colocara la tubería ciega. Se estima una tubería final de 8” de diámetro. Para efectos de cotización, cada pozo de bombeo se debe habilitar en la siguiente manera:

- Instalación de una tubería ciego de 8” de diámetro desde la superficie hasta una profundidad de 140 m;
- Habilitado con criba inoxidable (8” de diámetro), ubicada en los 60 m más profundos del pozo. Se colocaran estabilizadores cada 24 m alrededor del casing para asegurar que la tubería queda vertical dentro del sondaje;

- La gravilla, consistente en gravilla filtrante inerte con tamaño 3-5 mm, se colocará en el espacio anular desde la superficie hasta 2 m de profundidad para estabilizar las paredes del pozo y permitir el fácil paso del agua subterránea. Este filtro de gravilla deberá ser colocado cuidadosa y controladamente;
- Cada pozo tendrá una tapa de sello y será completado con un sello sanitario en la superficie (un sello bentonita-cemento en el espacio anular desde la superficie hasta 2 m de profundidad). Cabe resaltar que en su exterior deberán ser protegidos por un tubo de acero con tapa rosca y candado, para seguir monitoreándolos en el futuro;
- Después de la instalación, se debe realizar una limpieza completa del pozo inyectando aire para levantar las acumulaciones de sedimentos. El desarrollo se efectuará en forma ascendente para lograr una adecuada respuesta del filtro y de la formación en torno de este. Se continuará la limpieza hasta obtener agua limpia.

2. PROCEDIMIENTOS PRUEBAS HIDROGEOLOGICAS

2.1 Pruebas de “Air-Lift”

Las pruebas de “air-lift” sirven para obtener una indicación del volumen de agua presente en el pozo. Consiste en la inyección de aire, aforando el volumen de agua saliendo del pozo. El primer ensayo se ejecutará después de haber perforado la napa freática y se repetirá cada 6 metros. Se aplicará la siguiente técnica:

- Levantar las barras de perforación para obtener una cámara de ensayo con longitud variable entre 0,5 y 2,5 m, lo cual dependerá de la potencia del estrato de roca perforado. La cámara de ensayo deberá ser perforada o lavada con agua limpia;
- Se inyectara aire lo suficiente para levantar la columna de agua, manteniendo una descarga constante por 15 minutos o hasta que el agua este sin sedimentos;
- El perforista, supervisado por el geólogo, medirá el caudal saliendo del pozo a través de un recipiente o vertedero triangular.

2.2 Pruebas de Bombeo (en pozos de bombeo).

Para efectos de cotización, se contempla la ejecución de ocho (8) ensayos de bombeo de larga duración, de 48-72 horas cada uno, con 24 horas de medición de la recuperación de la napa. Primero se realizara pruebas de caudal variables (prueba de etapa) para poder definir el caudal aproximado que se deberá emplear para el ensayo definitivo a carga constante.

Se utilizará una bomba sumergible capaz de bombear un caudal de 5 L/s a una carga hidráulica de 150 m (estimación preliminar). El agua bombeada debe ser descargada a una distancia mínima de 100 m aguas abajo desde el pozo de bombeo. El flujo de agua se debe aforar en dos formas independientes tales como:

- Flujómetro;
- Medidor de orificio circular con piezómetro;
- Vertedero triangular;
- Método volumétrico (medir el tiempo para llenar un recipiente de volumen conocido).

Las características definitivas de estos ensayos se indicaran posteriormente. Para efectos de cotización, se definirá el siguiente programa:

2.2.1 Prueba de Caudal Variable:

La finalidad de esta prueba es obtener una primera aproximación del comportamiento del pozo para poder determinar con que caudal constante se realizara la prueba de larga duración. La prueba de caudal variable se ejecutará en cuatro etapas, aumentando la tasa de bombeo con cada etapa. Se aplicará el siguiente método:

- Medición de nivel estático en el pozo completado;
- Depende de los resultados de "air-lift", el hidrogeólogo especificará una tasa de bombeo mínimo. Este caudal se mantiene constante por un periodo 60 minutos;
- Sin parar la bomba, se aumenta la tasa de bombeo de acuerdo a las especificaciones dados por el hidrogeólogo. Este caudal se mantiene constante por un periodo 60 minutos. Se repite este procedimiento cuatro veces (es decir: se aumenta el caudal en cuatro etapas, hasta alcanzar la tasa de bombeo máximo);
- Después de terminar la cuarta etapa, se deja recuperar el nivel del agua en el pozo hasta completar el 90% del nivel inicial.

El Contratista medirá el nivel de agua en el pozo durante la prueba de bombeo de acuerdo a las especificaciones entregados por el hidrogeólogo.

2.2.2 Prueba de Caudal Constante

De acuerdo con la prueba anterior se determina un gasto de bombeo fijo que debe permanecer constante todo el tiempo mientras dure el desarrollo de la prueba. Esta prueba se debe realizar con un gasto igual al 80% aproximadamente del caudal máximo aforado en la prueba de gasto variable. La prueba de caudal constante se ejecutará en la siguiente forma:

- Medición de nivel estático en el pozo;
- Dependiendo de los resultados de la prueba de caudal variable, el hidrogeólogo especificará una tasa de bombeo constante. Este caudal se mantiene constante por un periodo 48-72 horas sin parar la bomba;
- Una vez finalizada la prueba, se mide sistemáticamente la recuperación del nivel del agua en el pozo hasta completar el 90% del nivel inicial o hasta un máximo de 24 horas de medición.

El Contratista medirá el nivel de agua en el pozo durante la prueba de bombeo de acuerdo a las especificaciones entregados por el hidrogeólogo.