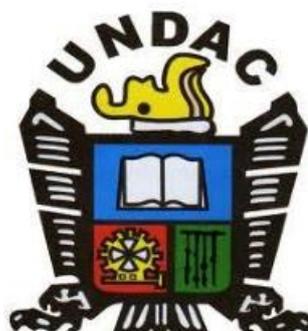


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA



T E S I S

**Caracterización hidrogeológica en la estimación del caudal de
las aguas subterráneas - Mina Maura**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Geólogo

Autor : Bach. Mariela NOLASCO IBIA

Asesor : Mg. Vidal Víctor CALSINA COLQUI

Cerro de Pasco – Perú – 2020

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA



T E S I S

**Caracterización hidrogeológica en la estimación del caudal de
las aguas subterráneas - Mina Maura**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Mg. Ramiro E. DE LA CRUZ FERRUZO
PRESIDENTE

Mg. Javier LOPEZ ALVARADO
MIEMBRO

Mg. Eder Guido ROBLES MORALES
MIEMBRO

DEDICATORIA

A Dios por las bendiciones y protección que me brinda y a mis padres por su apoyo incondicional, por sus oraciones y preocupación permanente por mi proyecto de mi vida.

RECONOCIMIENTO

Mi reconocimiento al área De Asuntos Ambientales y Geología de la Minera Raura por haberme facilitado con la información necesario para poder realizar mi trabajo de tesis “Caracterización Hidrogeológica en la Estimación del Caudal de las Aguas Subterráneas - Mina Raura”.

Así mismo agradecer a los Ingenieros Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, por sus enseñanzas y a todas las personas que me apoyaron para realizar este trabajo.

Finalmente, a mi Asesor Mg. Vidal Víctor CALCINA COLQUI, a los Jurados calificadores.

RESUMEN

La presente tesis se realiza porque en Compañía Minera Raura, en los últimos años ha ido incrementándose el caudal de las aguas subterráneas hasta volúmenes que implican una difícil gestión y generan elevados costos en el tratamiento de los efluentes

La evaluación hidrogeológica constituye una parte esencial del entendimiento que se precisa para la mejora y optimización del manejo de aguas en interior mina.

El propósito de este trabajo es determinar el comportamiento del caudal de las aguas subterráneas y su influencia en las labores subterráneas.

El incremento en el caudal de las aguas subterráneas en la unidad minera eleva el costo de producción, por lo tanto, es imprescindible cuantificarlo. Asimismo, es necesario determinar la influencia de la litología y las estructuras geológicas en el aumento del caudal en profundidad.

El incremento del caudal se produce por: Infiltración estacional (alta precipitación), “flujo en conducto” (en cársticos interconectados) e Infiltración a través de fracturas y permeabilidad del macizo rocoso.

Toda la caracterización hidrogeológica nos permitirá determinar las soluciones adecuadas para disminuir los costos.

Palabras clave: Aguas subterráneas, características hidrogeológicas

ABSTRACT

This thesis is done because in Company Minera Raura, in recent years the flow of groundwater has increased to volumes that imply difficult management and generate high costs in the treatment of effluents

Hydrogeological evaluation is an essential part of the understanding that is required for the improvement and optimization of water management in the interior mine.

The purpose of this work is to determine the behavior of the flow of groundwater and its influence on underground work.

The increase in the flow of groundwater in the mining unit raises the cost of production, therefore, it is essential to quantify it. Likewise, it is necessary to determine the influence of lithology and geological structures in increasing the depth flow.

The increase in flow is caused by: Seasonal infiltration (high precipitation), "duct flow" (in interconnected karst) and Infiltration through fractures and permeability of the rock mass.

All hydrogeological characterization will allow us to determine the appropriate solutions to reduce costs.

Keywords: Underground water, hydrogeological characteristics

INTRODUCCIÓN

El presente documento describe los trabajos realizados como parte del análisis hidrogeológico desarrollado en la Unidad Minera Raura, propiedad de la Compañía Minera Raura. Dicha evaluación hidrogeológica constituye una parte esencial del entendimiento que se precisa para la mejora y optimización del manejo de aguas en interior mina, el cual en los últimos años ha ido incrementándose hasta volúmenes que implican una difícil gestión y unos elevados costos en el tratamiento de los efluentes.

Durante la realización de los estudios se recopilaron, analizaron e integraron todos los informes técnicos antecedentes facilitados. Dicha información fue complementada con investigaciones de campo, las cuales implicaron mapeo geológico y estructural, hidrológico e hidrogeológico, mapeo de filtraciones en interior mina, perforaciones e instalación de piezómetros en interior de mina, ejecución de pruebas hidráulicas en piezómetros, muestreo de aguas superficiales y subterráneas. El conjunto de investigaciones permitió complementar y establecer una adecuada caracterización hidrogeológica, sirviendo como insumos para un modelamiento predictivo del flujo subterráneo sobre el que se validó el funcionamiento hidrodinámico actual y se basó el comportamiento futuro, bajo el esquema de labores.

A su vez, dicho entendimiento hidrogeológico se integró en contexto del balance de aguas en la UM Raura, como parte de una diagnosis preliminar para identificar oportunidades de mejora en el manejo de aguas y en el tratamiento de efluentes a futuro.

Los análisis realizados en el presente estudio incluyeron toda la información relacionada con climatología, hidrología e hidrogeología puesta a disposición por UMR. Se realizó una depuración de la información proporcionada con el fin de considerar únicamente

información que sea coherente, consistente, eliminando toda aquella información dudosa o puntual que induzca a una malinterpretación de las condiciones de comportamiento de las aguas en la zona de estudio.

La precipitación para la zona de estudio fue estimada tomando como base los registros de las estaciones meteorológicas cercanas, asimismo, se utilizó la información de la estación local. Debido a que dicha estación presentaba un periodo de registro corto, se procedió a completar dicha información con la ayuda de información satelital. Sobre la base de dichos valores se realizaron las estimaciones de recarga al medio. La precipitación anual promedio se estimó en 1122 mm.

Bajo el contexto geológico estructural existente, el funcionamiento hidrodinámico en la UM Raura es complejo, debiéndose entender que las fallas y grandes estructuras existentes son cruciales para comprender el movimiento del flujo subterráneo y el ingreso de aguas a las labores subterráneas. La mayor parte del área de estudio se compone de afloramientos rocosos los cuales son atravesados por sistemas de fracturas que se exponen en superficie y que constituyen los principales medios para la infiltración de agua y posterior alimentación al sistema de flujo subterráneo. En este sentido, algunas de las principales entradas de agua a las labores se relacionan con las trazas de las grandes estructuras (y de las zonas de debilidad que tienen asociadas), particularmente en el sector N (Gayco y Flor de Loto). Dicho flujo descargaría principalmente en fondos de valle, constituidos por depósitos de sedimentos cuaternarios, a los cuales se les asocia una mayor permeabilidad.

ÍNDICE

DEDICATORIA

RECONOCIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación y determinación del problema	1
1.2. Delimitación de la investigación	2
1.3. Formulación del problema.....	2
1.3.1 Problema general	2
1.3.2 Problemas específicos	2
1.4. Formulación de objetivos	2
1.4.1 Objetivo general	2
1.4.2 Objetivos específicos.....	2
1.5. Justificación del problema.....	3
1.6 Limitaciones	3

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio	4
------------------------------------	---

2.2. Bases teórico – científicos	5
2.3 Definición de términos básicos	28
2.4 Formulación de hipótesis.....	31
2.4.1 Hipótesis general	31
2.4.2 Hipótesis específicos	31
2.5. Identificación de las variables	31
2.5.1 Variables independientes.....	31
2.5.2 Variables dependientes	31
2.6. Definición operacional de variables e indicadores	31

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1. Tipo de investigación	32
3.2. Métodos de la investigación	32
3.3. Diseño de investigación.....	32
3.4. Población y muestra	32
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	33
3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	33
3.7. Tratamiento estadístico.....	33
3.8. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.....	33
3.9. Orientación ética.....	33

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Descripción del trabajo de campo	34
4.2 Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	47
4.3. Prueba de hipótesis	86
4..4. Discusión de resultados	87

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXO

LISTA DE FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS

Figura 1 - Representación esquemática (a) superficie freática mayor que el nivel del río (b) superficie freática menor que el nivel en el río (c) corriente del río desconectada del acuífero.

Figura 2 - Condición de contorno tipo 1

Figura 3- Condición de contorno tipo 2

Figura 4 - Flujo de Infiltración al acuífero.

Figura 5 - Flujo de Exfiltración al río.

Figura 6 - Sistema de acuíferos conteniendo el pozo de bombeo multicapas.

Figura 7 - (a) Superficie libre en Malla fija, (b) Superficie libre en Malla móvil.

Figura 8 - Esquematización de los trabajos de concreto en el río Oerías.

Figura 9 - sistema del flujo de aguas subterráneas

Fotografía 1: Piezómetro tipo Casagrande AMP-01.

Fotografía 2: Piezómetro tipo Casagrande AMP-02.

Fotografía 3: Se ilustra la toma de parámetros físicos químicos in situ con un equipo multiparamétrico (HANNA). Durante los trabajos de mapeo hidrogeológico.

Fotografía 4: medición de caudal en quebradas utilizando un correntómetro durante los trabajos de mapeo hidrogeológico.

Fotografía 5: ilustran las mediciones de caudal del nivel 200 la bocamina Hidro.

Fotografía 6: La fotografía muestra la perforación dinámica realizada en el nivel 200 del sondaje AMP-02

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

La presente tesis se realiza porque en Compañía Minera Raura, en los últimos años ha ido incrementándose el caudal de las aguas subterráneas hasta volúmenes que implican una difícil gestión y generan elevados costos en el tratamiento de los efluentes

La evaluación hidrogeológica constituye una parte esencial del entendimiento que se precisa para la mejora y optimización del manejo de aguas en interior mina.

El propósito de este trabajo es determinar el comportamiento del caudal de las aguas subterráneas y su influencia en las labores subterráneas.

El incremento en el caudal de las aguas subterráneas en la unidad minera eleva el costo de producción, por lo tanto, es imprescindible cuantificarlo. Asimismo, es necesario determinar la influencia de la litología y las estructuras geológicas en el aumento del caudal en profundidad.

El incremento del caudal se produce por: Infiltración estacional (alta precipitación), “flujo en conducto” (en cársticos interconectados) e Infiltración a través de fracturas y permeabilidad del macizo rocoso.

Toda la caracterización hidrogeológica nos permitirá determinar las soluciones adecuadas para disminuir los costos.

1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Las delimitaciones de la investigación corresponden básicamente a conocer las características hidrogeológicas del yacimiento, para determinar el comportamiento de las aguas subterráneas en profundidad y tomar en cuenta la prevención ante posibles accidentes ya que las zonas de minado se encuentran en constante contacto con estas aguas subterráneas.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 Problema general

¿La caracterización hidrogeológica determinará la estimación del caudal de las aguas subterráneas en la Mina Raura?

1.3.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características hidrogeológicas del yacimiento?
- ¿Cuáles son los controles estructurales en la determinación del caudal de las aguas subterráneas del yacimiento?

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

- Determinar las características hidrogeológicas que influyen en la estimación del caudal de las aguas subterráneas en la Mina Raura.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la geología del yacimiento minero de Raura.

- Conocer los controles estructurales de las aguas subterráneas del yacimiento minero de Raura.

1.5. JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

El presente estudio se justifica porque es necesario determinar el caudal de las aguas subterráneas en las labores subterráneas profundas de acuerdo a la planificación minera hasta el 2021, que incide en los costos de producción del yacimiento.

1.6 LIMITACIONES

La información solo es para el yacimiento estudiado.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO

Como antecedentes se tiene: El primer estudio en el complejo Catuva que abordó aspectos hidrogeológicos (HydroGeo, 2010), donde se realiza una caracterización detallada de las filtraciones hacia las labores de interior mina y las mediciones de flujo por las principales bocaminas.

También en 2010, como parte del desarrollo de la Ingeniería de Detalle para Cierre de 42 Bocaminas se abordaron aspectos hidrogeológicos (Pasma, 2010).

Recientemente, se desarrolló una actualización del Estudio Hidrogeológico del Complejo Catuva (HydroGeo, 2015).

Asimismo, tenemos una tesis intitulada “Estudio Hidrogeológico del Proyecto Minero Manantial Espejo, ubicado en la Provincia de Santa Cruz, República Argentina” desarrollado por Ortiz Rodríguez, R.E (2005), donde nos detalla la caracterización hidrogeológica desarrollada.

Asimismo, tenemos información publicada por el INGEMMET Boletín N° 076 - Geología de los Cuadrángulos de Huaraz (20h), Recuay (20i), La Unión (20j), Chiquian (21i) y Yanahuanca (21j), 1996; Boletín N° 55 – Geología del Perú, 1995.

2.2. BASES TEORICO – CIENTIFICOS

Aguas subterráneas o aguas sub-superficiales

Es el término usado para denotar toda el agua que se encuentra abajo de la superficie del terreno, el cual se almacena en los poros entre los granos minerales, en fracturas, o en estructuras cársticas del macizo rocoso. Esta agua es generalmente proveniente de la precipitación o por derretimiento de nieve que se infiltra a través del suelo hasta almacenarse en unidades rocosas subyacentes. “El contorno entre la zona saturada y la zona no-saturada, donde la presión de poros es cero ($p = 0$), relativa a la presión atmosférica, es denominada de superficie freática, también conocida como nivel de superficie de aguas subterráneas” (Atkinson, 2001). Los materiales que se encuentran abajo de esta superficie determinan el comportamiento del flujo, pudiendo subdividirse en dos grupos: materiales de alta conductividad (tales como rocas fracturadas, gravas y arenas) que permiten un drenaje bastante rápido, y por otro lado, materiales de baja conductividad (tales como arcillas y limos).

El movimiento de aguas subterráneas puede ser influenciado por distintos factores, de los cuales, de acuerdo con Fetter (1994), el principal es la fuerza de gravedad, la cual actúa para atraer el agua para abajo, en dirección al centro de la Tierra. En segundo lugar, está la presión que viene de arriba de la zona saturada que genera una presión la cual provoca un movimiento en el agua. Una tercera fuerza es aquella referida como atracción molecular, la cual provoca que el agua se adhiera a los contornos de la superficie sólida creando una tensión superficial cuando están expuestas al aire.

Modelo conceptual para flujo de aguas subterráneas

El modelo conceptual es una representación simplificada de las características esenciales del sistema físico hidrogeológico y de su comportamiento hidráulico, en el cual diversas asunciones son hechas porque la completa reconstrucción del sistema es compleja, además de que raramente existen datos que abarcan todo el sistema ya sea espacial o temporalmente.

El modelo conceptual debe ser desarrollado usando el principio de simplicidad, i.e., el modelo debe ser tan simple como posible, pero, manteniendo una consistencia lo suficiente para: (i) representar adecuadamente los elementos físicos del sistema, (ii) reproducir el comportamiento del sistema a ser estudiado; y (iii) facilitar las respuestas relacionadas a los objetivos del modelaje. La verificación del modelo conceptual puede ser hecha al convertir éste en un modelo matemático, calibrándolo con los datos de campos observados, e.g.; cargas hidráulicas observadas versus cargas hidráulicas medidas en el campo. El modelo conceptual normalmente implica un proceso iterativo y debe ser continuamente actualizado mientras que nuevos datos estén disponibles o mientras que el entendimiento del sistema sea mejorado.

Dominio y contornos del modelo

En la mayoría de los casos, el dominio del modelo conceptual será el mismo que el dominio usado para el modelo numérico o podría ser más grande si el proyecto fuera a usar diferentes sub-modelos para cubrir diferentes aspectos del lugar (e.g., un modelo numérico separado para representar la mina a cielo abierto y otro para representar su presa de residuos). De acuerdo con Wels et al. (2012), los contornos más comunes usados en el modelaje de aguas subterráneas en proyectos de gran envergadura, como en la minería, incluyen: Líneas divisorias de agua de la cuenca

(representando líneas de flujo divergente) Valles (representando líneas de flujo convergente) Cuerpos de agua de gran volumen tales como océanos, lagos, ríos (representando áreas con carga hidráulica conocida) Contornos geológicos tales como contactos de roca impermeable o fallas (representando características de gran escala en las cuales el comportamiento hidráulico es conocido o asumido) Condición de flujo nulo perpendicular a las líneas de flujo.

Recarga y descarga de aguas subterráneas

La recarga de aguas subterráneas es definida como el flujo de agua descendiente que alcanza el nivel freático acrecentando el almacenamiento de aguas subterráneas (Healy, 2010). La recarga de aguas subterráneas ocurre de forma difusa (Directa) o por medio de mecanismos focalizados (Indirecta). La recarga difusiva es distribuida alrededor de grandes áreas en respuesta a la infiltración de la precipitación en la superficie del suelo percolando a través de la zona no saturada hasta alcanzar el nivel freático, siendo ésta la principal fuente de infiltración al sistema de aguas subterráneas (Healy, 2010). La recarga focalizada es el movimiento a partir de cuerpos de aguas superficiales, tales como, ríos, canales, o lagos. La descarga de aguas subterráneas puede ser definida como el flujo que abandona el área en estudio o a las que descargan en las aguas superficiales. Por ejemplo, en este mecanismo la Evapotranspiración (ET) puede ser considerado un sistema de descarga, siendo éste definido como combinados de evaporación a partir de la superficie del terreno y transpiración por las plantas a partir de sus raíces. Generalmente, la ET es considerada activa en las zonas de las raíces, i.e., hasta una profundidad de 4 a 6 metros debajo de la superficie. En áreas de recarga de aguas subterráneas (e.g. áreas de grandes elevaciones) el nivel del agua subterránea está típicamente debajo de las zonas de las raíces y la ET es tomada en cuenta implícitamente (i.e., por ajuste de

la recarga). La descarga del agua subterránea en áreas de planicie (e.g. valles, terrenos húmedos), la superficie freática está próxima a la superficie y la influencia de la ET en el balance de aguas subterráneas puede ser significativa y podría ser tomado en cuenta explícitamente.

Unidades hidrogeológicas y propiedades hidráulicas

Las unidades hidrogeológicas son materiales geológicos (o grupo de materiales) que tienen propiedades hidráulicas suficientemente similares, de tal forma que puedan ser consideradas como unidades hidráulicas para el propósito de estudio hidrogeológico. El modelo conceptual considera las propiedades de las más grandes unidades hidrogeológicas, tales como: conductividad hidráulica (k), parámetros de almacenamiento (S), almacenamiento específico (S_s), rendimiento específico (S_y) o porosidad específica ($\epsilon\epsilon$).

Interacción de aguas subterráneas y aguas superficiales

La interacción de aguas subterráneas con las superficiales es un aspecto importante, que ocurre en la mayoría de las cuencas, y, es gobernada por la diferencia entre el nivel de la superficie freática y la elevación de las aguas superficiales (Winter et al., 1998). Si el nivel de la superficie freática es superior que el nivel del agua de la corriente superficial, el agua subterránea descarga en el agua superficial (Figura 1a). Si el nivel del agua de la corriente superficial fuera más grande que el nivel de la superficie freática, el agua superficial sirve como fuente de agua para el agua subterránea (Figura 1b). Otro caso identificado es cuando la superficie freática está abajo del fondo de la corriente de agua, tal caso es identificado como fuentes desconectadas (Figura 1).

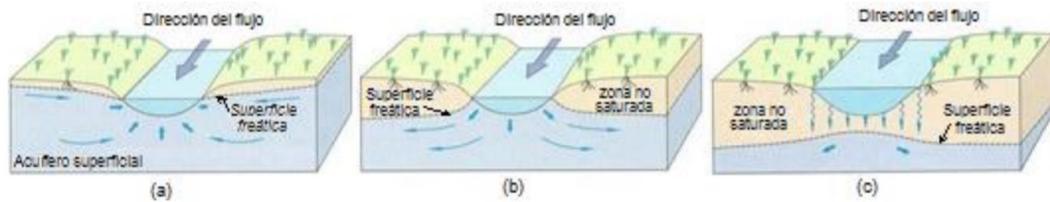


Figura 1 - Representación esquemática (a) superficie freática mayor que el nivel del río (b) superficie freática menor que el nivel en el río (c) corriente del río desconectada del acuífero.

Fuente: Reproducido de Winter et al., 1998

Balance de masa de aguas subterráneas

El balance de masas proporciona una relación cuantitativa entre los diferentes aspectos del modelo de flujo conceptual, i.e., la recarga de aguas subterráneas (infiltración) y la descarga de aguas subterráneas (exfiltración). En la mayoría de los casos un análisis en estado de flujo permanente para la evaluación del balance de masas es adecuada para la formulación del modelo conceptual. Un balance de masas en estado transitorio (el cual toma en cuenta las variaciones de la infiltración/exfiltración en función del tiempo, así como de su almacenamiento) es requerido en el modelo conceptual sólo si el aspecto transitorio de flujo fuera el foco de estudio.

Configuración del modelaje numérico

En esencia, la configuración del modelo numérico representa los procesos de conversión del modelo conceptual cualitativo en un modelo numérico, i.e., un conjunto complejo de ecuaciones matemáticas que pueden ser resueltas numéricamente mientras las siguientes definiciones sean bien delineadas.

Delimitación del dominio

La delimitación del dominio es dependiente de la selección de los contornos externos adecuados, siendo preferible usar características hidrogeológicas físicas

conocidas para controlar el flujo de aguas subterráneas tales como líneas divisorias en las cuencas, lagunas, etc.

Discretización horizontal y vertical

Una vez definido el dominio del modelo numérico, su discretización es representada ya sea por una malla ortogonal (método de las diferencias finitas) o por una malla de elementos 3D (método de los elementos finitos), donde un grado de resolución espacial mayor determinará la precisión y convergencia de la solución, mas, adicionando un esfuerzo computacional. Como ya es sabido el uso de una malla de elementos finitos ofrece mayor flexibilidad y mayores ventajas en comparación con la malla de diferencias finitas, en relación a una discretización adecuada del modelo numérico. Los tamaños de los elementos deben ser los suficientemente pequeños para representar todas las características de interés, manteniendo un refinamiento suavizado en locales de importancia. Es recomendable comenzar con una malla relativamente gruesa e ir posteriormente refinando a los pocos o hasta alcanzar resultados estables y la precisión requerida. Una malla muy refinada no alterará significativamente los resultados, mas, acrecentará en gran medida el esfuerzo computacional. Una discretización vertical puede ser requerida en un modelo de aguas subterráneas para representar explícitamente las variaciones de las propiedades hidráulicas con la profundidad o simplemente para ofrecer una mejor resolución de los gradientes verticales. Dos enfoques son comúnmente usados para representar la discretización del modelo conceptual en la dimensión vertical: (i) estratos numéricos deformados y (ii) estratos numéricos uniformes. Los estratos deformados tienen contornos usualmente siguiendo a las superficies de las unidades hidrogeológicas, permitiendo una continuidad horizontal. Por otro lado, los enfoques de estratos

uniformes tienen la ventaja de simplicidad y de solución estable, pero pudiendo requerir una mayor discretización vertical para poder describir adecuadamente la espesura de las unidades hidrogeológicas generando, de esta forma, un mayor tiempo de cálculo computacional (Anderson & Woessner, 1992).

Condiciones y restricciones de contorno

Condiciones y restricciones de contorno son expresiones matemáticas que buscan representar el estado de un sistema físico, y a su vez, restringir las ecuaciones del modelo matemático. Éstas generalmente representan las entradas y salidas de flujo de agua dentro del sistema con limitantes impuestas para tener una solución más controlada. Su representación y entendimiento para el uso adecuado dentro del modelo es muy importante debido a que una condición de contorno hidrogeológica física podría ser representada en más de una forma. Un sistema de flujo de agua subterráneas es generalmente un conjunto de condiciones de contornos de cargas y flujos, siendo recomendable evitar el uso sólo de condiciones de flujo sin la imposición de contornos de carga, debido a que esta configuración podría generar problemas de no singularidad. Las condiciones de contorno para modelar el flujo de aguas subterráneas son generalmente agrupadas en dos tipos conceptuales:

- Contornos físicos: Son formados por la presencia de cuerpos grandes de aguas superficiales, por la presencia de una unidad hidrogeológica de permeabilidad muy baja o por una barrera artificial, etc. Este tipo de contorno prácticamente no cambia en respuesta del flujo de aguas subterráneas o tensiones aplicadas en éstas.
- Contornos hidráulicos: (o contornos artificiales) incluyen divisorias de aguas subterráneas y líneas de flujo, así como contornos de cargas constantes que representan cuerpos de aguas superficiales. Este tipo de contorno no presenta

buenos resultados en simulaciones en estado transitorio, en simulaciones predictivas o ante la imposición de tensiones en el sistema. Su uso debe ser verificados para determinar se sus errores podrían ser aceptables en el modelo.

Contorno de flujo nulo (Línea de flujo o Flujo cero)

El contorno de flujo nulo no permite que el flujo de aguas subterráneas atraviese este contorno. En la mayoría de los programas numéricos todas las superficies externas y bordes del dominio del modelo son por definición flujo nulo a menos que otro tipo de condición de contorno sea aplicado. Esto significa que un modelo de flujo 3D no simulará ningún efecto de Seepage o run-off, mientras una condición de contorno especial esté colocada. Existen muchas aplicaciones comunes de flujo nulo, tales como:

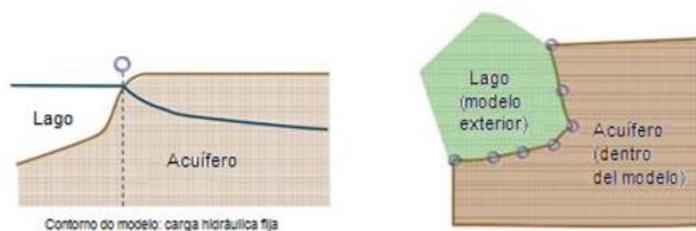
- Divisoria de aguas subterránea: su uso es justificado apenas cuando la tensión actuante en el sistema tiene un efecto despreciable sobre la posición de este contorno.
- Contornos impermeables: son unidades hidrogeológicas las cuales son consideradas como impermeables para propósitos de modelaje, i.e., cuando las conductividades hidráulicas de esas unidades difieren en varias órdenes de grandeza en relación a las otras.
- Perfiles de modelos: en estructuras de ingeniería, tales como presas de tierras, los contornos laterales tienen típicamente líneas de flujo hidráulicas paralelas, y perpendicularmente a estas el flujo nulo existe. En estos casos es recomendable tomar una sección que corresponda a 3 veces la profundidad de la estructura. Otros tipos de estructuras que podrían ser consideradas como flujo nulo son paredes cut-off, cortinas de grout, geomembranas y liners.

Condición de contorno tipo 1 o de Dirichlet

$$h(x,t) = hD(t) \text{ en } \Gamma_1 \times t[t_0, \infty)$$

Contorno de carga constante

Representa una carga hidráulica que no cambia con el tiempo y no es afectada por el sistema de aguas subterráneas simuladas. Usualmente es usado para representar grandes cuerpos de agua, los cuales no son afectados por las tensiones aplicadas en el sistema (e.g. grandes lagos o ríos, mar, etc.) como ilustrado en la - Figura 2 Otro uso es para representar las cargas hidráulicas observadas en el campo (e.g. la elevación de la superficie freática). Contorno de carga general especificada: representa una carga hidráulica la cual podría cambiar en el tiempo y espacio. Es usualmente empleado para generar gradientes hidráulicos que representen condiciones de carga que se encuentran muy alejados del 24 modelo (e.g. la existencia del mar, o lagos en las proximidades de la región en análisis), reduciendo el dominio del modelo para un tamaño menor. En la mayoría de los casos esta condición es fija en el espacio, pero podría cambiar en función del tiempo para simulaciones en estado transitorio (e.g. avance de la excavación de una mina a cielo abierto avanzando la labra para una mina subterránea).



*Figura 2 - Condición de contorno tipo 1- carga constante.
Fuente: DHI Wasy, 2014*

Condición de contorno tipo 2 o de Neumann

En este tipo de condición de contorno el flujo de las aguas subterráneas es especificado a través de los contornos (nodo, línea, superficie) y puede ser una función de espacio y tiempo.

- Contorno de flujo constante: comúnmente usados para representar puntos o líneas fuentes de recarga-descarga, constantes en espacio y tiempo, como mostrado en la Figura 3.

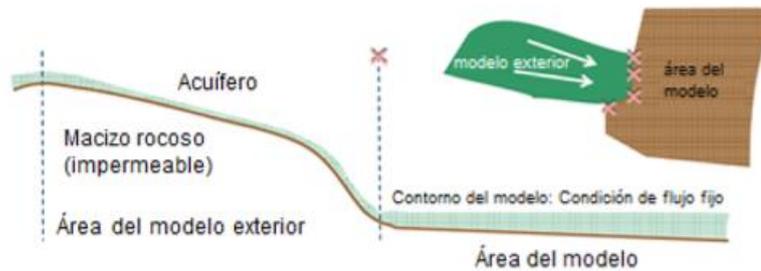


Figura 3- Condición de contorno tipo 2
Fuente: DHI Wasy, 2014 25

- Contorno de flujo especificado: es usualmente empleado para representar recargas que varían con el tiempo (e.g. la precipitación).

Condición de contorno tipo 3 o de Cauchy

$$qnh(x,t) = [krKf\mu \cdot (\nabla h + \chi e)] \cdot n = -\phi h (hC - h) \text{ en } \Gamma 3 \times t[hc, \infty)$$

La característica principal de este tipo de condición es que el flujo impuesto como condición va ser dependiente de la carga hidráulica calculada y de la carga hidráulica de referencia. Siendo, por tanto, el flujo una función especificada que varía en la solución del problema mientras la carga hidráulica también varía.

El uso más común de este tipo de condición es para representar flujos de entrada o salida en los ríos, para los cuales, ciertos tipos de condiciones tienen que ser estudiados.

La formulación de la condición de contorno tipo 3 es basada en la relación de transferencia entre el valor de la carga hidráulica de referencia h_c en el contorno $\Gamma 3$ y la carga hidráulica a ser calculada, h , en la misma posición, originando, de esa forma, dos casos:

$$\phi h = \{ \phi h \text{ in}(x,t) \text{ para } h_c > h$$

$$\phi h \text{ out}(x,t) \text{ para } hC \leq h$$

- Infiltración: cuando la carga hidráulica de referencia es mayor que la carga hidráulica calculada en la misma posición, como indicado en la Figura 4

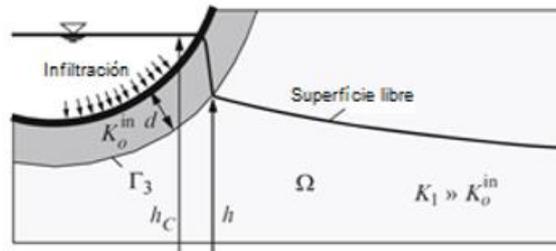


Figura 4 - Flujo de Infiltración al acuífero.
Fuente: Diersch, 2013

- Exfiltración: cuando la carga hidráulica de referencia es menor que la carga hidráulica calculada en la misma posición, como mostrado en la Figura 5

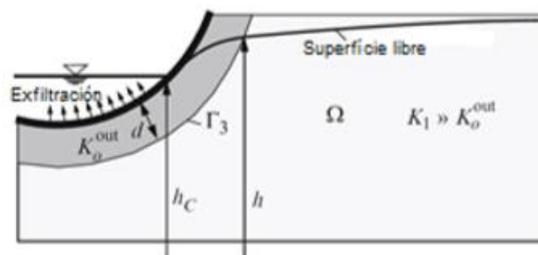


Figura 5 - Flujo de Exfiltración al río.
Fuente: Diersch, 2013

Condición de contorno tipo pozo multicapas

Este tipo de condición de contorno es muy eficiente cuando se trata de inyección o extracción de agua a través de pozos en sistemas de acuíferos 3D, en los cuales pueden existir diferentes capas o formaciones heterogéneas, donde los pozos de bombeo parcialmente penetrantes tienen que ser impuestos, como esquematizado en la Figura 6. Este tipo de condición en el programa FEFLOW implica un método, el cual impone una alta conductividad (elemento discreto 1D – tubular) para representar el pozo y la superficie de este (Well Screen). La alta conductividad del

pozo garante una carga uniforme al largo de este elemento con un ligero gradiente en dirección al punto de descarga.

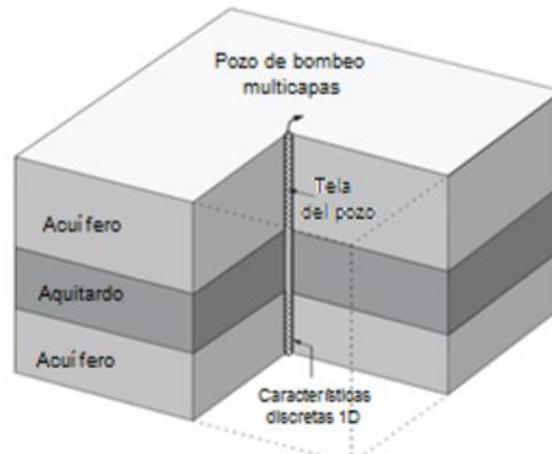


Figura 6 - Sistema de acuíferos conteniendo el pozo de bombeo multicapas.
Fuente: Diersch, 2013

Superficie libre

La superficie libre es un contorno móvil donde la carga hidráulica es igual a la carga de elevación (presión = 0) del contorno. Para el tratamiento y solución de este contorno el FEFLOW considera dos enfoques: Malla fija y Malla móvil (Figura 7). Para mayores informaciones de estos dos enfoques, revisar Diersch (2013).

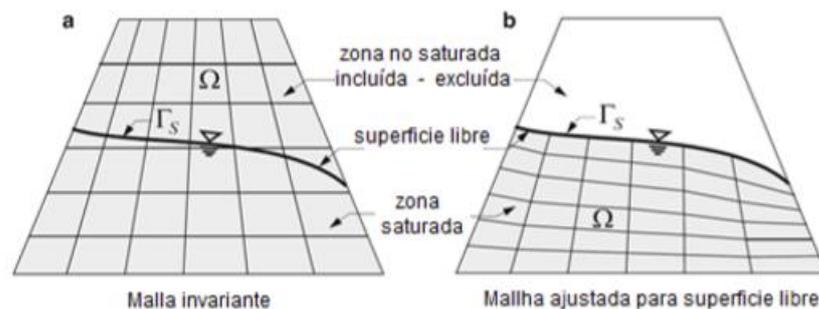


Figura 7 - (a) Superficie libre en Malla fija, (b) Superficie libre en Malla móvil.
Fuente: Diersch, 2013

Superficie libre 3D con malla fija y condiciones de pseudo-no saturación

Una malla fija tiende a imitar, en la medida de lo posible, las condiciones de flujo no saturado para controlar los procesos de solución de los elementos de malla

saturados, parcialmente saturados, o secos. En este método la superficie libre existirá apenas en los elementos parcialmente saturados, donde la superficie freática descansa en el interior del volumen del elemento.

Se debe enfatizar que un modelaje con enfoque de pseudo-no saturación es adecuado para calcular la posición de la superficie libre, pero, no es adecuado querer representar un verdadero régimen de flujo no saturado, debido a que este método no trabaja en sí con parámetros verdaderos de un análisis de flujo de suelo no saturado.

La ventaja de este método es su simplicidad y robustez, pero su eficiencia es usualmente inferior al enfoque de una malla móvil en relación a la precisión alcanzada.

Superficie libre 3D con malla móvil

Este enfoque es caracterizado por mover el extremo superior del modelo de tal forma que la elevación del primer slice coincida siempre con la elevación de la superficie libre.

En este enfoque, no es apenas ajustado el primer slice, si no también todos los slices interiores del modelo, de tal forma que ningún de estos se intercepte, y al mismo tiempo mantengan una densidad adecuada de la discretización.

Malla móvil es un método particularmente bueno para casos donde los movimientos de la superficie freática son esperados dentro de un estrato numérico. En sistemas de acuíferos complejos con grandes gradientes este enfoque deja de ser aceptable.

Convergencia del modelo

En la mayoría de los casos, modelaje de aguas subterráneas generan grandes sistemas de ecuaciones algebraicas, para los cuales, métodos de solución directa (e.g. Eliminación de Gauss) pueden ser bastante ineficiente debido a que o esfuerzo

computacional es proporcional al tamaño de la matriz de rigidez. Sin embargo, existen métodos iterativos que resuelven estos sistemas de ecuaciones basados en una aproximación de la solución, donde el esfuerzo computacional que demandan estos métodos también depende del tamaño de la matriz rigidez, pero, en menor medida.

El principio del procedimiento de la solución iterativa es crear una primera estimativa inicial de solución h_0 y luego aplicar un esquema de recurrencia (e.g. iteración de Richardson) para generar una secuencia de nuevas aproximaciones h_1 , h_2 , ..., hasta convergir en una solución más aproximada h . una de las desventajas de este método es que la razón de convergencia podría ser lenta o que inclusive problemas de divergencia puedan ocurrir. Este método requiere de un criterio de parada, para el cual el proceso de iteración es finalizado, y así poder considerar la solución aproximada como una solución suficientemente precisa.

El punto crucial de los métodos de iteración es encontrar una estrategia para una razón rápida de convergencia. Existe una amplia variedad de métodos iterativos para resolver sistemas de ecuaciones, dentro de los más importantes se tiene:

- Método del gradiente conjugado (CG)
- Método del residuo mínimo ortogonal (ORTHOMIN)
- Método del residuo mínimo generalizado (GMRES)
- Método Lanczos de la raíz del gradiente conjugado (CGS)
- Método Lanczos estabilizado del gradiente biconjugado (BiCGSTAB)
- Método de la multimalla (MG), en particular el método de la multimalla algebraica (AMG).

Para mejorar el comportamiento de convergencia de estos métodos iterativos, estos son usualmente utilizados en combinación con las técnicas denominadas de

precondicionamiento, las cuales transforman el sistema básico de la matriz de tal forma que este se convierte en un sistema más adecuado de resolverse.

Pre-condicionamiento

Una importante propiedad de la matriz de rigidez A es determinada por el número de condición $k(A)$, definida como:

$$k(A) = \|A\| \|A^{-1}\|$$

el cual caracteriza la razón entre el máximo y mínimo de los autovalores $\lambda_{max}(A)/\lambda_{min}(A)$. Problemas para el cual k es grande son denominados de mal-condicionados, y cuando k no es muy grande son denominados de bien-condicionados. Típicamente un alto contraste entre los parámetros genera un número de condición muy grande. Debido a que los autovalores influyen significativamente en el comportamiento de convergencia del método iterativo, este podría mejorar si k disminuyera $k \rightarrow 1$. Esto es posible mediante una adecuada transformación de la matriz A , de tal forma que el método iterativo converja mucho más rápido. En los estudios de casos presentados en esta tesis el parámetro hidráulico que será modificado en cada proceso de calibración será la conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas.

Técnicas de calibración

La calibración del modelo numérico puede ser hecha por los métodos: tentativa-y-error, métodos automatizados, o por una combinación de los dos.

- Calibración manual Tentativa y Error

Este método consiste en cambiar los parámetros de entrada en el modelo manualmente hasta mejorar la relación entre los parámetros de salida del modelo con los valores de parámetro obtenido en el campo. La principal

ventaja de este método es que ofrece al modelador una mayor percepción de los factores que controlan el sistema.

- **Calibración para la estimación de parámetros automatizada**

Estimación de parámetros automatizada involucra el uso de uno o más códigos computacionales especialmente desenvueltos para realizar la calibración del modelo, los cuales ya resuelven el problema inverso. En la actualidad existen diversos softwares capaces de resolver este método, siendo los principales los códigos que trabajan con FEFLOW y MODFLOW.

Datos necesarios para calibración

Los datos (observados) de calibración deben tener idealmente una distribución espacial en todo el modelo, y en el caso de una calibración en régimen transitorio, una distribución espacial y temporal de los datos observados es necesaria. La no singularidad durante la calibración del modelo puede acrecentarse debido a que diferentes conjuntos de parámetros de entrada en el modelo producen salidas aproximadamente idénticas (Brown, 1996). Y para compensar este efecto otro parámetro de control debería ser empleado, el cual podría corresponder a flujos de salida o presiones conocidas en el campo.

Verificación de la calibración

Análisis cualitativo

De acuerdo ASTM (D5490-93), este estudio debe considerar los siguientes aspectos:

- **Características generales de flujo**

La evaluación de este tipo consiste en usar distribuciones espaciales de los estándares de flujo de aguas subterráneas basados en planos potenciométricos

y compararlos con el campo de flujo obtenido después del proceso de simulación, verificando, de esta manera, la inexistencia de incoherencias.

- **Condiciones hidrogeológicas**

Identificar las diferentes condiciones hidrológicas que son representadas por el conjunto de datos disponibles. Escoger un conjunto de datos a partir de cada condición hidrológica a ser usado en la calibración, y usar el restante en su verificación.

De acuerdo con la norma ASTM (D5490-93), cuando sólo un conjunto de datos es disponible no es aconsejable separar artificialmente datos para la calibración y para la verificación. Es más importante calibrar los datos de cargas piezométricas que abarquen en la medida de lo posible todo el dominio modelado.

Análisis cuantitativo

Existen muchos métodos para estudiar cuantitativamente la calidad del ajuste entre los parámetros medidos y modelados. A seguir son considerados las evaluaciones estadísticas mínimas, recomendadas por la norma ASTM (D5490-93), 2002, que deben ser desenvueltas en un modelo hidrogeológico.

- Carga potenciométrica residual
- Calcula los residuales (diferencias) entre las cargas medidas y las observadas

$$r_i = hc - hm \quad (1.19)$$

donde r_i es el residual, hidráulica medida (hm) y la carga hidráulica calculada (hc). Si el residual fuera positivo, entonces la carga calculada es muy alta, y si negativo, entonces la carga calculada es muy baja.

Análisis de sensibilidad

Después del modelo de flujo de aguas subterráneas haber sido calibrado, un análisis de sensibilidad podría ser hecho dependiendo de la disponibilidad de los datos, para

estudiar cuantitativamente la relación entre los resultados del modelo y las propiedades hidráulicas (o condiciones de contorno del acuífero). Para cada valor de cada grupo de entrada de parámetros el modelo debe ser procesado nuevamente calculando los residuales correspondientes en respuesta de los nuevos valores usados, los cuales pueden ser verificados

MATERIALES Y MÉTODOS - CONTROL DE AGUAS EN PROYECTOS DE MINERALIZACIÓN

Existen muchas evidencias a lo largo de la historia de la civilización en que el hombre mostró haber hecho intentos para efectuar el control de aguas y este proceso no es tan simple como parece (Powers et al., 2007). Hoy en día es de gran importancia el entendimiento de los diferentes procesos utilizados en el gerenciamiento del control de aguas subterráneas en la mineración, donde y hasta en situaciones simples, la matemática del flujo subterráneo es compleja, y acuíferos naturales están lejos de la simplicidad. La infiltración de agua a partir de estratos circundantes para el interior de la cava o pedrera requiere de la implementación de un sistema de control para un proceso de abatimiento con el intuito de asegurar que el lugar de trabajo permanezca seco. En este tipo de procesos, un concepto mal interpretado de un análisis no asociado con juzgamientos hidrogeológicos hace con que el procedimiento de abatimiento sea afirmado como un proceso a ser realizado en cualquier lugar donde hay problemas relacionados con el agua. Entretanto, este proceso es más que un simple abatimiento de la superficie piezométrica, y va más allá que meramente instalar un pozo de bombeo.

Concepto de abatimiento y control de aguas

El proceso de abatimiento y monitoramiento del nivel freático es difícil, caro y frecuentemente confuso. Este encarecimiento significativo incentivó por los años

50 el desenvolvimiento de técnicas prácticas para ensayos y análisis en acuíferos, direccionados para el abastecimiento de agua e irrigación, como las propuestas por los hidrólogos Muskat, Theis, Jacob, Hantush y otros; y esos métodos fueron después adaptados a la solución de problemas de abatimiento de la superficie freática. De acuerdo con Hall (2003), el “abatimiento del nivel freático” envuelve la remoción de una cantidad de agua de la masa rocosa o perfil de suelo, de tal forma que los niveles de agua sean abatidos para brindar seguridad y economía a la mina. Físicamente este proceso es definido como un drenaje de los poros dentro de la masa del suelo o roca, y que resulta en el abatimiento del nivel freático. Cuando aplicado en la industria de la mineración, los procesos de abatimiento de la superficie freática y control de las aguas, por crear el cono extensivo de depresión, causan beneficios principalmente por reducir los costos de explosión, i.e., cuando el mineral está seco, menos emulsión explosiva es requerida, reduciendo hasta los costos de transporte (combustible) y el desgaste de la máquina y también la mejora en la traficabilidad y calidad del mineral (Rowe & Beale, 2007). Sin embargo, la aplicabilidad de estos procesos debe ser bien conceptualizada, donde un análisis técnico-económico deba ser ampliamente estudiado para que solamente lo necesario sea ejecutado por la industria de la mineración para un buen funcionamiento de los procesos de mineración, de tal forma que la naturaleza no se vea afectada por estos cambios. Técnicas para el control de aguas deben ser puestas en prácticas para idealizar un sistema que no sea antieconómico y que al mismo tiempo no perjudique la naturaleza.

Despresurización de taludes

Este mecanismo de despresurización es un problema común en taludes profundos en proyectos de mineración, que requieren reducir el potencial de presión excesiva

dentro de los taludes de la cava. También, se presenta como levantamiento de la base de la cava bajo la presencia de secuencias de acuíferos incorporados en estratos blandos de aquicludes. Aunque la fluctuación de la presión de poros sea un factor importante que contribuye al deslizamiento, es muy importante entender las reales interacciones de la presión de poros que ocurren en una superficie de deslizamiento a lo largo de la profundidad debido a la naturaleza compleja de las condiciones hidrogeológicas (Tsao et al., 2005). En minas a cielo abierto, más del 40% de los riesgos de inestabilidad de taludes dependen de sus condiciones de flujo. Consecuentemente, el ángulo que un talud a ser escavado en seguridad debe tener es definido en función del campo de presión de poros presente en éste. Así, para prevenir su ruptura, un sistema de drenaje debe ser instalado. Para Powers et al., 2007; Atkinson, 2001 y Brown, 1981, la importancia del control de las aguas superficiales en los taludes es destacada.

Técnicas de control de aguas en minas subterráneas

Métodos de control consisten en la prevención (limitación de la infiltración de las aguas, o bombeo antes de que éstas entren en la mina), o en el bombeo del agua desde la mina. Existen diversas técnicas de control, pero sólo algunas de estas son prácticas y económicamente aplicables para minas subterráneas. A continuación, una breve descripción de las técnicas más implementadas:

- Impermeabilización de la superficie de terreno
- Congelamiento del terreno
- Grouting
- Drenaje de mina

Impermeabilización de la superficie del terreno

Este método consiste en la impermeabilización de las fuentes de aguas superficiales (e.g., ríos) que descargan agua en el acuífero, la cual podría percolar en dirección a la mina. Este método fue usado con suceso en varias minas al redor del mundo. En la mina Neves-Corvo en Portugal, el sellamiento del curso de un río fue hecho con concreto reforzado e inyecciones de shotcrete en las bancas del río (Figura 8), lo que redujo substancialmente el flujo de infiltración a la mina (Carvalho et al., 1990). Otra impermeabilización con resultados exitosos del curso de un río que fluía al redor de un área impactada por subsidencia fue reportada en Konkola Mine en la Zambia (Freeman, 1970). En esta mina fueron selladas las trincas generadas por subsidencia. Esta técnica está siendo aplicada en esta tesis para el caso de la mina subterránea, estudiando la impermeabilización parcial o total del río circunyacente a la mina de Vazante.

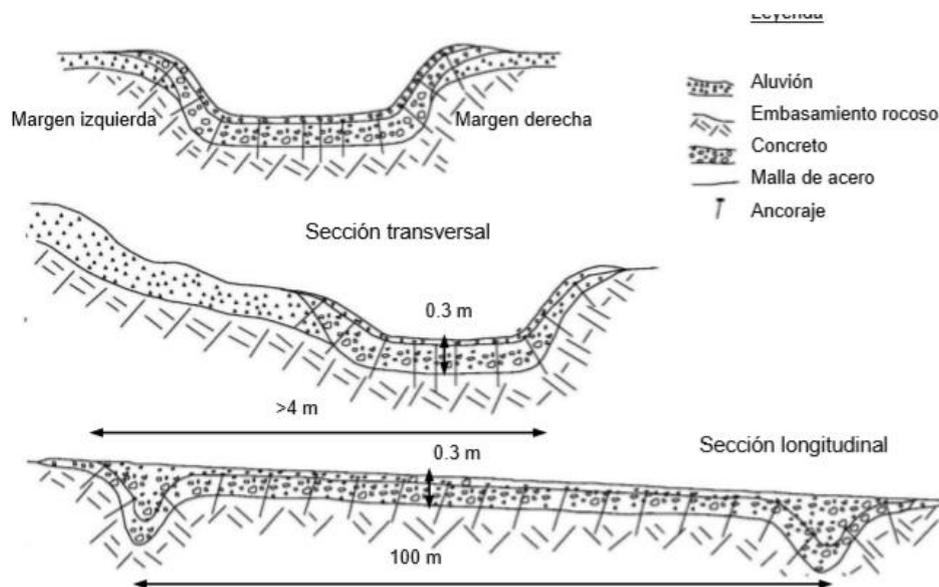


Figura 8 - Esquematización de los trabajos de concreto en el río Oerias.
Fuente: Carvalho, 1990 3.3.2

Congelamiento del terreno

El principio de este método es tornar el agua del suelo en una pared de hielo, generadas por la circulación de un fluido criogénico dentro de un sistema de tubos verticales, los cuales son instalados alrededor del objetivo, generando, de esa forma,

un muro completamente impermeable (cut-off). El congelamiento puede ser un método muy eficiente en determinadas condiciones hidrogeológicas, pero, el estudio económico es muy importante debido a que este método es muy costoso no siendo normalmente viable su aplicación en minas subterráneas, pero existen muchos registros exitosos de su uso en la impermeabilización de shaft. A diferencia de otros métodos de cut-off, congelamiento del terreno es una técnica poco invasiva, ya que ésta requiere menos penetración en comparación con los otros métodos, debido a que su efectividad se propaga térmicamente. Una vez instalado este sistema de piping, el congelamiento del terreno permanece activo por mientras que el sistema esté operando, y una vez que el sistema parar, el medio subterráneo vuelve a su estado inicial.

Grouting

Aunque el grouting tenga diversas aplicaciones, en este caso, es uso preferencialmente para eliminar o reducir el flujo de agua subterránea en trabajos de mineralización subterránea propuestos o existentes. Sea cual fuera el problema de infiltración es necesario que las causas sean estudiadas completamente antes de aplicar el método de grouting adecuado.

Existen 2 fases principales en la vida útil de una mina subterránea, donde de alguna forma el grouting para el control de aguas es requerido: Desarrollo y puesta en marcha – Durante la construcción del shaft o superficies de desvío y desarrollos preliminares de la mina subterránea para ganar acceso al cuerpo mineralizado. Producción/operación – Cuando se trata con problemas de aguas subterráneas en el avance de la producción o en la construcción de nuevos caminos subterráneos. Típicamente esta técnica consiste en perforaciones de aproximadamente 90 mm de diámetro, realizadas hasta las profundidades

establecidas en el proyecto. En terreno seco el furo realizado es lavado y, posteriormente, el cemento de grout es inyectado y acomodado dentro de éste por vibración a través de un tubo de alta presión (standpipe) de diámetro nominal 2 pulgadas. Esta técnica además de ser muy cara, genera muchas incertezas durante su aplicación debido a que no se conoce a lo cierto a las formaciones del medio poroso a grandes profundidades y, también, porque el monitoramiento para verificar la eficacia de esta técnica es limitado por no proporcionar valores realísticos de las conductividades hidráulicas de las zonas con y sin grout. Por lo tanto, su uso es normalmente dirigido apenas para controlar el flujo de aguas en la construcción del shaft, donde la barrera de grout funcionará sólo para un período de tiempo limitado.

Drenaje de mina

Este método más comúnmente usado para el control de las aguas en la mineralización subterránea, y puede variar desde una simple captación de aguas infiltradas en la mina (por medio de las fracturas o a través del propio medio poroso), hasta procedimientos más complejos que involucran la instalación de pozos de abatimiento a partir de la superficie del terreno, perforaciones de drenaje situada dentro de la mina o por medio de galerías de drenaje.

La técnica de abatimiento usando pozos verticales perforados es una práctica común en minas a cielo abierto, pero, este método también es empleado en minas subterráneas siempre que el análisis económico sea viable. Una de las ventajas de esta técnica es que es ejecutada normalmente antes de los trabajos y no causa interferencias con las operaciones mineras, aparte de que consigue extraer el agua limpia. Dentro de las desventajas se encuentran los costos de perforación y bombeo, así como las limitaciones en profundidades alcanzadas en el abatimiento, debido a

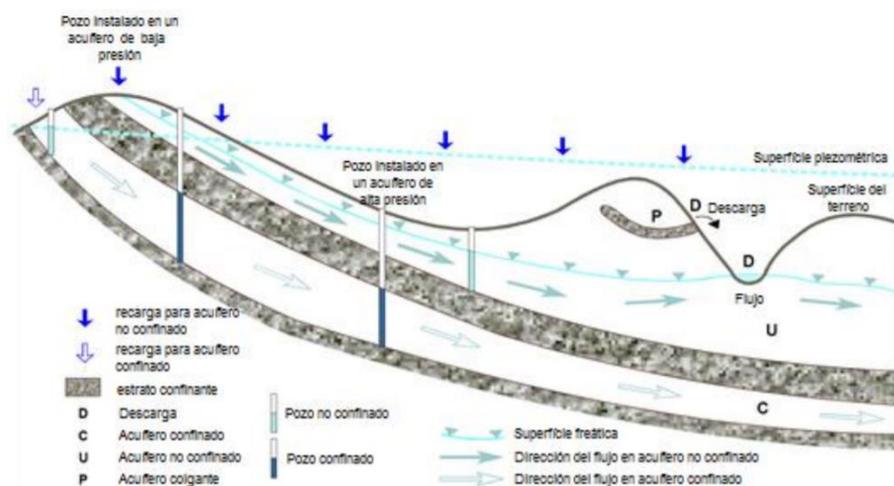
que estos sistemas difícilmente pueden alcanzar las profundidades de la mina subterránea. Normalmente estos métodos son usados en combinación con perforaciones de drenajes instalados en el interior de la mina. Perforaciones profundas de pozos de bombeo a partir de la superficie del terreno son capaces de bombear grandes volúmenes de agua y han sido práctica común en los últimos años en los Estados Unidos. Existen al menos tres minas subterráneas de oro en el oeste de los Estados Unidos donde pozos profundos de bombeo son el principal sistema de abatimiento. Estas minas, localizadas en Nevada (Meikle, West Leeville, y Turquoise Ridge), usan grandes diámetros de pozos (25 – 40 cm) y bombas sumergibles capaces de bombear hasta 360 m³ /h (8640 m³ /d).

Técnicas de control de aguas en minas a cielo abierto

Técnicas pueden ser agrupadas en dos categorías principales: Las técnicas activas o también llamadas de técnicas de abatimiento avanzadas, y las técnicas pasivas también conocidas como técnicas de abatimiento a tiempo real.

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

De acuerdo a la siguiente figura se definen términos:



Fuente: Best, 1998

Figura 9 - sistema del flujo de aguas subterráneas

En la figura se puede visualizar las áreas de recarga y descarga, acuífero confinado, no confinado y en reposo, nivel de la superficie freática, superficie potenciométrica, estratos confinantes y la dirección del flujo de agua subterráneas.

Se presenta a continuación una breve descripción de sus componentes:

- **Acuífero:** Unidad hidrogeológica que puede almacenar y transmitir agua subterránea a un caudal suficientemente rápido para abastecer razonables cantidades de agua a los pozos.
- **Capa confinante:** Unidad hidrogeológica que actúa como una barrera para el flujo o como sello para un acuífero.
- **Acuífero confinado:** También conocido como acuífero bajo presión o acuífero artesiano. Es un acuífero que está contorneado o sustentado por la parte superior e inferior por formaciones impermeables. Su recarga puede ocurrir por infiltración en zonas de afloramiento de este acuífero o, si los estratos confinantes no fuesen totalmente impermeables o, cuando hubiera contacto con un acuífero no confinado.
- **Acuífero no confinado:** También llamado de acuífero freático, delimitado en el topo por la superficie freática y en la base por un estrato impermeable. Generalmente, este tipo de acuífero es directamente recargado desde la superficie del suelo encima de este, a no ser que el estrato superior sea impermeable. Un acuífero libre es llamado de acuífero libre goteante si la formación inferior limitante es semi impermeable.
- **Rendimiento específico:** El rendimiento específico de un suelo (o roca) puede ser definido como la proporción de volumen de agua que, después de saturado, es drenado por gravedad en relación a su volumen total. En el caso de un acuífero freático, el agua es realmente drenado de los vacíos cuando el nivel freático tiene

un abatimiento. Sin embargo, ni toda agua contenida en los poros es removida por el drenaje gravitacional. Cierta cantidad de agua es aprisionada en los intersticios entre los granos por fuerzas moleculares y tensiones superficiales. Por eso, el almacenamiento de un acuífero freático es menor que la porosidad, debido a un factor denominado de retención específica.

$$S_y = n - S_r$$

donde S_y es el rendimiento específico, n es la porosidad (todos los poros están interconectados) y S_r es la retención específica.

- Almacenamiento específico de un acuífero: Es la cantidad de agua almacenada o liberada por unidad de volumen de la formación debido a la compresibilidad de la disposición mineral y de los poros con agua por variación unitaria en la componente de carga normal a aquella superficie.
- Coeficiente de almacenamiento: Puede ser definido como el volumen de agua que un acuífero desprende o almacena por los mismos efectos por unidad de área superficial (i.e., considerando toda la espesura del acuífero en vez de una espesura unitaria como en el caso de S_y).
- Almacenamiento para un acuífero no confinado: Es calculado por la siguiente expresión:

$$S = S_y + h \cdot S_s$$

donde, S es el coeficiente de almacenamiento, S_y es el rendimiento específico, h es la espesura saturada y S_s es el almacenamiento específico. Generalmente, S_y es mucho más grande que el valor de S_s .

- Almacenamiento para un acuífero confinado se calcula así:

$$S = B S_s$$

donde B es la espesura del acuífero confinado

2.4 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

2.4.1 HIPÓTESIS GENERAL

Caracterización hidrogeológica determinan la estimación del caudal de las aguas subterráneas en la Mina Raura

2.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICOS

- Las características hidrogeológicas determinan la estimación del caudal de las aguas subterráneas en la mina Raura.
- Los controles estructurales determinan el caudal de las aguas subterráneas del yacimiento

2.5. IDENTIFICACION DE LAS VARIABLES

2.5.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

La caracterización hidrogeológica

2.5.2 VARIABLES DEPENDIENTES

Estimación del caudal de las aguas subterráneas en la Mina Raura

2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES

Caracterización hidrogeológica consiste en caracterizar los problemas de contaminación de aguas subterráneas para facilitar el diseño de una acción correctiva.

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1. TIPO DE INVESTIGACION

El diseño de investigación es descriptivo porque se realiza mediante una descripción de los procesos que ocurren in-situ.

3.2. METODOS DE LA INVESTIGACION

El Método de investigación es inductivo y analítico, porque este estudio es realizado por la observación y posteriormente se analiza las observaciones realizadas.

Para el presente trabajo de investigación se ha requerido básicamente del análisis muy detallado de la base teórica y antecedentes de los acuíferos del depósito, los cuales ayudaron en el entendimiento del comportamiento de los acuíferos en el yacimiento.

3.3. DISEÑO DE INVESTIGACION

El diseño de investigación es evaluativo, porque nos permite realizar evaluaciones cada cierto tiempo.

3.4. POBLACION Y MUESTRA

Población: Mina Raura

Muestra: Son los acuíferos que se encuentran en el yacimiento.

Selección de muestra

Para realizar el cálculo del caudal se ubicaron puntos de aforo sistemático en el yacimiento.

3.5 TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS

- En base al mapeo hidrológico existente se identificarán las zonas de medición de aforos, en donde se realizará la medición del caudal a detalle.
- Se realizará correlaciones del caudal con los tipos de litología para caracterizar los controles estructurales.
- Posteriormente se codificarán datos.

3.6 TECNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS

Se usan técnicas Analíticas e Interpretación de toda la información hidrológica e hidrogeológica obtenida en las diferentes etapas de Trabajo.

3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

Para el tratamiento estadístico no aplica para este trabajo de investigación.

3.8. SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

La selección, validación y confiabilidad de los instrumentos cumplen con los estándares de fiabilidad en la obtención de datos como por ejemplo al realizar las pruebas de Ensayo de Lugeon (permeabilidad), las cuales fueron fundamentales para realizar esta investigación.

3.9. ORIENTACIÓN ÉTICA

Se realizaron todos los procedimientos adecuados y correctos desde la recopilación e interpretación de datos hasta la publicación en este trabajo, cumpliendo con todo los parámetros y reglas, teniendo en cuenta la ética.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DESCRIPCION DEL TRABAJO DE CAMPO

La Unidad Minera Raura, es una empresa dedicada a la exploración, explotación y tratamiento de minerales polimetálicos con contenidos de plomo, zinc, cobre y plata.

4.1.1 UBICACIÓN.

La mina Raura se encuentra ubicado entre:

- Departamento de Huánuco (Provincia de Lauricocha, distrito de San Miguel de Cauri),
- Departamento Lima (Provincia y distrito de Oyón)
- Departamento Pasco (Provincia Daniel Alcides Carrión, distrito de Yanahuanca),

Tiene una altura promedio de 4,700 m.s.n.m.



Plano de ubicación Unidad Minera Raura.

4.1.2 ACCESIBILIDAD

La unidad Minera Raura es accesible desde la Ciudad de Lima con una longitud de 415 Km la cual se indica a continuación:

TRAMO	Km	TIPO DE ACCESO	CONDICIONES
LIMA- HUACHO	170	ASFALTADA	MUY BUENA
HUACHO-SAYAN	50	ASFALTADA	BUENA
SAYAN-CHURIN	61	AFIRMADA	REGULAR
CHURIN-OYON	74	ASFALTADA	BUENA
OYON - RAURA	60	AFIRMADA	BUENA

Vías de acceso Unidad Minera Raura.

4.1.3 GEOMORFOLOGÍA

Los rasgos geomorfológicos de la zona de estudio son el resultado de procesos tectónicos (plegamientos y sistemas de fallas), procesos exógenos (clima, precipitaciones pluviales, escorrentía superficial, etc.) y dada las

características de las diferentes unidades litológicas, se tiene como resultado una topografía agreste con zonas accidentadas y deprimidas producto de la acción de los fenómenos meteorológicos presentando también una delgada capa de suelo.

Las estructuras como fallas y pliegues, son las principales causantes de la forma del relieve actual, la zona de estudio se encuentra a pie de la Cordillera Raura que forma parte de la divisoria de aguas y estribaciones superiores de la Cordillera Occidental (4800 – 5685 msnm) y en la Región Puna (4300 – 4800 msnm).

La descripción regional de las unidades geomorfológicas se realizó en base a información levantada durante los trabajos de campo y a la información existente.

Unidades Geomorfológicas

Para la definición de las unidades geomorfológicas se consideró 2 grandes grupos:

- Geformas de carácter tectónico-degradacional.
- Geformas de Carácter deposicional.

Con este criterio se describe las siguientes unidades geomorfológicas:

Cordillera Raura

Constituyen las elevaciones topográficas más altas y resaltantes que forman parte de las cordilleras que en la parte superior de sus crestas contienen áreas con glaciares. Esta cadena de cerros en conjunto constituye la Cordillera Occidental y divisoria de aguas, donde se inicia las vertientes de Pacífico y del Atlántico. Estas cadenas de cerros generalmente están modeladas por rocas cretácicas y localmente en rocas volcánicas e intrusivas.

Sus configuraciones topográficas son accidentadas y distribuidas con formas predominantemente irregulares. Las laderas de esta cadena de cerros presentan pendientes variables, predominantemente pronunciadas a abruptas.

Valle Glaciar

Los valles en su mayoría de origen glaciar, constituyen las geoformas más resaltantes que existen en el área de estudio, estas han sido modeladas principalmente por los glaciares durante el pleistoceno, y algunos también tienen origen tectónico. En la zona de estudio los valles tienen diferentes orientaciones, siendo los principales: valle de laguna Tinquicocha, valle Gayco, valle Yanco, Shucshapac y otros valles menores como Santa Ana.

La mayoría de los valles drenan sus aguas hacia la vertiente del Atlántico y en menor porcentaje hacia el Pacífico.

Morrenas

Esta unidad comprende a geoformas convexas, suaves y alargadas producidas por la acumulación de materiales depositados por acción glaciar durante el Pleistoceno-Holoceno. Corresponde a coluviones de rocas con tamaños decimétricos, que responderían a procesos de desprendimientos, flujos y gelifracción (este último con generación de avalanchas de detritos).

Existen varios tipos de morrena de acuerdo a su posición frente a un glaciar; morrena de fondo es la que se sitúa en contacto con el lecho glaciar; morrena lateral, cuando se sitúa en las orillas o bordes del lecho glaciar; morrena central, formada por la unión de morrenas laterales en la confluencia de dos glaciares en un mismo valle; morrena frontal o terminal, cuando se sitúa en la zona de deshielo del glaciar.

Lomadas

Esta unidad agrupa a las superficies conformadas por lomas (con desniveles menores a 300 m), mesetas y pampas caracterizadas por su modelado suave. Estas superficies se ubican en los márgenes inmediatos a la zona donde existían glaciares, han sido formadas a causa de la alternancia periódica de procesos de hielo y de deshielo, y los efectos de la crioturbación, geliturbación, solifluxión y reptación.

Quebradas

En el área de la mina Raura existen numerosas depresiones por donde drenan las aguas de las lagunas y precipitaciones pluviales; tienen forma de U y localmente en forma de una V. Gran parte de estas Geo-formas fueron modelados en rocas calcáreas y algunas en rocas volcánicas. Asimismo, se pudo apreciar en algunas quebradas causes escalonados y con pronunciadas huellas del modelado glaciar y que el eje de las quebradas coincide con la traza de las fallas y/o contacto litológico.

4.1.4 GEOLOGIA

GEOLOGÍA REGIONAL

La secuencia estratigráfica en la zona de estudio comprende desde el Neoproterozoico, Paleozoico superior, Mesozoico – Cenozoico y Cuaternario.

El Neoproterozoico está constituido por el Complejo del Marañón formado por esquistos, filitas y pizarras ubicadas en la parte media y oriental de la Unión y NE de cuadrángulo de Yanahuanca, constituyendo la Cordillera Oriental.

El paleozoico superior está conformado por el Grupo Ambo y Mitu, sobreyaciendo discordantemente sobre el Complejo Marañón, estas unidades

no muestran mayor deformación y se les encuentran en amplios sinclinales (Llata y Margos). El Grupo Ambo constituido por areniscas pardo verdosas y material volcanoclástico, infrayace al grupo Mitu que presenta una secuencia donde se distinguen conglomerados, areniscas rojas y algunas andesitas. El Grupo Pucará también se presenta en estos sinclinales, así como en los alrededores de los pueblos de Yanahuanca y la Unión.

La Formación Oyón, mayormente constituida por rocas pelíticas y areniscas, representan al Titoniano – Valanginiano. Sobre la Formación Oyón se sitúa el Grupo Goyllarisquizga, mejor desarrollado en la parte central del Perú. A esta secuencia de areniscas y limoarcillitas le suprayacen las formaciones Pariahuanca, Chúlec, Pariatambo, Jumasha y Celendín, formadas esencialmente por calizas, margas y limoarcillitas que muestran un adelgazamiento hacia el Este.

El Cretáceo superior-Paleógeno consiste de capas rojas cartografiadas como Formación Casapalca, las que han sido deformadas con igual intensidad que la secuencia cretácica infrayacente. Inmediatamente después se emplazaron las diversas unidades del Batolito como un plutonismo post-tectónico.

Posteriormente, con el levantamiento andino (Fase Peruana), se acumuló el grupo Calipuy que actualmente forma la cordillera Negra y que consiste mayormente en piroclastos y algunas lavas y aglomerados andesíticos – dacíticos. Durante el Mioceno – Plioceno se han emplazado stocks graníticos y subvolcánicos porfiríticos en rocas del Grupo Calipuy y en las secuencias mesozoicas al Este del Batolito de la Cordillera Blanca, los que están asociados en algunos casos a yacimientos minerales.

La Formación Unión representa la erosión pleistocénica de las secuencias cretáceas y se depositó en las depresiones preexistentes que se localizan en La Unión Baños y Rondos.

GEOLOGÍA LOCAL

Las rocas sedimentarias que afloran en los alrededores de la Mina Raura, pertenecen a la secuencia estratigráfica del Cretáceo. Las más antiguas se exponen al suroeste y oeste las cuales pertenecen al Grupo Goyllarisquizga representada por la Formación Carhuaz. A éste sobreyace la Formación Chúlec, Pariatambo, Jumasha y Celendín. La Formación Jumasha ocupa la mayor área aflorante y es la más importante por que alberga los yacimientos mineros. Las unidades litológicas presentes en el área de estudio se muestran en la Figura 4.1. Por otro lado, para una mejor visualización de la secuencia de las formaciones geológicas y la disposición de las labores subterráneas de mina se muestran las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4, secciones geológicas A - A', y B - B' y C - C' respectivamente.

Fm. Carhuaz (Ki-ca)

Esta formación yace concordante sobre la Formación Santa y consiste principalmente de limoarcillitas, aunque pueden estar presentes capas de arenisca cuarzosas en la parte central de la unidad. Las limoarcillitas son principalmente de color gris a gris verdosa, con algunas intercalaciones de capas de yeso. Esta secuencia tiene 1000 m. de potencia aproximadamente y la morfología que caracteriza a esta formación es más suave en relación a las unidades adyacentes. La Formación Carhuaz es considerada de edad Hauteriviana - Barremiano.

Fm. Chúlec (Ki-ch)

La Formación descansa concordantemente sobre el Grupo Goyllarisquizga. Litológicamente consiste de calizas y margas. Las calizas son macizas con costras amarillas alteradas en capas de 1 m de espesor. En la región de la Cordillera de Huayhuash tiene una potencia de 50 m. Según los fósiles encontrados en la Formación Chúlec se le atribuye una edad correspondiente al Cretáceo inferior (Albiano medio).

Fm. Pariatambo (Ki-pt)

La Formación Pariatambo descansa concordantemente sobre la Formación Chúlec e infrayace a la Formación Jumasha. Consiste principalmente de margas de color marrón oscuro y calizas marrón oscuras que tiene un olor fétido y se presenta en capas delgadas. Esta formación tiene una potencia de 100 m que se mantiene regularmente constante, pero hacia el eje de la cuenca es ligeramente más grueso, alcanzando una potencia de 500 m. en la zona de la Cordillera de Huayhuash. Esta formación contiene una fauna abundante, perteneciente al Cretáceo inferior (Albiano medio).

Fm. Jumasha (Ks-jm)

Sobreyace concordante a la Formación Pariatambo e infrayace concordante a la Formación Celendín. El grosor en algunas zonas excede los 1000 m aproximadamente. Según su litología presenta una estratificación regularmente maciza de calizas grises en estratos de 1 a 2 m. La Formación Jumasha constituye una de las unidades más importantes y características en los Andes Centrales. Se ha observado que se conservan en los núcleos de los sinclinales y forman cadenas de elevaciones muy conspicuas, tal como la Cordillera de Huayhuash. Las calizas se describen como micritas y biomicritas con una buena proporción de material limoarcilloso. La

Formación Jumasha es pobremente fosilífera, pero su rango va del Albiano superior al Turoniano (Cretáceo superior).

En los alrededores de la mina afloran las calizas de esta formación, en contacto con las Formación Carhuaz, por sobreescurreamiento, los estratos de la Formación Jumasha presentan un rumbo en el sentido de plegamiento regional N030W. Por efecto de la intrusión granodiorítica, las calizas presentan diferentes grados de alteración que va de calizas frescas a granatización (Skarn) pasando por marmolización, silicificación y epidotización.

Fm. Celendín (Ks-ce)

Esta unidad sobreyace concordantemente a la Formación Jumasha e infrayace a la Formación Casapalca, estableciéndose un pase rápido de una secuencia netamente marina a las capas rojas continentales. La formación consiste de calizas margosas nodulares, pobremente estratificadas, algo homogéneas con presencia de fósiles, con coloración amarillo grisácea. Se intercalan con las calizas, estratos de limoarcillitas grises y margas.

A la Formación Celendín se le encuentra en los núcleos de sinclinales de rumbo NO-SE que se ubican en la Cordillera de Raura. Se le define una potencia de 500 m. aproximadamente, aflorando al noreste de la falla Chonta. La fauna presente en la Formación Celendín es indicativa del Coniaciano al Santoniano (Cretáceo superior).

Fm. Casapalca (KsT-ca)

Sobreyace concordantemente a la Formación Celendín. Su afloramiento se le encuentra al este de la falla Chonta en estructuras sinclinales y un frecuente contacto fallado con las areniscas del Cretáceo inferior. La litología consiste

de areniscas rojas friables, margas, lodolitas y conglomerados que tienen un color rojo característico. Puede llegar a tener un grosor de 600 m. aproximadamente. También se observan areniscas y lodolitas rojas, siendo de aguas deltaicas de poca profundidad o depósitos continentales. A la unidad de capas rojas continentales y en base a las algas carofitas se le asigna una edad Cretáceo superior posterior al Paleógeno temprano.

Volcánico Raura (T-vr)

El Volcánico Raura está compuesto de flujos riolíticos y tobas litocristalinas de composición dacítica a riodacítica (Uribe, E., Zapana. E., 2012). Esta unidad local aflora al parecer en contacto erosivo sobre las calizas Jumasha. Se ubican en la zona SE de la Unidad Minera, asimismo en la zona central del cuerpo mineralizado se encuentra en contacto con las rocas intrusivas granodioríticas. La edad aproximada de estas rocas volcánicas data del Mioceno.

Depósitos Morrénicos (Q-mo)

En la microcuenca Putusay y en la zona de Nieve Ucro se presentan tanto morrenas laterales como terminales, las cuales están constituidas por material grueso en una matriz fina. Los depósitos morrénicos se consideran como el resultado de la glaciación pleistocénica y se diferencia de los depósitos morrénicos recientes por presentar formas de crestas o depósitos alargados e inconsolidados.

Depósitos Coluviales (Q-co)

Los depósitos coluviales están compuestos por fragmentos angulosos que se acumulan regularmente en los taludes adyacentes a los macizos rocosos, con tamaño y formas variables dependientes de la roca madre. En algunas zonas

se evidencian fragmentos angulosos con fracciones de limoarcillas y arena distribuidos irregularmente.

Nevados Perpetuos (Q-nv)

Estos nevados se encuentran en forma discontinua en las diferentes áreas de la U.M. Raura y con mayor propagación en las áreas adyacentes a las lagunas. La nieve que permanece y se acumula bordea entre los 5,000 y 5,200 msnm. Los principales glaciares presentes en la Unidad Minera Raura son: Glaciar Brazzini, Glaciar Patrón, Glaciar Niño Perdido-Gayco, Glaciar Niño Perdido, Glaciar Niño, Perdido-Virgen de las Nieves, Glaciar Siete Caballeros y Glaciar Santa Rosa. Se les asigna una edad Pleistocénica.

Rocas Intrusivas

En la Unidad Minera Raura se encuentra un stock de 6 km² que se emplazó dentro del anticlinal que corta las calizas Jumasha, las que han sido alteradas en el contacto, formándose el proceso de marmolización. El intrusivo es complejo, tiene un marcado diaclasamiento planar paralelo al techo de la intrusión el cual se aproxima a roca volcánica. El material pseudo volcánico es cortado por diques de diorita y pórfido dacítico, además ha sido cortado por un cuerpo de tonalita que contiene pirita diseminada. Grandes bloques de calizas de la Formación Jumasha han sido encontrados dentro de los intrusivos y las zonas de contacto ligeramente alterados.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En la Unidad Minera Raura se han reconocido tres fases de plegamiento producto del proceso tectónico compresional, y entre cada periodo hubo un proceso tensional a lo largo del eje SW-NE. La zona de estudio está controlada por el sistema de fallas de la Cordillera Blanca.

Teniendo como patrón estructural la cadena de montañas de los Andes centrales, en el cretácico superior (fase Inca) se dieron etapas de plegamiento, fallamiento y plutonismo como producto de los esfuerzos de compresión (SW-NE) en la zona de Raura. Las estructuras principales de plegamientos están representadas por el anticlinal Santa Ana y el sinclinal Caballococha que son los más importantes del área, con rumbo N 020-030 W, produciendo fallas y sobre escurrimientos en la misma dirección, siendo la falla Chonta la que representa este evento, colocando en contacto a las arenisca y cuarcitas del Grupo Goyllarisquizga con las calizas de la Formación Jumasha.

Se han producido varios sistemas de fracturación N65°- 80°W (vetas Gianina, Abundancia, Roxana, Torre de Cristal, Flor de Loto). El fallamiento local en bloques es un patrón estructural importante en la zona de Catuva. Dos sistemas de fallas regionales de gran ángulo están cortando y atravesando las calizas Jumasha:

- El primer sistema N-NW, 70° SW, el más antiguo, inverso y longitudinal, controla aparentemente los stocks elongados de granodiorita y de monzonita de 10 Ma. Las fallas principales son Restauradora, Raura, Caballococha, Chonta y Gayco.
- El segundo sistema W-NW, 70° SW, el más reciente, transversal, sinistral y tensional, aloja a los diques pórfido cuarcíferos, que espacialmente están asociados a los cuerpos de skarn de Zn-Pb (Ag, Cu) tales como Ofelia y Cobriza y vetas polimetálicas, respectivamente. Sin embargo, algunas fallas longitudinales de gran ángulo y de pocos metros de desplazamiento inverso, como las fallas Raura y Restauradora, se comportan tan igual que las fallas transversales controlando tanto el cuerpo de skarn de Zn-Pb como

el cuerpo Balilla y el gran cuerpo Niño Perdido - Catuva - Betsheva - primavera, respectivamente (Golder Associates, 2012).

Cabe mencionar que la falla Flor de Loto de sentido SW-NE, ubicada en la parte noroeste de la zona de estudio, es una de las estructuras geológicas principales de Raura. Su potencia en interior mina se logra apreciar en galerías de mayor profundidad, cortando principalmente a las calizas de la Formación Jumasha y Celendín. Al parecer, es un nexo en toda la red de fallas inversas las cuales transitan flujos subterráneos culminando en Flor de Loto. Estructuralmente, la zona de estudio es compleja, las principales fallas son: Virgen de las Nieves, Matapaloma, Esperanza, Restauradora, Chonta, Puyhuancocha, Raura, Tinquicocha, Santa Rosa, Yerupaja, Brazzini, Putusay Alto, Putusay Bajo y Quichas. Del mismo modo, se ha identificado el Anticlinal Raura y Caudalosa y el Sinclinal Caballococha. Estas fallas de orden regional en algunos casos, juegan un papel importante en la mineralización de la unidad, mayormente de sentido inverso.

Como parte del análisis estructural de la zona de estudio, se ha elaborado tres secciones geológicas. En la sección geológica A-A´ trazada en sentido NW-SE se observa la falla principal Flor de Loto que llega hasta los niveles inferiores. Los cuerpos de mineral están bordeados principalmente por calizas de la Formación Jumasha, así como por los intrusivos granodioríticos, los cuales por alteración de la roca con las calizas han formado el proceso de marmolización y skarn. La sección geológica B-B´ ubicada en sentido SO-NE se observa el proceso de tectonismo presentando un plegamiento principal que ha generado anticlinales y sinclinales, responsables del desplazamiento estructural de las calizas de la Formación Jumasha. Asimismo, la sección C-

C' fue elaborada de NO-SE, siendo la que muestra en su mayor extensión los diferentes niveles y en donde la intrusión de la granodiorita y diorita es mejor mostrada, está claro que el intrusivo aprovechó las fallas existentes (intruir a las calizas) y además de ser responsable de la mineralización y marmolización, generó nuevas zonas de fracturas y fallas menores.

4.2 PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

INVESTIGACION HIDROGEOLOGICA

En base a la información recopilada de la geología de la zona de estudio y durante la fase de campo se realizó un mapeo geomecánico, a fin de contribuir con la elaboración de estereogramas que definen el control estructural y el sistema de familias referentes a las fracturas de la zona. Asimismo, se realizó estereogramas para cada litología (formación geológica) a fin de obtener estereogramas sintéticos y sistemas de fracturación promedio para cada grupo litológico de interés. Para el análisis de la fracturación se han utilizado diagramas beta o círculos máximos, representando los elementos planos, en este caso estratos y fracturas; un diagrama de densidad de polos; y un diagrama de rosetas.

La caracterización de las fracturas da como resultados 2 a 3 sistemas de familias de fracturación para cada tipo de litología. La Tabla muestra un resumen de los principales sistemas de fracturas.

Formación Litológica	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Fm. Jumasha	N319E / 72NE	N345E / 55NE	N027E / 82NW
Intrusivo Dacítico	N030E / 11SE	N282E / 70NE	
Fm. Celendín	N078E / 54SE	N279E / 81NE	
Volcánico Raura	N075E / 33NW	N068E / 61SE	

Tabla Resumen Principales sistemas de Fracturación

De acuerdo a los resultados obtenidos sobre los sistemas de fracturación para las diferentes litologías, se realizó una evaluación de la distribución de discontinuidades que se mencionan a continuación:

- En la Formación Jumasha se encuentran 3 sistemas principales de fracturación:
 - El sistema 1, posee una dirección de 319° y un buzamiento de 72° hacia el NE.
 - El sistema 2, posee una dirección de 345° y un buzamiento de 55° al NE.
 - El sistema 3, posee una dirección de 027° y un buzamiento de 82° al NW.
- El Intrusivo Dacítico posee 2 sistemas principales de fracturación:
 - El sistema 1, posee una dirección de 030° y buza 11° hacia el SE.
 - El sistema 2, posee una dirección de 282° y buza 70° hacia el NE.
- La Formación Celendín posee 2 sistemas principales de fracturación:
 - El sistema 1, posee una dirección de 078° y un buzamiento de 54° al SE.
 - El sistema 2, posee una dirección de 279° y un buzamiento de 81° al NE
- En el macizo rocoso del Volcánico Raura se encuentra 2 sistemas principales de fracturación:
 - El sistema 1, posee una dirección de 075° y buza 33° hacia el NW.
 - El sistema 2, posee una dirección de 068° y buza 61° hacia el SE.

La apertura, extensión y frecuencia de las fracturas se convierten en aspectos fundamentales al momento de caracterizar el macizo rocoso y su relación directa con el movimiento del flujo subterráneo. Otro parámetro aún más importante es el tipo de material que rellena las fracturas, ya que de ello depende la cantidad de flujo de agua que circula. Los medios fracturados, se caracterizan por presentar, en superficie, fracturas de mayor frecuencia y de mayor apertura, mientras que en profundidad las fracturas disminuyen su frecuencia y apertura.

La Formación Jumasha conformado por calizas se caracteriza por presentar fracturas con apertura de 0.5 a 2.5 milímetros y como material de relleno óxidos y poco de finos. Por otro lado, el espaciamiento de las discontinuidades se encuentra en el rango de 0.3 a 1 metro con persistencia de 2 a 16 metros. Cabe mencionar que la Formación Jumasha ocupa una gran extensión en la zona de estudio y es la roca caja de la mineralización, por ende, está fuertemente fracturada y alterada.

El macizo rocoso conformado por las rocas intrusivas de composición dacítica se caracteriza por presentar fracturas con apertura 0.5 a 2.5 milímetros principalmente y relleno de las mismas compuesto por finos y óxidos. Asimismo, el espaciamiento de las discontinuidades se encuentra en el rango de 0.3 a 3 metros con persistencia menores a 15 metros.

La Formación Celendín conformada por calizas se caracteriza por presentar estructuras o fracturas con apertura de 0.5 a 10 milímetros rellenas de material orgánico y óxidos, asimismo las discontinuidades poseen un espaciamiento de 0.3 a 1 metros con una persistencia del orden de 1 a 15 metros.

El macizo rocoso conformado por las rocas volcánicas se caracteriza por presentar mayor densidad de fracturas y con aperturas entre 0.5 a 3 milímetros rellenas de material arcilloso, también posee un espaciamiento de 0.3 a 1 metro con persistencia en el rango de 10 a 20 metros. Cabe mencionar que en todas las discontinuidades mapeadas se evidencia de presencia de agua (filtraciones).

En síntesis, sobre la base de la dinámica estructural de la zona de estudio, el cual comprende de principales fallas, como la falla Flor de Loto, Oblicua, Matapaloma, Santa Rosa, Farallón y Raura son favorables para que movimiento del flujo subterráneo desde las partes altas (zonas de nevados) hacia las labores de interior

mina. Durante las tareas de mapeo de filtraciones y aforos en interior mina se pudo constatar lo anteriormente mencionado.

Hidrografía Local

Morfológicamente, la zona en estudio se ubica cerca de la Cordillera Raura, región andina conformada por antiguos circos glaciares, formaciones que permiten la acumulación superficial de agua estacional proveniente del deshielo y la precipitación.

El límite del área de estudio está definido por las microcuencas involucradas con el área de influencia del proyecto. Se divide en dos sectores, como ya se mencionó, la primera que vierte sus aguas en el Pacífico (incluye 2 microcuencas), y la segunda que vierte en el Atlántico (incluye 7 microcuencas).

Se consideran microcuencas a las áreas de drenaje mínimas de división para el análisis hidrológico y sus límites se definieron en base al área aportante a cada una de las principales lagunas de la zona. En lo que respecta a la generación de escorrentía superficial y de acuerdo con la morfología andina descrita anteriormente, dentro de las microcuencas se presentan áreas de drenaje endorreicas, las cuales se interconectan por rebose para el caso de eventos milenarios, por lo que dichas microcuencas no presentan flujos de descarga continuos a lo largo del año. Cabe indicar también que algunas de estas microcuencas presentan lagunas en las salidas de las mismas, por lo que el proceso de contribución de caudal cuando se presentan los reboses, atenúa los hidrogramas de salida para cada microcuenca.

Sector	Microcuenca (Laguna)	Clasificación
Vertiente del Atlántico	Santa Ana	Exorreica
	Puyhuancocha	Endorreica
	Caballococha	Exorreica
	Tinquicocha	Exorreica
	Chuspicocha	Exorreica
	Gayco	Exorreica
	Patarcocha	Exorreica
Vertiente del Pacífico	Putusay	Endorreica
	Rupahuay	Exorreica

La Tabla microcuencas de análisis presenta las Microcuencas consideradas, su clasificación y el sector al que pertenecen.

La Figura Diagrama de flujo de los cursos principales, muestra el diagrama de flujo de los cursos de agua y componentes principales en el área de estudio. En la Tabla microcuencas de análisis se ha dividido la zona de estudio en dos grupos de acuerdo a la vertiente de descarga final. La Figura Hidrografía local muestra el esquema de las microcuencas delimitadas y las vertientes correspondientes.

- Sector de la Vertiente del Atlántico: Es el sector de mayor extensión con 64 km² de área, ubicado en la parte Norte del área de estudio, formando parte de la cabecera del río Marañón. Como componentes se ubican la mayoría de botaderos: Niñococha, Raurapata, Niño Perdido, Hidro, Brunilda, entre otros, también la relavera subacuática Caballococha y las relaveras Nieve Ucro I y la relavera reciente Nieve Ucro II, además se tienen a las bocaminas: Catuva, Esperanza, Abra, Gayco, entre otros, las plantas de tratamiento Hidro, Santa Ana y Tinquicocha, asimismo la planta concentradora de relaves. El punto de salida de este sector es la laguna Patarcocha ubicada en la microcuenca del mismo nombre.
- Sector de la Vertiente del Pacífico: Con un área de 16 km², está ubicado en la parte Sur del área de estudio, formando parte de la cabecera del río Quichas. Los componentes mineros ubicados en este sector son: los botaderos Shucshapac y

Yanco, algunas bocaminas y la Planta de tratamiento Shucshapac. La descarga final de este sector es la laguna Rupahuay ubicada en la microcuenca del mismo nombre.

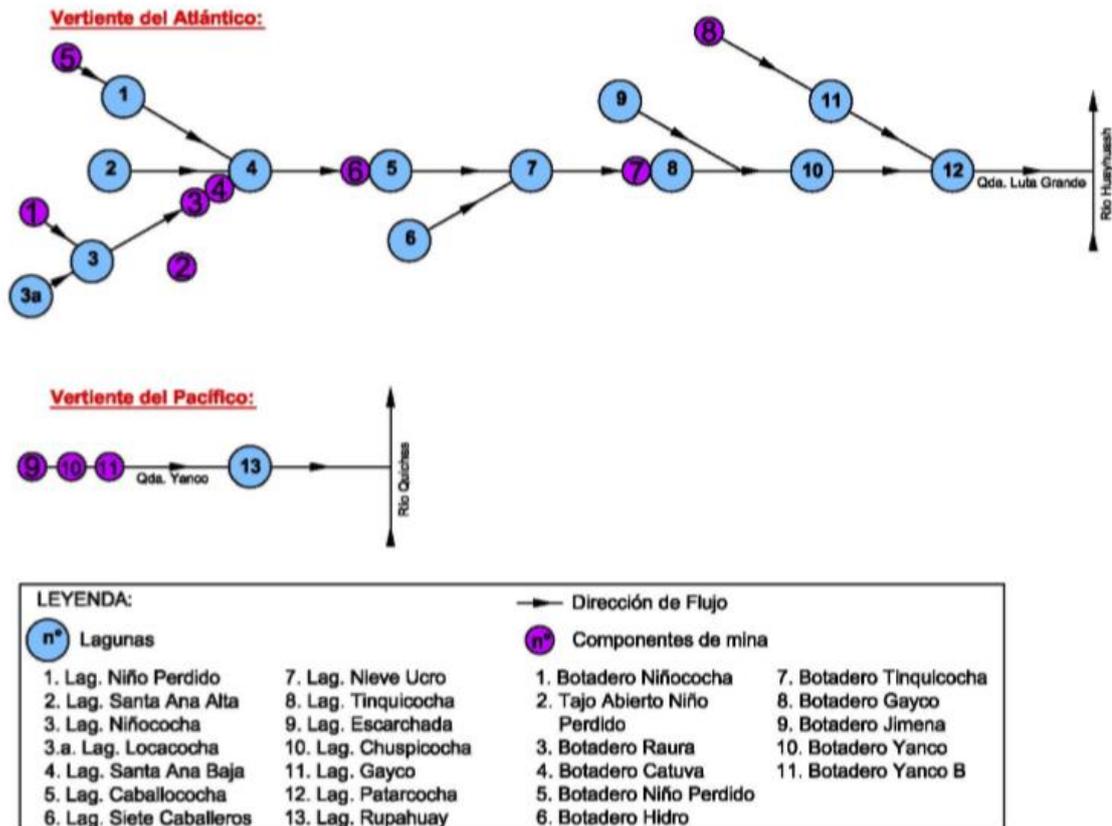


Diagrama de Flujo de los cursos principales en el ámbito de estudio

Descripción geomorfológica del ámbito de estudio

Las microcuencas de estudio presentan áreas que varían desde los 4 km² hasta los 16 km² de extensión (ver Tabla Parámetros de forma de las Áreas de Drenaje en estudio), las áreas de las lagunas varían desde las más pequeñas e intermitentes hasta la laguna de salida final más grande Patarcocha que tiene un área de 2.1 km². Con respecto a los cauces principales de cada una de las microcuencas del área de estudio, están representados por pequeños flujos naturales y artificiales y que de manera estacional conducen agua de una laguna a otra, a excepción de cuatro conexiones que presentan un flujo permanente y conforman lechos fluviales.

El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (K_c) de las microcuencas describe su geometría y está estrechamente relacionada con el tiempo de concentración del sistema hídrico. Cuando el valor tiende a la unidad ($K_c=1$), la cuenca es circular y presenta un tiempo de concentración menor con mayor tendencia a las crecientes; cuando el valor tiende a 2 ($K_c=2$), la cuenca tiene una forma alargada, con mayores tiempos de concentración y menor tendencia a las crecientes. Para el caso de las microcuencas en análisis se presentan valores que van desde 1.20 a 1.52, los cuales están cercanos a la unidad, indicando que las áreas de drenaje presentarán un comportamiento de forma aproximadamente circular, pudiendo contribuir en mayor grado a las crecientes.

El área de estudio presenta variaciones altitudinales que va desde los 4024 hasta los 5618 msnm, con una altitud media aproximada de 4680 msnm (Ver Tabla Parámetros de relieve de las Áreas de Drenaje en Estudio)

Del análisis de las curvas obtenidas para las microcuencas, se puede inferir que, con respecto al ciclo erosivo, gran parte de ellas se encuentran en una etapa de transición, alcanzando en su mayoría una etapa de equilibrio, (Microcuencas geológicamente maduras).

En lo que respecta a los parámetros de drenaje, uno de los parámetros más representativos es la densidad de drenaje de las microcuencas. Según Monsalve S.G. (1999), la densidad de drenaje usualmente toma los siguientes valores:

- Entre 0.5 km/km², para cuencas con drenaje pobre.
- Hasta 3.5 km/km², para cuencas excepcionalmente bien drenadas.

Para el caso de la morfología de la zona de estudio no se presentan corrientes de agua con flujo significativo por ende la zona es considerada de drenaje pobre, mostrando valores de 0.3 km/km², hasta un máximo de 1.2 km/km².

En relación a la inclinación del área de estudio, la pendiente media de las áreas de análisis presenta valores de 54% por la zona de la vertiente del Atlántico y de 65% por la zona del Pacífico, valores altos que indican que el agua que discurre por la superficie lo hace con mayor velocidad que en una zona relativamente plana, produciendo efectos erosivos en el terreno.

El resumen los parámetros geomorfológicos de forma, relieve y drenaje para todas las microcuencas de análisis se aprecian en la Tabla Parámetros de forma de las Áreas de Drenaje en estudio, Tabla Parámetros de relieve de las Áreas de Drenaje en Estudio y Tabla Parámetros de drenaje de las Áreas de Drenaje en Estudio.

Caracterización geomorfológica del ámbito de estudio

- Parámetros de Forma de las áreas de Drenaje

El contorno de la microcuenca define la forma y superficie de esta, lo cual posee incidencia en el tiempo de respuesta, en lo que respecta al caudal evacuado. Así una cuenca alargada tendrá un diferente tiempo de concentración que una circular, al igual que el escurrimiento manifestará condiciones disímiles. En una cuenca circular, el agua recorre cauces secundarios antes de llegar a uno principal, en una cuenca alargada se presenta en general un solo cauce que es el principal y por ende el tiempo de concentración será menor que el caso anterior.

Los principales parámetros que se forman de las microcuencas en estudio por sectores, se detallan en la Tabla.

Parámetros de forma de las Áreas de Drenaje en estudio

Sector	Microcuenca (Laguna)	Parámetros de Forma								
		Área (Km ²)	Perímetro (Km)	Longitud de cauce principal (Km)	Ancho Promedio de la cuenca (Km)	Coef de compacidad	Factor de forma	Razón de Circularidad (Rc)	Rectángulo Equivalente	
									Lado Mayor (km)	Lado Menor (km)
Vertiente del Atlántico	Santa Ana	7.77	11.89	2.59	3.00	1.20	1.16	0.69	4.01	1.94
	Puyhuancocha (*)	5.12	10.57	--	--	1.32	--	0.58	4.01	1.28
	Cabalcocha	1.69	6.21	3.53	0.48	1.35	0.14	0.55	2.40	0.70
	Tinquicocha	12.44	18.96	6.78	1.84	1.52	0.27	0.44	7.90	1.57
	Chuspicocha	10.76	14.46	9.67	1.11	1.24	0.12	0.65	5.13	2.10
	Gayco	10.30	15.23	3.77	2.73	1.34	0.72	0.56	5.86	1.76
Vertiente del Pacífico	Patarcocha	16.02	19.53	12.85	1.25	1.38	0.10	0.53	7.68	2.09
	Putusay (*)	4.33	10.12	--	--	1.37	--	0.53	3.97	1.09
	Rupahuay	11.59	15.40	3.82	3.04	1.28	0.80	0.61	5.65	2.05

*Microcuencas endorreicas.

- **Parámetros de Relieve de las Áreas de Drenaje**

El relieve posee una incidencia más fuerte en la escorrentía que la forma, dado que a una mayor pendiente corresponderá un menor tiempo de concentración de las aguas en la red de drenaje y afluentes al curso principal. Es así como a una mayor pendiente corresponderá una menor duración de la concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal. Los parámetros de relieve tienen mayor influencia sobre la respuesta hidrológica de la cuenca. Las relaciones área - elevación (Curvas hipsométricas) han sido determinados por las curvas y alturas características de las microcuencas.

Para describir el relieve de una cuenca existen numerosos parámetros que han sido desarrollados por varios autores, entre los más utilizados destacan:

- Altitud máxima de la microcuenca (msnm).
- Altitud mínima de la microcuenca (msnm).
- Altitud media (msnm).
- Pendiente media del cauce principal. (Taylor y Schwarz).
- Pendiente media de la microcuenca.
- Índice de Pendiente.

Las altitudes medias son resultado de las curvas hipsométricas, cuyos valores se extraen del 50% del área acumulada de la microcuenca. La Tabla muestra el resumen de los parámetros de relieve de las microcuencas en estudio.

Parámetros de relieve de las Áreas de Drenaje en Estudio

Parámetros de Relieve de la cuenca							
Sector	Punto de Evaluación	Altitud máxima (msnm)	Altitud mínima (msnm)	Altitud media (msnm)	Pendiente del cauce principal (%)	Pendiente media de la Microcuenca (%)	índice de Pendiente
Vertiente del Atlántico	Santa Ana	5566	4618	4873	--	57.3	15.4
	Puyhuancocha (*)	5308	4600	4807	--	44.8	13.3
	Caballococha	5566	4548	4835	--	54.6	20.6
	Tinquicocha	5566	4322	4765	--	52.8	12.5
	Chuspicocha	5566	4127	4695	9.74	53.7	16.7
	Gayco	5594	4430	4805	4.24	72.0	14.1
	Patarcocha	5594	4024	4652	10.4	53.6	14.3
Vertiente del Pacífico	Putusay (*)	5477	4609	4817	--	60.0	14.8
	Rupahuay	5618	4245	4651	14.81	64.9	15.6

*Microcuencas endorreicas

- Parámetros de drenaje de las Áreas de Drenaje

La red hidrográfica corresponde al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales, hipodérmicos y subterráneos de la cuenca. La red de drenaje es probablemente, uno de los factores más importantes a la hora de definir un área de estudio.

Diversos autores coinciden en afirmar que mientras mayor sea el grado de bifurcación del sistema de drenaje de una cuenca, es decir, entre más corrientes tributarias presente, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. En efecto, al presentar una densa red de drenaje, una gota de lluvia deberá recorrer una menor longitud de ladera, realizando la mayor parte del recorrido a lo largo de los cauces, donde la velocidad del escurrimiento es mayor.

En virtud a lo anterior, se han propuesto una serie de indicadores para evaluar el grado de bifurcación, como la densidad de corrientes y la densidad de drenaje. Para analizar la red de drenaje de las microcuencas en estudio, se han usado los siguientes parámetros:

- Número de orden de corriente.
- Número de corrientes (Perennes e intermitentes).

- Longitud total de las corrientes.
- Densidad de drenaje.
- Tiempo de concentración (Fórmulas Empíricas).

La Tabla Parámetros de drenaje de las Áreas de Drenaje en Estudio muestra el resumen de los parámetros de drenaje estimados para todas las microcuencas del área de estudio.

Parámetros de drenaje de las Áreas de Drenaje en Estudio

Parámetros de Drenaje									
Sector	Punto de Evaluación	N° Orden de Corriente	Número de Corrientes (Perennes e Intermitentes)	Longitud total de las corrientes (Km)	Densidad de drenaje Km/Km ²	Densidad de Corriente	Tiempo de Concentración		
							Kirpich (1940) (min)	California Culverts Practice (1942) (min)	Bransby - Williams (min)
Vertiente del Atlántico	Santa Ana	1	3	4.62	0.6	0.4	10.3	12.2	34.5
	Puyhuancocha (*)	--	--	--	--	--	--	--	--
	Cabalcocha	1	1	5.56	3.3	0.6	13.3	17.0	55.3
	Tinquicocha	1	1	8.81	0.7	0.1	22.2	33.4	87.4
	Chuspicocha	1	1	12.95	1.2	0.1	29.0	47.6	126.1
	Gayco	1	1	3.77	0.4	0.1	12.5	17.4	46.6
	Patarcocha	1	3	23.18	1.4	0.2	36.1	63.9	161.1
Vertiente del Pacífico	Putusay (*)	--	--	--	--	--	--	--	--
	Rupahuay	1	1	3.82	0.3	0.1	13.2	16.6	47.6

* Microcuencas endorreicas.

HIDROGEOLOGÍA

Propiedades Hidráulicas

Durante la etapa de perforación se ejecutaron ensayos Lugeon, posteriormente una vez instalados los piezómetros se realizó ensayos de recuperación y pruebas de bombeo de bajo caudal, con la finalidad de obtener las propiedades hidráulicas de los materiales perforados. En Anexos, se muestra una descripción de todas las pruebas, así como tablas resumen con los resultados calculados.

Las pruebas de Lugeon fueron realizados durante los trabajos de perforación y se llevaron a cabo en los sondajes AMP-02, AMP-03 y AMP-04. Estas pruebas se ejecutaron a diferentes profundidades tomando como cota cero (nivel de referencia)

el nivel 200. Los intervalos de ensayo corresponden a tramos de roca de fracturación moderada (no se consideraron aquellos tramos con alta fracturación por no ser parte del objetivo de las pruebas Lugeon).

La interpretación de los parámetros hidráulicos de las pruebas realizadas después de la instalación de los piezómetros, fue llevada a cabo mediante el empleo del programa analítico Aqtesolv (HydroSOLVE, 2008). Los datos de los ensayos han sido analizados mediante soluciones analíticas convencionales que gobiernan el flujo de agua subterránea. La homogeneidad y espesor constante del acuífero son hipótesis que se adoptan para el entorno del piezómetro ensayado en base al espesor saturado en relación con el paquete de gravilla instalada en el espacio ranurado.

Conductividad Hidráulica

Para la determinación de la conductividad hidráulica se emplearon diferentes soluciones analíticas, tales como Theis (1935), Theis (1935) residual drawdown/recovery, Cooper-Jacob (1946) y Hantush, siendo utilizados convenientemente para cada caso en particular.

Se dispone de un total de 08 pruebas hidráulicas, todas realizadas en macizo rocoso.

Un detalle de la distribución de las pruebas hidráulicas se detalla a continuación:

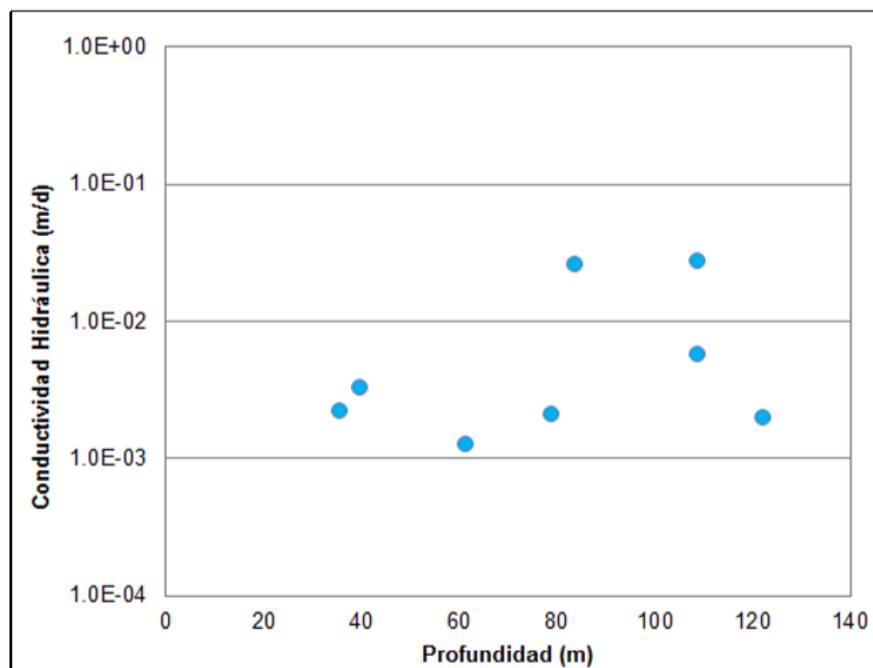
- Cinco pruebas de Lugeón durante la perforación de los sondeos: AMP-02 (02 ensayos), AMP-03 (01 ensayo) y AMP-04 (02 ensayos).
- Una prueba de recuperación realizada en el piezómetro AMP-02.
- Dos pruebas de bombeo de bajo caudal en los piezómetros AMP-01 y AMP-02.

Las pruebas hidráulicas mencionadas en líneas anteriores fueron realizadas en rocas (Dacita, Skarn, Mármol y Granodiorita) que se sitúan por debajo del nivel 200 y que se encuentran en las zonas aledañas a los cuerpos mineralizados y vetas de la

mina Raura. El valor de permeabilidad para estas rocas varía entre 2.5×10^{-2} m/d y 2.1×10^{-3} m/d.

Estos valores han sido obtenidos realizando pruebas hidráulicas descritas previamente en los sondeos y piezómetros con intervalos de ensayo puntuales. Este hecho implica que el valor de permeabilidad obtenido, hace referencia a los materiales del entorno en el piezómetro. No obstante, no se tienen los valores de permeabilidad o transmisividad efectiva a escala de acuífero y/o macizo.

Con los valores de permeabilidad calculados, se realizó un análisis de variación de la conductividad hidráulicas en relación con la profundidad. Está claro que, a una profundidad mayor a 700 m. con respecto a la superficie topográfica, la permeabilidad no presenta una relación inversamente proporcional con el aumento de la profundidad, dado que a esas profundidades el comportamiento estructural del macizo es cuasi-uniforme (ver Figura Parámetros Hidráulicos en profundidad). Lo mismo no ocurre para las primeras centenas de metros, ya que el grado de fracturación es mayor mientras más cerca de la superficie topográfica se sitúe.



Parámetros Hidráulicos en profundidad.

Coefficiente de Almacenamiento

No se han obtenido valores de coeficiente de almacenamiento, dado que no se realizaron ensayos de bombeo con piezómetros de observación (pruebas de bombeo integrales). Sin embargo, en base a la experiencia en lugares con similares características litológicas, se espera que el coeficiente de almacenamiento en el macizo rocoso pueda variar entre 1×10^{-3} y 1×10^{-5} dependiendo del grado de fracturación (mayor cuanto más próximo esté a la superficie). Asimismo, para los materiales Aluviales ubicados en el fondo de valle, se considera que tienen un comportamiento de acuífero poroso y se espera que sea superior a 1×10^{-3} dependiendo del grado de semi-confinamiento del acuífero.

Unidades Hidrogeológicas (UH's)

En base al contexto geológico interpretado de la zona de estudio se ha llevado a cabo una caracterización hidrogeológica detallada en función al análisis estructural principal y litologías similares que tengan la misma distribución hidráulica. Es por ello, que mediante la discretización geológica se realiza una síntesis de las formaciones presentes, agrupado en Unidades Hidrogeológicas.

Dentro del dominio de estudio se han identificado seis (06) principales unidades hidrogeológicas (UH). Entre ellas se distinguen: las sedimentarias compuestas por calizas y areniscas, detríticos como parte del material cuaternario, los intrusivos granodioríticos y dioríticos, las rocas de origen volcánico y brechas.

La Tabla Resumen de Unidades Hidrogeológicas muestra un resumen de las unidades hidrogeológicas en referencia a sus parámetros hidráulicos, y la Figura Unidades hidrogeológicas muestra la disposición de las unidades hidrogeológicas identificadas espacialmente.

Resumen de Unidades Hidrogeológicas

Unidad Hidrogeológica	Descripción Litológica	Unidades Geológicas	Descripción Hidrogeológica	Tipo de Acuífero (*)
UH Detrítica 1	Material arenoso con presencia de material fino, con fragmentos angulosos de edad Cuaternaria.	Depósito Coluvial.	Conductividad hidráulica media a baja condicionada al tamaño de la matriz. La permeabilidad puede variar entre 1×10^{-1} y 1×10^{-2} m/d.	Medio poroso
UH Detrítica 2	Material fino: arcillas y limos con intercalaciones de arenas con materiales gruesos heterogéneos de edad Cuaternaria.	Depósito Morrénico.	Conductividad hidráulica baja debido a su matriz fina. Presenta una permeabilidad inferior a 1×10^{-2} m/d.	Medio poroso
UH Sedimentaria 1	Material compuesto por areniscas cuarzosas intercaladas con limoarcillitas de edad Cretácica.	Fm. Carhuaz y Fm. Casapalca.	Conductividad hidráulica moderadamente permeable y coeficientes de almacenamiento superiores a 1×10^{-4} .	Medio fracturado
UH Sedimentaria 2	Material compuesto por calizas y margas, altamente fracturados de edad Cretácica.	Fm. Pariatambo, Fm. Celendín, Fm. Jumasha, Fm. Chúlec y Marmolización.	Conductividad hidráulica media a alta y coeficientes de almacenamiento superiores a 1×10^{-3} .	Medio fracturado
UH Intrusiva	Rocas ígneas de origen plutónico compuestos por cuarzo y feldespatos Cretácicas – Miocénicas.	Granodiorita y Diorita.	Conductividad hidráulica media a baja condicionada al grado de fracturación y relleno de fracturas. La permeabilidad varían entre 2.5×10^{-2} y 2.1×10^{-3} m/d.	Medio fracturado
UH Volcánica	Rocas de origen volcánico extrusivo de edad Miocénica.	Volcánico Raura y Brechas Volcánicas.	Conductividad hidráulica alta asociada al grado de fracturación, sobre todo en los primeros metros.	Medio fracturado

Nota:

1 (*) Clasificación según sus características litológicas

- Unidad Hidrogeológica Detrítica 1

La UH Detrítica 1 está constituida por material coluvial con granulometría del tipo grava arcillosa, arena y limo, en general trabajados acordes a una dinámica erosiva de formaciones antiguas. La conductividad hidráulica para esta UH es muy variable dependiendo de la granulometría de la matriz, y que muy común pueden variar entre 1×10^{-1} y 1×10^{-2} m/d.

Dada su naturaleza de formación como producto de la erosión de rocas antiguas, se ubican en las zonas aledañas a las lagunas y a los pies de las montañas.

- Unidad Hidrogeológica Detrítica 2

Esta unidad está representada por depósitos morrénicos cuaternarios, con características heterogéneas compuesto de materiales finos mezclados con gruesos y clastos de diferentes tamaños. Se espera una conductividad hidráulica inferior a 1×10^{-2} m/d.

En el área de estudio, esta UH se observó muy cerca a los nevados perpetuos y suprayaciendo a las rocas Cretácicas, presentando dimensiones considerables tanto en longitud como en profundidad.

- Unidad Hidrogeológica Sedimentaria 1

Unidad hidrogeológica conformada por areniscas cuarzosas intercalado con limoarcillitas, en algunas zonas se presentan conglomerados y lodolitas. Las limoarcillitas y lodolitas son las que presentan menor permeabilidad en esta unidad, en contraste con las areniscas cuarzosas que mostrarían una mayor permeabilidad. Estas formaciones han sido consideradas como unidad debido a su similitud litológica, además se infiere una permeabilidad constante para las rocas presentes. Estas formaciones geológicas generalmente presentan una conductividad hidráulica moderada que varía entre 1×10^{-1} y 1×10^{-3} m/d aproximadamente.

La UH Sedimentaria 1 muestra sus afloramientos en menor proporción en la parte sur del dominio. Se evidencia la estratificación de las areniscas con algunas intercalaciones de conglomerados y limoarcillitas. Se estima un espesor entre 600 y 1000 m.

- Unidad Hidrogeológica Sedimentaria 2

La UH Sedimentaria 2 está constituida por calizas grises con intercalación de margas. Los estratos de estas rocas carbonatadas en la zona de estudio se muestran muy fracturados y sobre el desarrollo de las labores mineras el grado

de fracturación incrementa debido a la mayor presencia de fallas principales y menores. El hecho de tener mayor grado de fracturación y números de fallas estaría generando zonas de karst, por donde ingresaría mayor cantidad de flujo subterráneo a partir de las precipitaciones y los flujos procedentes de los deshielos de los nevados. Acorde a lo descrito líneas arriba, esta UH en la zona de las labores mineras, se consideran más permeables y zonas de mayor recarga. Esta unidad subyace a la UH Sedimentaria 1 y subyace a las unidades Detríticas. De todo el dominio del modelo numérico hidrogeológico ocupa un 80% aproximadamente.

- Unidad Hidrogeológica Intrusiva

Unidad que representa al conjunto de rocas intrusivas, mostrando un fuerte intemperismo en superficie con fracturación asociada a diferente escala. En sus primeros metros presentaría una permeabilidad media a alta y que a partir del nivel 200 una permeabilidad moderada a baja con valores que varían entre 2.5×10^{-2} y 2.1×10^{-3} m/d.

Esta unidad aflora en zonas puntuales dentro del dominio de estudio, siempre en contacto con las calizas. Se considera una unidad importante debido que en el proceso de intrusión ha generado zonas de mayor fracturación (más permeables) facilitando vías preferenciales para el movimiento del flujo subterráneo.

- Unidad Hidrogeológica Volcánica

Esta unidad está representada por flujos riolíticos y tobas de composición dacítica. Los afloramientos de esta UH son en zonas muy puntuales y en posible contacto erosivo con las calizas de la UH Sedimentaria 2. Dada la naturaleza de las rocas que la constituye, presenta una permeabilidad media a alta, debido a la

intensa fracturación que presentan. A esta UH se le asigna una permeabilidad que varía entre 5.0×10^{-1} y 5×10^{-2} m/d.

Presencia de Aguas subterráneas - Niveles de Agua de Subterránea

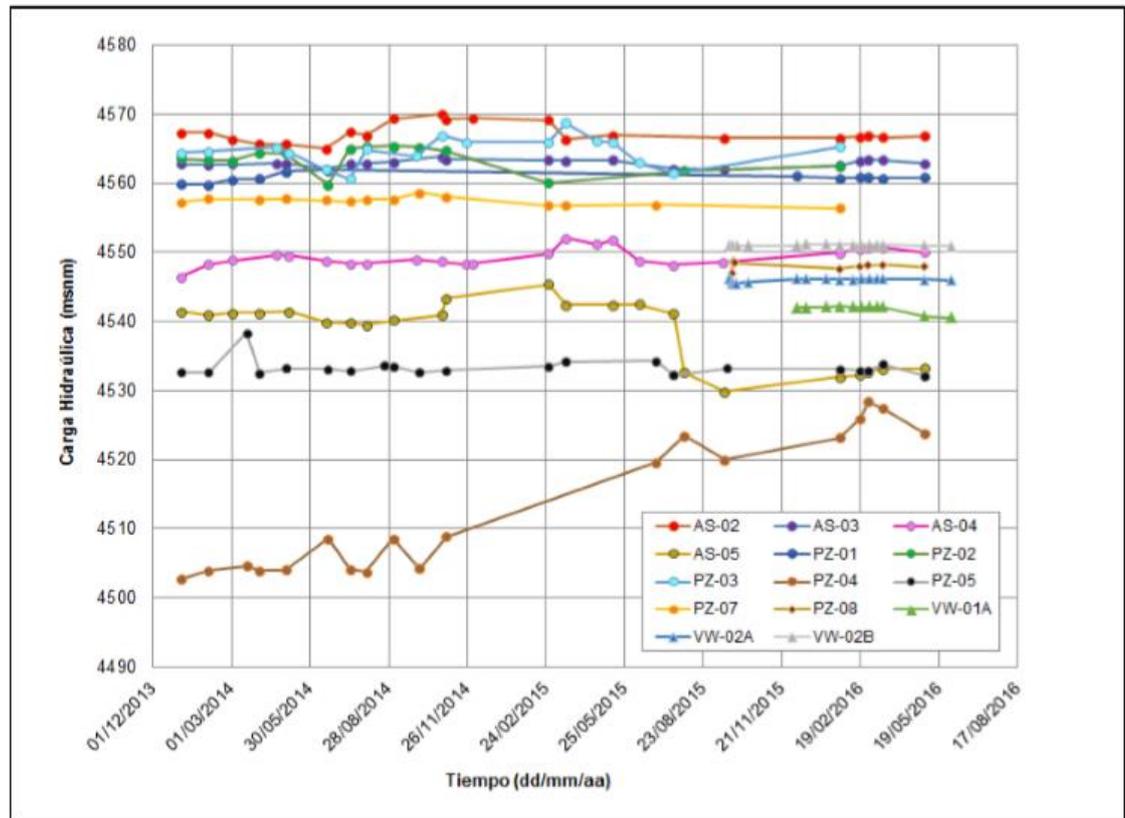
Para la evaluación de los niveles de agua se dispuso de un total 19 piezómetros. CMR ha proporcionado información histórica de niveles piezométricos que corresponden a mediciones puntuales desde el año 2013 a marzo del 2016 (dichas mediciones corresponden solo a algunos meses de cada año). Adicionalmente a la información disponible, Se ha realizado monitoreos durante las actividades de los trabajos de campo.

El único piezómetro (PZ-08) instalado en la microcuenca Puyhuancocha denota un nivel subterráneo cercano a la cota de la laguna del mismo nombre, el cual bordea la laguna y es alimentado por los glaciares cercanos de la zona.

El análisis de la variación temporal de los niveles piezométricos (hidrogramas) se muestran en la Figura para el entorno del proyecto. Se han diferenciado dos hidrogramas en función de la ubicación y la similitud en sus respectivas cargas hidráulicas. Se considera que para los AS-02, AS-03, AS-04, PZ-01, PZ-02, PZ-03, PZ-05 y PZ-07 los niveles se mantienen casi constantes, donde las pequeñas variaciones son producidas por los periodos de lluvias. El mismo comportamiento presentan los sensores de cuerda vibrante VW-01A, VW-02A y VW-02B.

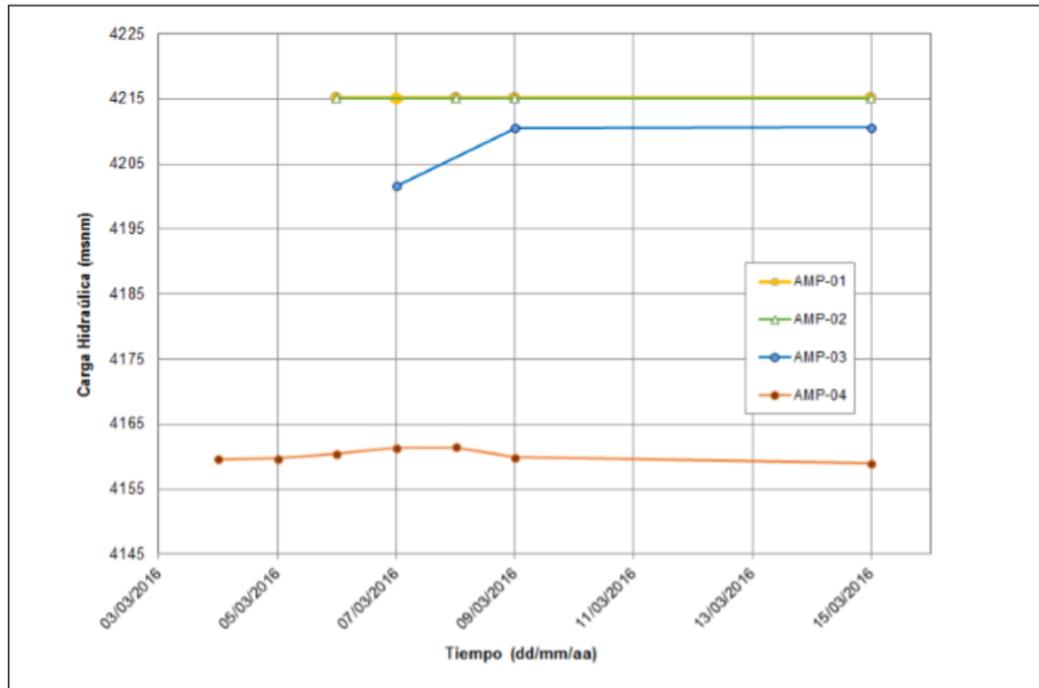
La mayor variación de niveles se ha dado en el PZ-04, el cual presenta una tendencia positiva incrementando su carga hidráulica a partir de diciembre del 2014 hasta la actualidad (23.2 m), dicho incremento estaría asociado al recrecimiento del dique del depósito de relaves Nieve Ucuro II. Asimismo, el piezómetro AS-05, donde se observa que después del ascenso de la carga hidráulica en 5 m en época de lluvia (febrero del 2017), desciende 15.53 m en el periodo de julio a septiembre del 2017,

para nuevamente mostrar una tendencia positiva hasta el mes de marzo del 2018 (ver Figura piezómetros analizados 1).



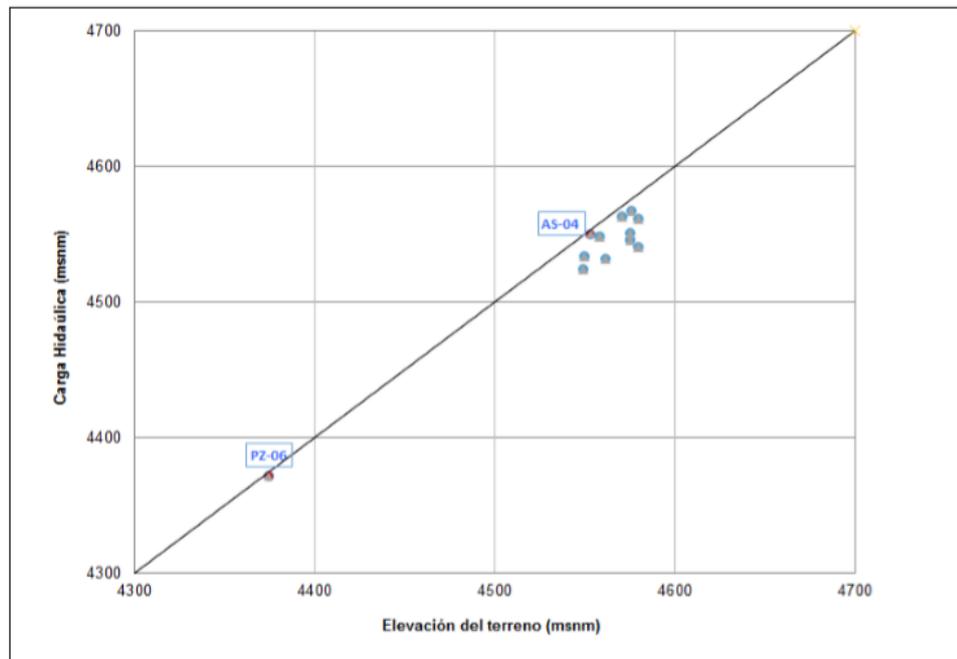
Hidrograma de piezómetros analizados 1

La Figura piezómetros analizados 2 muestra los hidrogramas para los piezómetros instalados en interior mina (nivel 200) AMP-01, AMP-02, AMP-03 y AMP-04, del mismo modo los niveles piezométricos mostrados corresponden a los monitoreos realizados posterior al desarrollo de los piezómetros. El piezómetro que ha sufrido mayor variación es el AMP-04, el cual ha descendido alrededor de 55 m. con respecto a las mediciones realizadas durante la instalación del piezómetro, esto debido que durante la perforación se cortó fallas y conectó el flujo hacia estas estructuras; las mediciones posteriores indican que el nivel presenta un comportamiento estable. Mientras los piezómetros AMP-01, AMP-02 y AMP-03 presentan sus cargas hidráulicas alrededor de la cota 4200 msnm (nivel 200).



Hidrograma de piezómetros analizados 2.

Una comparativa entre la cota del terreno y las cargas hidráulicas medidas en marzo del presente año se muestran en la Figura Variación de la Carga hidráulica con la cota del terreno, Sobre la base de esta comparativa se puede establecer que el nivel de agua subterránea de los piezómetros PZ-06, PZ-07, AS-02 y AS-04 se encuentra cerca al nivel topográfico. El resto de piezómetros alcanzan profundidades de 2 m. a 37 m., consecuencia de su ubicación en las cotas más elevadas. Cabe mencionar que los piezómetros de carácter surgente, en los cuáles los niveles piezométricos o cargas hidráulicas se ubican sobre la superficie topográfica, están ubicados sobre todo para las zonas bajas del área del proyecto.



Variación de la Carga hidráulica con la cota del terreno

Dirección de Flujo

Con la finalidad de identificar y realizar un análisis sobre la dirección de flujo subterráneo, se elaboró un mapa de isopiezas (ver plano isopiezas área de estudio). Dicha piezometría fue elaborada a partir de las cargas hidráulicas medidas en los piezómetros instalados en el Nivel 200 con lecturas que corresponden al mes de marzo del 2018 y cotas de manantiales inventariados a lo largo del área de estudio. Para el trazado de la piezometría en la zona de minado, se ha utilizado las cotas de las labores mineras ubicadas a diferentes niveles, así como las ubicaciones de las filtraciones en interior mina en los niveles 200, 300 y 380 donde se registra mayores filtraciones, los cuales en conjunto permiten definir el nivel freático. En la zona donde se desarrolla las labores mineras (niveles inferiores) se genera un cono de depresión por la desaturación de la mina producto del constante bombeo de las aguas subterráneas y que posteriormente son descargadas por las bocaminas Tinquicocha y Shucshapac.

En líneas generales se observa que el área de estudio presenta un gradiente hidráulico significativo desde la parte alta de los cerros (mayor recarga) en dirección hacia las áreas más deprimidas (zona de minado).

En conclusión, el flujo subterráneo se representa bajo dos direcciones: la primera se identifica en la parte norte en dirección hacia la laguna Patarcocha desde la zona de Tinquicocha y Gayco, el cual se identifica como una divisoria subterránea brindando sus aguas hacia las cuencas del atlántico. Del mismo modo, tomando mayor relevancia se identifican las aguas subterráneas que transitan por las microcuencas Caballococha, Santa Ana y cuencas abajo (dirección sur), las cuales son expuestas como afloramientos en interior mina, habiendo sido llevadas por el alto fallamiento que se da en la zona de estudio.

Recarga y Descarga de Aguas Subterráneas

El área de estudio se compone principalmente de afloramientos rocosos, los que son atravesados por sistemas de fallas que se exponen en superficie y son los principales medios para la infiltración de agua y posterior alimentación al sistema de flujo subterráneo. Parte de estos volúmenes de agua, descargan en fondos de valle y otra parte ingresan directamente hacia las labores de interior mina. Por otra parte, los fondos de valle están rellenos de sedimentos cuaternarios que definen un comportamiento acuífero de medio poroso, mientras que los macizos rocosos se caracterizarán por un comportamiento de flujo asociado a medio fracturado.

En el estudio de Balances de Aguas realizado por Amphos 21 (mayo 2018), dentro de la caracterización hidrológica se realizó el balance hídrico, del cual se extrae que en época húmeda la recarga en los materiales finos (bofedales y pajonal) es de 5 % aproximadamente y para los afloramientos rocosos podrían alcanzar hasta el 40 % del valor de la precipitación en los sectores con mayor grado de fracturación. Para

obtener una recarga representativa del área de estudio se procedió a considerar la recarga promedio anual obtenida para cada tipo de suelo y su área correspondiente, siendo un promedio resultante de 21.7%. Asimismo, se obtuvo como resultados que para el año seco la recarga total promedio es de 17%, mientras que para el año húmedo la recarga total promedio es de 29.2%.

Modelo Conceptual Hidrogeológico

La presente sección describe los diferentes argumentos que dan soporte a la conceptualización o entendimiento del flujo de aguas subterráneas en la zona de estudio. Dicho entendimiento fue realizado sobre la base del reconocimiento en campo de las principales características geológicas e hidrológicas y a partir de los registros de niveles, mediciones de flujo y los resultados de las pruebas hidráulicas realizadas en los diferentes materiales.

El área de estudio presenta dos sistemas de flujo diferenciados. Uno superficial cuyo régimen de flujo subterráneo se presenta en la mayor parte del dominio establecido para el presente estudio. En este sentido, el flujo subterráneo está fuertemente influenciado por la topografía con zonas de recargas y flujos verticales descendentes principalmente por las fallas principales desde las partes altas de las montañas; y zonas de descargas de aguas subterráneas con gradientes verticales ascendentes en los fondos de las quebradas.

Precisamente, estas quebradas están compuestas de sedimentos no consolidados (Cuaternario) y que por lo tanto se constituyen como acuífero poroso. Estos acuíferos principalmente están constituidos por materiales de depósitos aluviales, coluviales y morrénicos, generalmente con limitado espesor. En cambio, en el macizo rocoso los flujos subterráneos circulan a través de fallas, fracturas y planos de estratificación de las rocas sedimentarias. Dichos flujos pueden ser profundos y

con mayores tiempos de tránsito dependiendo de la entidad de las fracturas conductivas por las que circulan, enriqueciéndose hidroquímicamente de los componentes iónicos de la roca con la que interacciona el agua, a menudo metales en zonas con altos contenidos de mineralización.

Por otro lado, el sistema de flujo subterráneo profundo, se da en aquellos sectores influenciados por la construcción y operación de drenaje de las labores subterráneas a lo largo de la vida útil de la mina generando un cono de descenso en las zonas aledañas. En este caso, el sistema de flujo subterráneo presenta zonas de recarga en las partes altas de las montañas (cubiertos en mayor proporción por nevados) y que a través de los sistemas de fallas y zonas de alta fracturación ingresa el flujo hacia las labores mineras más profundas extrayéndose posteriormente mediante el sistema de bombeo.

Ante la construcción de túneles y galerías subterráneas, el principal volumen de ingreso será producido por la intersección de las principales fracturas conductivas y el laboreo de mina, sobre todo para los sectores donde se ubica la falla Flor de Loto. El flujo será convergente hacia los túneles con un carácter matricial, de menor relevancia en volumen y siempre dependiente de la permeabilidad del conjunto de la roca atravesada (en general baja) incluyendo la fisuración menor. El hecho de que las fracturas sean las principales vías para el movimiento del agua, no conlleva que el agua no circule a través de las rocas, sí lo hace, pero en menor medida y con un volumen despreciable, dada la baja permeabilidad de las mismas.

En base a la información recogida de aforos e infiltraciones en las labores de interior mina desde el año 2009 (Hydrogeo, 2009) hasta la actualidad, con monitoreos tanto para temporada seca y húmeda, se pudo definir un comportamiento subterráneo fuertemente estacional, con relación con el sistema superficial. Los valores de

ingresos de agua subterránea en las galerías mostraron un histórico que varían aproximadamente entre 700 – 800 L/s y que se ha incrementado fuertemente en 2016 hasta superar los 1000 L/s.

Las secciones hidrogeológicas interpretadas (ver Figura secciones hidrogeológicas A-A, B-B y C-C) ilustran el movimiento de las aguas subterráneas, el cual se da desde las zonas elevadas, donde se produce la mayor recarga, hacia las zonas de menor elevación (fondos de quebradas) por los que discurre el agua de escorrentía y donde adicionalmente se recibe la descarga de las aguas subterráneas infiltradas a través de fallas y de la fracturación principal y sus conectividades. Para el caso particular de las labores de interior mina, el principal volumen de ingreso está dado por la intersección con las principales fracturas conductivas con la construcción de las galerías.

Ante el desarrollo de nuevas galerías en los niveles 300, 200 y 150 se espera un incremento de caudal de entrada hacia las futuras labores, que implicará una afectación de los niveles piezométricos circundantes. Dicho caudal de entrada, así como dichas oscilaciones en los niveles piezométricos dependerán principalmente de cómo las labores puedan interceptar sistemas de fallas existentes, así como de las propiedades hidráulicas de los materiales implicados.

MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA LA PROFUNDIZACIÓN DE MINA

El modelamiento numérico detalla la conceptualización del medio, del mismo modo verifica el funcionamiento hidrodinámico en interior mina para este caso. Para este fin se ha empleado el código de elementos finitos en tres dimensiones FEFLOW 6.2 (DHI-WASY GMBH, 2015). En el contexto de FEFLOW, se presentan algunas definiciones para un mejor entendimiento.

- Elemento: unidad tridimensional consistente en un prisma recto de base triangular.
- Capa (slice): superficie bidimensional que sirve de techo y/o base para los elementos 3D.
- Bloque (layer): conjunto tridimensional de elementos limitados por las mismas capas.

Dominio de modelamiento y discretización

Para modelar el comportamiento hidrogeológico regional de un sistema de agua subterránea, un enfoque ampliamente utilizado es el de definir los límites (bordes) del dominio en base a límites naturales del medio (por ejemplo, divisorias de agua superficiales, ríos o embalses, etc.).

La definición de los límites del modelo numérico parte de la evidencia de que los conos de descenso generados a raíz de la profundización del minado en Raura son localizados y no se van a propagar más allá de éstos. El dominio se extiende una distancia de 8 km en dirección Este-Oeste y de 15.5 km en dirección Norte-Sur. El origen del dominio se encuentra en las coordenadas UTM (WGS-84): 303510 E, 8837170 N. Se han definido los límites del dominio según lo indicado en la Figura límites del modelo numérico. La mayor parte de los bordes escogidos coinciden con límites de flujo nulo, asumiendo que la divisoria del flujo subterráneo coincide con la divisoria de aguas superficiales.

El dominio ilustrado en el apartado anterior ha sido discretizado en una malla de elementos finitos, la cual consta de 824,880 elementos de forma prismática triangular con un total de 442,064 nudos. Tanto los bloques como las capas se enumeran en forma decreciente en el sentido vertical. Dicho dominio ha sido

optimizado para obtener una buena relación entre precisión y tiempo de cálculo computacional.

Discretización Horizontal

La malla diseñada en planta ha sido refinada en aquellos entornos para los cuáles se esperan mayores gradientes y se requiere de mayor precisión en la solución, tal es el caso de las lagunas, quebradas, componentes propuestos de mina y fallas. El tamaño de los elementos en el entorno de los mismos es del orden de 30 m mientras en las partes más cercanas a los contornos, los elementos presentan dimensiones de aproximadamente 400 m. La Figura Discretización de malla del modelo numérico, muestra el mallado de elementos finitos y el refinamiento hecho en la zona de quebradas y lagunas de interés, fallas y componentes propuestos de mina.

Discretización vertical

Verticalmente, el modelo ha sido discretizado en 16 bloques (layers) delimitados por 17 capas (slices) presentando mayor detalle en las zonas de minado del mismo modo que la discretización horizontal. De esta forma se han definido los niveles considerados en el plan de minado, con mayor discretización gradando su espesor hasta llegar a una profundidad tal que evite que los flujos se vean influenciados por dicho contorno, alcanzando un espesor máximo de 800 m. Este espesor es variable en función de la topografía, dado que se ha discretizado en la vertical de modo que la última capa sea horizontal a la cota 3900 m.s.n.m. Al igual que la extensión en planta, el espesor total ha sido considerado lo suficientemente grande para que no se vea afectada por los máximos descensos provocados por la desaturación producida por el drenaje de las labores subterráneas mineras.

La elevación de la superficie superior del dominio (capa 1) representa la topografía del área de estudio. La parte más alta de la superficie topográfica alcanza los 5586

m.s.n.m. a la parte Este y Oeste del modelo. El punto más bajo, a 4086 m.s.n.m., corresponde a la laguna Patarcocha al Norte del modelo (Figura Discretización de malla del modelo numérico). La información relacionada con la topografía ha sido trabajada sobre la base de la siguiente información:

- Topografía a detalle.
- Topografía local (curvas cada 25 m proporcionado por CMR).
- Cartografía 1:50,000 procedente de las hojas adquiridas del Instituto Nacional Geográfico (IGN).

Condiciones iniciales y objetivos de calibración

Tanto los piezómetros como otras manifestaciones de agua subterránea en superficie (manantiales) se constituyen como puntos de control conocidos y componen la base para la validación del funcionamiento del modelo. Para el caso de niveles piezométricos, se han utilizado aquellos piezómetros ubicados en el interior de la mina los cuales fueron instalados por Amphos 21. Otros piezómetros existentes en el área de estudio no fueron considerados dados que representan niveles del sistema de flujo superficial que fue descrito en la sección previa.

Por lo tanto, a partir de las elevaciones del intervalo de filtro y las mediciones de nivel de agua observadas, cada piezómetro fue asignado a una determinada capa del modelo de manera coherente con la profundidad de su tramo filtrante. Los manantiales, de manera análoga a los dispositivos comentados, son evidencias del nivel freático en su contacto con la superficie topográfica y por tanto aportan información valiosa a tener en cuenta (ver Tabla Niveles utilizados).

Niveles utilizados en la calibración del Modelo Numérico

Nombre del Piezómetro o Manantial	Coordenadas (WGS-84)		Cota (m.s.n.m.)	Cota promedio del Filtro (m s.n.m.)	Carga Hidráulica Promedio observada (m.s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)			
AMP-01	307926.97	8843810.00	4214.12	4152.62	4215.08
AMP-02	307834.69	8843737.67	4213.75	4104.75	4215.05
AMP-03	308547.83	8843085.67	4216.66	4093.46	4210.62
AMP-04	308508.05	8842850.36	4219.16	4098.16	4159.02
PE-03	308003.00	8839637.00	4294.00	4279.65	4294.50
PE-04	308079.00	8839406.00	4289.00	4270.15	4289.30
PE-05	308227.00	8839468.00	4293.00	4285.14	4293.20
MS-01	308229.00	8839455.00	4288.00	4288.00	4288.00
MS-02	308203.00	8839608.00	4292.00	4292.00	4292.00
MS-03	308538.00	8839196.00	4290.00	4290.00	4290.00

Implementación de los cuerpos de agua superficial

Los cuerpos de agua considerados han sido las lagunas escalonadas en todo el dominio, siendo de mayor influencia dentro del área modelada; en menor rango se delimitaron las pequeñas quebradas que son las que conducen el flujo durante los reboses de las lagunas (ver Figura Condiciones de contorno implementadas en el modelo numérico).

Entendiendo que las lagunas consideradas mantienen un nivel permanente y las quebradas tienen influencia cuando se realiza los reboses, se consideró para ambos una condición de contorno mixta (Cauchy). Para evitar que en caso de descensos de nivel las quebradas se conviertan en afluentes, es decir aporten al sistema de flujo subterráneo, se aplicó una restricción de flujo máximo igual a cero (constraint). Con este tipo de condición se permite que el agua sea descargada desde el acuífero hacia las aguas superficiales cuando la carga del acuífero simulada es más alta que la carga especificada en el nodo. Sin embargo, cuando la carga simulada es más baja, los drenes no muestran flujo de agua desde el cuerpo de agua superficial hacia el acuífero. De este modo, el modelo incluye la conceptualización de que las quebradas actúan como zonas de descargas con gradientes verticales ascendentes

en los fondos de los valles y que el flujo de agua desde las quebradas hacia el acuífero es nulo. Con respecto a las lagunas se ha utilizado el mismo criterio definido en el párrafo anterior, con la implementación de condiciones de contorno de nivel prescrito de igual cota a la topografía y con una restricción de máximo flujo igual a cero.

Implementación de las labores subterráneas

Al modelo numérico se implementaron las galerías NV. 380, NV. 300, NV. 200, NV. 150 y NV. 100 por ser consideradas importantes desde un punto de vista hidráulico (caudal registrado). La implementación de las labores mineras anteriormente descritas se simuló a través de condiciones fijas de nivel prescrito (Dirichlet) con una restricción de flujo máximo igual a cero (constraint), donde los nudos coincidentes con el desarrollo de las labores construidas tengan aplicadas una función de tiempo que representan la velocidad de la excavación. El constraint aplicado evita que el nudo implementado con esta condición de contorno introduzca agua al sistema.

Las capas del modelo numérico coinciden con las respectivas galerías subterráneas a la misma altura sobre el nivel del mar, de tal modo que se puedan ingresar las condiciones fijas en cada nivel distribuidas a lo largo de las galerías. Esta implementación de condiciones de contorno tiene como finalidad la desaturación en todos los niveles subterráneos hasta el actual.

Recarga implementada

Como se ha argumentado en el modelo conceptual, la infiltración de agua en el subsuelo o recarga corresponde a una porción de la precipitación que no es consumida por evaporación (o evapotranspiración) o bien no forma parte de la escorrentía superficial de aguas.

El rendimiento de las microcuencas ubicadas en el área de estudio varía entre 15 y 20 l/s/Km² el cual se traduce en valores en el rango de 705 mm/año en promedio.

El área del modelo hidrogeológico involucra varias microcuencas, es por ello que se ha calculado la recarga promedio anual para cada una de ellas y se considerará el promedio total como representativo de la zona de estudio. La tasa de recarga del agua subterránea estimada en términos de porcentaje con respecto a la precipitación anual para la zona de estudio presenta un rango de 32% de la precipitación total acumulada para el año promedio, esto debido a la influencia directa de los glaciares con el acuífero y mayor precipitación en las zonas altas.

Implementación de la Fracturación

Como se ha comentado, uno de los aspectos que se consideran relevantes para el modelo tiene que ver con los aspectos de geología estructural en la zona, entendiendo que en este tipo de medios la gran mayoría del agua subterránea se mueve a través de fracturas y vías preferenciales de flujo. En la sección de geología se ha comentado acerca de las principales direcciones y familias de fracturación. La Figura Fracturación implementada en el modelo numérico, muestra el fracturamiento implementado en el modelo numérico.

Para la selección e implementación de fracturas en el modelo numérico, además de revisar la información disponible, proporcionada por CMR (2015) se ha utilizado adicionalmente un criterio asociado a levantamiento de información por fotointerpretación y considerando las singularidades hidrológicas y surgencias, así como extensión e intersección con ríos o lagunas.

Las principales fracturas resultantes quedan implementadas como planos bidimensionales a los que se asocia su ubicación real en superficie y con buzamientos sub-verticales. Las fracturas de mayor importancia, de carácter

regional, se encuentran con direcciones paralelas al propio desarrollo subterráneo de minado. Por otro lado, existen fallas transformantes y otras fallas de componente normal y orientaciones variables, que a pesar de ser de menor escala y con menor potencia, no son por ello menos influyentes y como consecuencia, se han considerado a la hora de su implementación en el modelo numérico.

Parámetros hidráulicos

A fin de obtener resultados acordes a la realidad, los parámetros hidráulicos de la zona de estudio han sido analizados y correlacionados con el medio rocoso de la unidad minera. Para esto, la variación espacial de la conductividad hidráulica se ha representado mediante Unidades Hidrogeológicas (UH), las cuales se han definido tomando como base los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de permeabilidad.

La distribución de unidades hidrogeológicas (ver Figura Distribución de la permeabilidad) quedaría definido mediante el siguiente resumen:

- UH Detrítica 1 y 2 referida a material morrénico y coluvial (depósitos cuaternarios) en los bloques 1 y 2 del modelo, en correspondencia de las lagunas y quebradas.
- UH Volcánica se encuentra hacia el sector sur en correspondencia con la Formación Raura y brechas volcánicas fuertemente fracturado en superficie, considerada desde el bloque 1 al 10. Se observaron afloramientos en profundidad en los niveles más profundos.
- UH Intrusiva aflora en superficie en la parte central del dominio, expandiendo su tamaño en profundidad, fuertemente fracturado. Se presentan en los bloques 1 al 10 representando a las granodioritas y dioritas.

- UH Glaciar considerado como zona de flujo constante que recarga el medio fracturado, ubicado en las partes más altas del modelo correspondiente a los nevados perpetuos.
- UH Sedimentaria 1 correspondiente a las areniscas cuarcíferas y limoarcillitas consolidadas de las Formaciones Carhuaz y Casapalca respectivamente. Se presentan en los bloques 1 al 10, aflorando en la zona oeste de la parte central del dominio.
- UH Sedimentaria 2 ubicada en casi todo el dominio, asimismo distribuido verticalmente en toda su extensión. Esta unidad está conformada por las Formaciones Pariatambo, Chúlec, Celendín y Jumasha. Caracterizado por material carbonatado (calizas) y alteraciones en contacto con las rocas intrusivas

Validación del modelo para la condición actual

La validación del modelo fue realizada a partir de niveles piezométricos en interior mina los cuales fueron construidos por Amphos 21. De igual forma, se realizaron los esfuerzos por representar los flujos de drenaje de interior mina a partir de los registros realizados tanto por Hydrogeo y Amphos 21. En ese sentido, la metodología para el proceso de calibración incluyó una etapa de simulación en condición estacionaria para la obtención de una condición inicial, y posteriormente una simulación en condición transitoria que finaliza en marzo del 2018 y permite comparar los niveles y flujos de dicho mes.

Validación de las cargas hidráulicas

La validación de las cargas hidráulicas se realizó en los piezómetros en interior mina en el mes de marzo del 2018 (ver Figura Cargas Hidráulicas Calculadas vs Observadas). El proceso de calibración consistió en la variación de los parámetros

de conductividad hidráulica para lograr un ajuste de los mínimos cuadrados de las cargas hidráulicas simuladas por el modelo a las cargas hidráulicas medidas (niveles de agua en piezómetros instalados). Tras la calibración, se obtuvieron mediciones estadísticas, las cuales fueron estimadas para evaluar la calidad de la calibración. Los estadísticos obtenidos luego de variar algunas de las zonas de permeabilidad del modelo son resumidos en la Tabla Resultados estadísticos de la calibración. Todos los estadísticos, están basados en el residual, o diferencia entre los valores observados (X_{obs}) y calculados por el modelo (X_{cal}), el cual se muestra en la ecuación (1).

$$Residual = X_{cal} - X_{obs}$$

La desviación estándar (s) es calculada a partir de la siguiente ecuación

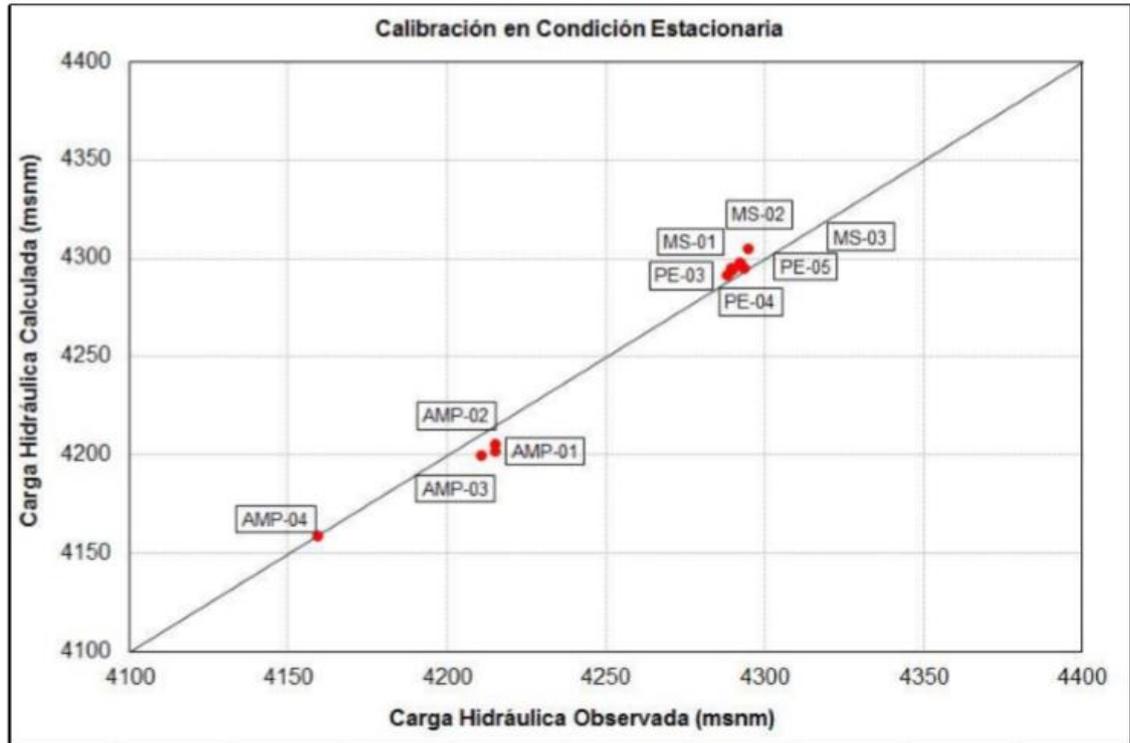
$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_{obs,i} - X_{cal,i})^2}$$

Asimismo, el Error Residual Medio Cuadrático (RMSE, por sus siglas en inglés) es calculado con la ecuación (3):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{obs} - X_{cal})^2}{N}}$$

Resultados Estadísticos de la Calibración

Estadístico	Unidad	Valor
Residual Medio (m)	m	0.14
Promedio del Valor Absoluto de Residuales (m)	m	6.64
Desviación Estándar de los Residuales (m)	m	8.14
Suma de Residuales al Cuadrado, RSS	m ²	596.35
Error medio Cuadrático, RMS (m)	m	7.72
Residual Mínimo (m)	m	-12.97
Residual Máximo (m)	m	11.00
Numero de Observaciones	-	10.00
Rango de Observaciones (m)	m	135.48
Desviación Estándar Escalado	Porcentaje	6%
RMS escalado	Porcentaje	6%



Cargas Hidráulicas Calculadas vs Observadas

Tal y como se indica en Anderson y Woessner (1992): El criterio de cuando el modelo se encuentra lo suficientemente ajustado a la realidad es subjetivo. A la fecha no existe un protocolo estándar para el proceso de calibración, etc. Una regla común de aceptación es que, en un modelo bien calibrado, el RMS debería ser menor que el 10% del rango de mediciones en todo el dominio (RMS escalado).

El residual promedio obtenido de la calibración del modelo fue ligeramente positivo (0.14 m) indicando una ligera tendencia general de que los niveles de agua se encuentran por encima de los observados, siendo este una posición bastante conservadora al momento de valorar flujos de drenaje y cambios en los regímenes de flujo subterráneo. Los resultados de la calibración indican un modelo con ajuste bastante aceptable a esta escala regional con un promedio del valor absoluto de los residuales de 6.64 m y un RMS escalado de 6%.

Flujos de drenaje de interior mina

La variabilidad de los flujos ha sido determinada a partir de las mediciones realizadas tanto por CMR, Hydrogeo y Amphos 21. Los flujos en temporadas de lluvias han alcanzado los 875 l/s mientras que en la última medición hecha por Amphos 21, dichos flujos alcanzaron los 1300 l/s. Finalmente, la simulación del modelo dio como resultado un valor de 1375 l/s lo que hace consistente la representación de los flujos de drenaje en interior mina.

Balance de Masa

El balance de masa obtenido (instantáneo) se muestra de manera resumida en la Tabla Resumen de balance de masas. Del balance se resalta el error de cierre estimado por el modelo el cual alcanza un valor de 1.59%, valor aceptable para este tipo de modelos regionales, con gran variabilidad topográfica, con no linealidad en la formulación y no exento de complejidad.

El principal intercambio de flujo en el modelo se da a través de la recarga por infiltración de las lluvias a través de las fallas principales y fracturación en las distintas galerías.

Resumen de Balance de Masas en Modelo Estacionario

Ítem	Tasa	Tasa
	m3/día	L/s
INGRESOS (I)	164764.80	1907.00
Recarga	164764.80	1907.00
SALIDAS (S)	162150.34	1876.74
Caudal de Mina Existente	137021.76	1585.90
Lagunas	25128.58	290.84
I - S	2614.46	30.26
Error de Cierre (%)	1.59%	1.59%

El componente de ingreso es la percolación profunda hacia el sistema de flujo de agua subterránea y el componente de salida descarga de agua subterránea a los cauces superficiales a modo de Flujo Base. El error de cierre de balance da una idea de la estabilidad numérica del modelo numérico y, para este caso se considera bastante robusto con un mínimo 1.59%.

Simulación de la Fase Predictiva

Descripción general

Se describe el plan de Minado subterráneo, en el cual se define un diseño de mina, para el cual se planifican un conjunto de galerías, rampas y túneles que garantizan el correcto manejo del proyecto.

El objetivo del modelamiento es el análisis transitorio de la interacción agua / infraestructura a lo largo de la fase operativa de desarrollo de mina futura (profundización), la cual ha sido facilitada por el Área de Planeamiento de la CMR correspondiente al año 2017 y 2018.

Se pone de manifiesto que la experiencia en proyectos similares, permite avanzar que uno de los roles de mayor relevancia le corresponde a la fracturación. Esto ha sido corroborado por exploraciones al interior de las bocaminas existentes, para las cuales la mayor parte del flujo ingresa a través de fracturas. La desaturación, como se ha argumentado a lo largo del documento, se producirá a medida que las diferentes galerías interfieran con la principal fracturación existente.

Para toda la simulación, se han implementado reducidos pasos de tiempo antes de cada activación de las condiciones de contorno de manera que la simulación y resultados requeridos sean acorde al algoritmo de resolución del sistema no lineal, con el objeto de situarse bajo el umbral de convergencia.

Tras una breve descripción general, se procederá en primer lugar a analizar la sensibilidad de cada uno de los parámetros hidráulicos para posteriormente describir el modo en que se ha implementado el Plan de Minado. Se finalizará con el estudio de los posibles impactos hidráulicos derivados de la instalación de cada una de los componentes de minado, desde el punto de vista piezométrico y de caudales resultantes.

Implementación del Plan de Minado Subterráneo

Se ha simulado un total de 7 años, en los que se van expandiendo las galerías paulatinamente para definir una situación transitoria que permita evaluar la interacción futura. Posteriormente se han simulado algunos meses adicionales para obtener las tendencias posteriores de caudal.

Uno de los retos principales de estos tipos de simulaciones es el de reproducir el avance paulatino y gradual de la excavación para de esta forma estimar de forma más fiable los caudales de rezume a lo largo del periodo considerado. Con este fin, el modelo hidrogeológico se ha implementado utilizando el siguiente enfoque:

- A los nudos coincidentes con la futura expansión se les aplica una función de tiempo que varía la cota del nivel prescrito en función de la velocidad de la excavación.
- A aquellos nudos que, por su profundidad, en un instante dado aún no se han visto afectados por la excavación, se aplica un nivel prescrito elevado para evitar que se activen. Dicho nivel se modifica instantáneamente una vez que la excavación haya alcanzado la cota del nudo.

Cabe destacar, que las funciones de tiempo dependen tanto de la cota del nudo mismo como de la cota de aquellos nudos ubicados en la misma posición, pero a cotas distintas. Por tanto, en la implementación del modelo, ha sido necesario definir, importar y aplicar un número de funciones de tiempo igual al número de nudos pertenecientes a las galerías principales.

Resultados de simulaciones predictivas

En la presente sección se discute acerca de la evolución de caudales a lo largo de la simulación, para las diferentes fases constructivas.

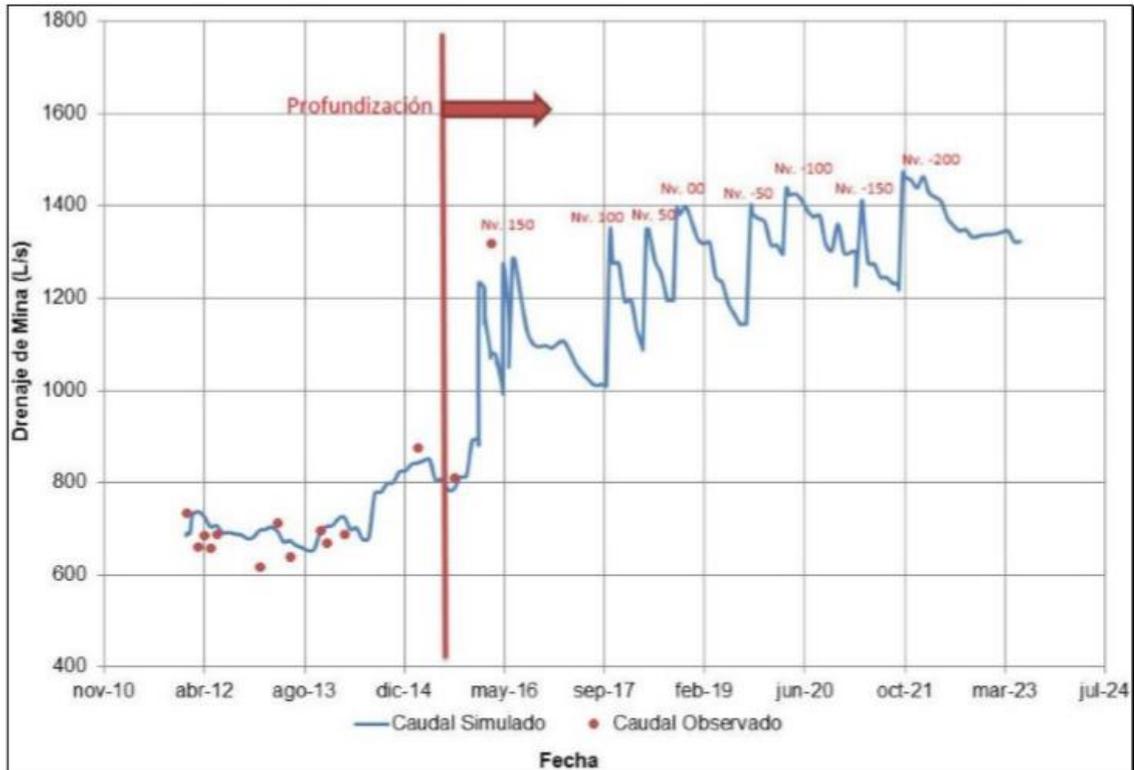
Drenaje de las Labores Subterráneas

Simplificando la intrínseca complejidad del problema, en estos tipos de excavaciones en galerías se puede clasificar el comportamiento hidrogeológico del medio de acuerdo a pautas distintas, que a su vez dependen de diferentes parámetros:

- Al comienzo de la excavación la mayoría del agua se drena por gravedad y se produce un vaciado físico del macizo rocoso. En este periodo, el parámetro más influyente es la porosidad drenable (specific yield, S_y).
- A medida que la excavación avanza se sigue drenando agua por gravedad, pero al mismo tiempo se empiezan a observar aportes de agua de las zonas externas a las galerías. Esta fase del transitorio es influenciada tanto por la porosidad drenable como por la conductividad hidráulica del medio.

Como se puede observar, al inicio de los trabajos de excavación, se empieza a drenar el agua por gravedad remarcándose que, en este tramo del transitorio, los caudales de entrada son linealmente dependientes de la velocidad de excavación. Cuando el efecto del vaciado físico del acuífero se superpone la entrada de agua de las fallas y fracturas implementadas se observan picos instantáneos de descargas.

La Figura Evolución de los Drenajes de Mina, muestra la evolución de los caudales calculados, así como las sucesivas etapas de profundización con respecto a la duración total del proyecto. Tal y como puede observarse, se observan algunos meses adicionales, que precisamente se han decidido incluir en la simulación para denotar posibles tendencias en los caudales resultantes.



Evolución de los Drenajes de Mina.

La Figura isodescensos calculados fase desarrollo de mina, muestra los descensos de niveles desde las galerías subterráneas ejecutadas en comparación con las galerías proyectadas, para este fin se muestra un cono de descensos que refleja las profundidades en metros.

4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS

El trabajo de investigación es evaluativo por lo que la prueba de hipótesis se plantea de la siguiente manera:

Como objetivo general tenemos determinar las características hidrogeológicas que influyen en la estimación del caudal de las aguas subterráneas en la Mina Raura, en donde se logra cumplir el objetivo general mediante la recopilación y análisis de los datos obtenidos utilizando las diversas herramientas, ensayo de Lugeón y los piezómetros instalados.

Estos datos son comparados y analizados con estudios realizados años anteriores en la misma zona y verificar si los resultados obtenidos son favorables o desfavorables a comparación de otros años para la zona

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este presente trabajo de investigación tiene como finalidad caracterizar hidrogeológicamente la estimación del caudal de las aguas subterráneas en la Mina Raura, en base a la recopilación de datos obtenidos de los ensayos de Lugeón y los piezómetros instalados en diversos lugares de la zona de estudio donde también se determinó que los controles estructurales determinan el caudal de las aguas subterráneas del yacimiento.

Dichos datos fueron analizados utilizando el software FEFLOW, utilizando el método numérico de elementos finitos en donde los resultados obtenidos en la investigación nos indicaron que partes de las zonas de estudio son favorables para la dirección del flujo del agua viendo el grado de permeabilidad que tenga la zona de estudio.

CONCLUSIONES

- La precipitación para la zona de estudio fue estimada tomando como base los registros de las estaciones meteorológicas cercanas, asimismo, se utilizó la información de la estación local. Debido a que dicha estación presentaba un periodo de registro corto, se procedió a completar dicha información con la ayuda de información satelital. La precipitación anual promedio es de 1122 mm.
- La precipitación registrada durante los años 2015 y 2016 (hasta mayo) muestran que los valores registrados no pertenecen al año promedio, siendo mayores en un 36 y 40 % para los años 2017 y 2018 respectivamente. Estos valores se encuentran próximos a valores de precipitación de años húmedos con un periodo de retorno de 50 años.
- La geología de la zona de estudio se puede considerar compleja debido a sus diferentes fases de tectonismo, el cual ha formado anticlinales y sinclinales de orden regional. Esto ha determinado una red de fallas y lineamientos que juegan un papel determinante en el funcionamiento hidráulico de la zona de estudio.
- Los afloramientos de roca plutónica granodiorítica cortan a las calizas Jumasha, iniciando el proceso de mineralización y alteraciones presentes (marmolización y skarn) de la zona. Debido a ello, las alteraciones geológicas implican que la composición de las aguas subterráneas pueda verse afectada en su tránsito a través de los materiales enriqueciéndose en iones representativos de las diferentes formaciones.
- Los esfuerzos tectónicos compresivos de la zona de estudio muestran como respuesta un fallamiento en sentido inverso. Este comportamiento se aprecia en las fallas principales, las cuales determinan la hidrodinámica superficial y subterránea de la mina. El fuerte fallamiento ayuda a la infiltración de los flujos

por medio de fracturas conectadas entre sí hasta los niveles inferiores de la mina. Superficialmente se han medido datos de rumbo y buzamiento, mostrando para cada litología un fuerte fracturamiento, determinando conexión entre superficie y los primeros metros de profundidad.

- Los monitoreos de aforos e infiltraciones en las labores, indican gran variabilidad entre estación húmeda y seca, lo cual implica que existe una gran conectividad de las labores con los sistemas de fracturas existentes.
- Las entradas de agua a las labores podrían relacionarse con las trazas de las grandes estructuras (y de las zonas de debilidad que tienen asociadas), particularmente los sectores de mayor entrada se podrían asociar a las fallas en los sectores N (Gayco y Flor de Loto).
- El modelo numérico desarrollado representa los caudales observados en campo y ha permitido validar el funcionamiento hidrodinámico en el entorno de las labores subterráneas (Nivel. 300, Nivel. 200, Nivel. 150 y Nv.100), lo cual se representa en una piezometría que reproduce un cono de descenso asociado al drenaje de las labores.
- Para la simulación predictiva se incorporaron las galerías futuras proporcionadas por Raura bajo el LOM facilitado (fecha mayo 2016), el cual principalmente implica la profundización prevista para determinadas labores en el sector de Catuva (Nv.50, Nv.00, Nv.-50, Nv.-100, Nv.-150 y Nv.-200). El hecho de que las labores futuras no implican un minado extensivo en sectores nuevos, permite anticipar que no deben esperarse cambios destacables en los volúmenes de agua a ser drenados.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar monitoreos constantes de medición de niveles en interior mina, a fin de observar la variación de los flujos durante la profundización. Del mismo modo, tener claro los afloramientos importantes a fin de controlar los caudales y dar una mejor optimización a los flujos subterráneos. • Con el fin de contar con un control real de la variación de almacenamiento en las lagunas y poder predecir comportamientos futuros es necesario contar con una red de monitoreo continuo. Esta red debería constar de controles de nivel y/o caudal a la salida y entrada de las lagunas con el objetivo de poder generar la información de balance hídrico particular en cada una de las lagunas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

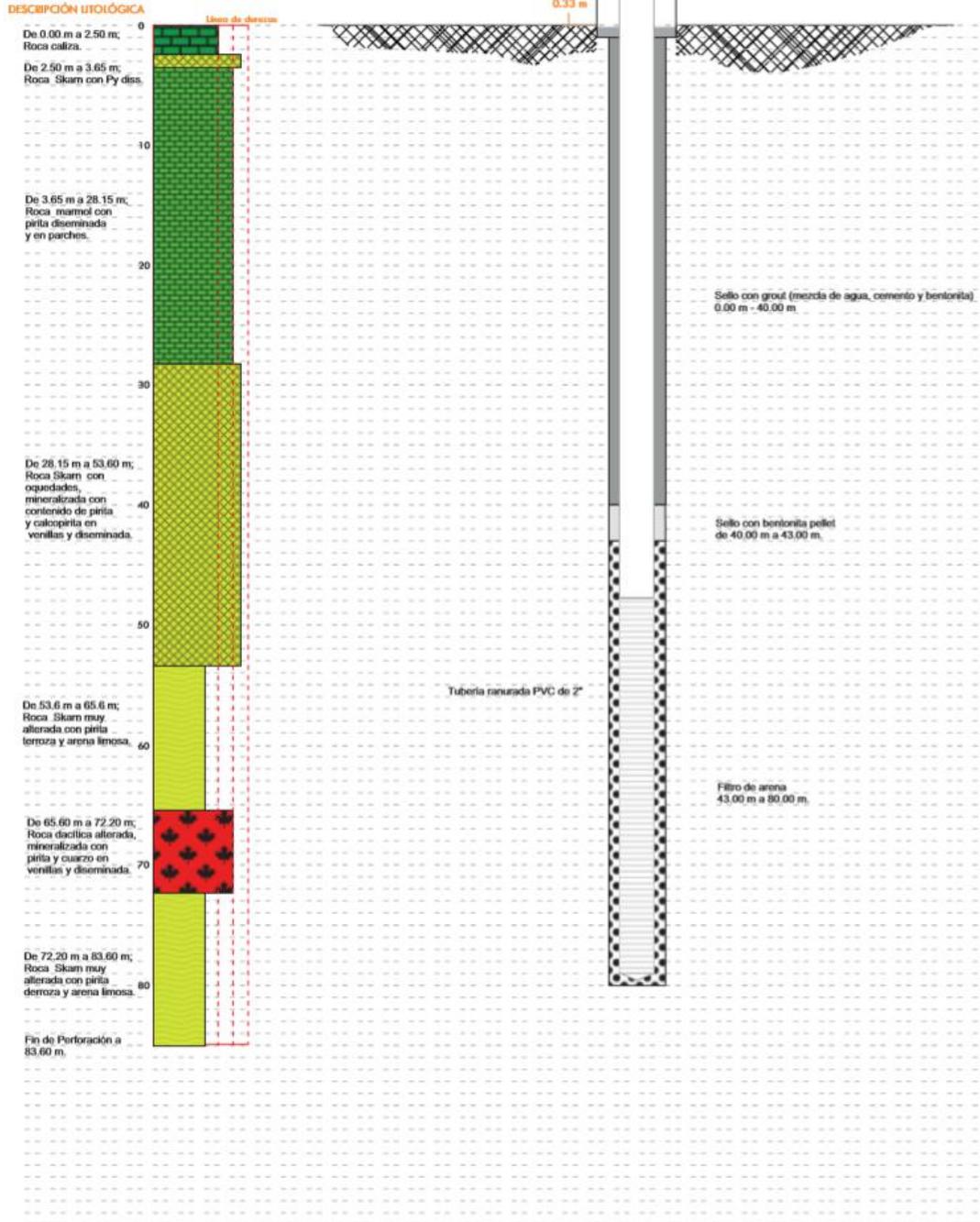
- Anderson, M. P. and W.W. Woessner, 1992, Applied groundwater modeling, Simulation of flow and advective transport. AcademicPress Inc. 385 pp.
- DHI-WASY (2015), FEFLOW finite element subsurface flow and transport simulation system - User's manual/Reference manual/White papers. v. 6.2., DHI-WASY GmbH, Berlin, Germany. URL <http://www.feflow.com>.
- GOLDEN SOFTWARE (2013), STRATER 4 Stratigraphically Superior Well Log, Borehole&Cross Sección Plotting Software.
- GOLDEN SOFTWARE, Inc., USA. URL <http://www.goldensoftware.com>
- HydroGeo Ingeniería S.A.C., 2010. Estudio Hidrogeológico del Complejo Catuva en la Mina Raura. Enero 2010.
- HydroGeo Ingeniería S.A.C., 2015. Actualización del Estudio Hidrogeológico del Complejo Catuva en la Mina Raura. Abril 2015.
- HydroSOLVE, Inc., 2008. AQTESOLV for Windows 95/98/NT/2000/XP/Vista: HydroSOLVE, Inc., Reston, Virginia, versión 4.50.004 – Professional.
- INGENMET, 1996. Geología de los Cuadrángulos de Huaraz (20h), Recuay (20i), La Unión (20j), Chiquian (21i) y Yanahuanca (21j), - [Boletín A 076].

ANEXO

DISEÑO CONSTRUCTIVO PIEZÓMETRO CASAGRANDE AMP-01

COLUMNA LITOLÓGICA

A²¹



IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Cliente: Compañía Minera Rosero S.A.
Proyecto: Estudio Hidrogeológico y Manejo de Aguas
N° Proyecto: 266_15
Ubicación: Nivel 200

SISTEMA DE COORDENADAS (UTM)

Datum: WGS 84
Norte: 8843810.00
Este: 307926.97
Elevación: 4214.12 m.s.n.m

ORIENTACIÓN DEL COLLAR

Azimut: -
Inclinación: -90°
Tipo de Broca: Diamantada
Diámetro: HW/HQ

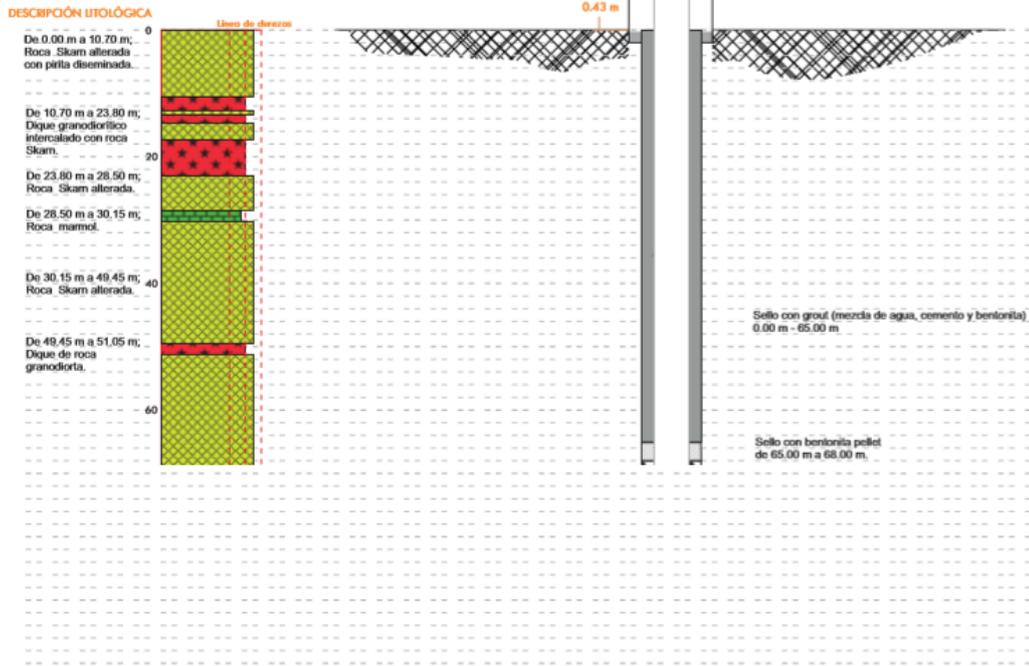
DATOS DEL SONDEO

Nombre del Sondeo: AMP-01
Cía. De Perforación: Esondi S.A.
Nivel Piezométrico (m): -0.96 (Surgente).
Profundidad final (m): 80.00 m.

DISEÑO CONSTRUCTIVO PIEZÓMETRO CASAGRANDE AMP-02

COLUMNA LITOLÓGICA

A²¹



IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Cliente: Compañía Miera Rosero S.A.
 Proyecto: Estudio Hidrogeológico y Manejo de Agua
 N° Proyecto: 266_15
 Ubicación: Nivel 200

SISTEMA DE COORDENADAS (UTM)

Datum: WGS 84
 Norte: 8843737.67
 Este: 307834.69
 Elevación: 4213.75 m.s.n.m

ORIENTACIÓN DEL COLLAR

Azmut: -
 Inclinación: -90°
 Tipo de Broca: Diamantada
 Diámetro: HW/HQ

DATOS DEL SONDEO

Nombre del Sondeo: AMP-02
 Cla. De Perforación: Essoil S.A.
 Nivel Piezométrico (m): -1.30 m. (Surgente)
 Profundidad final (m): 150.00 m.



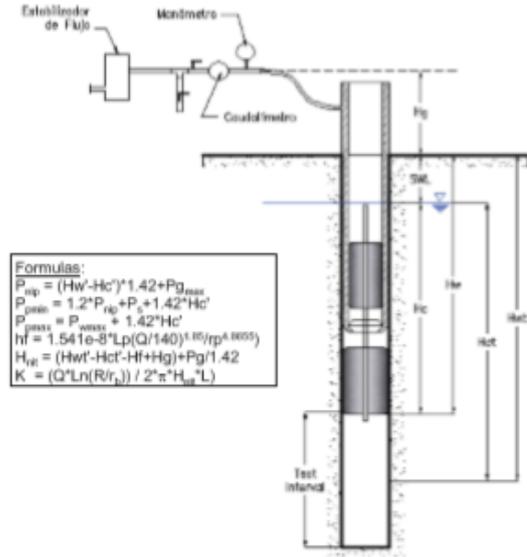
Fotografía 1: Piezómetro tipo Casagrande AMP-01, ubicado en el nivel 200 hacia el norte cerca al crucero 120 de interior mina.



Fotografía 2: Piezómetro tipo Casagrande AMP-02, ubicado en el nivel 200, hacia el norte cerca al crucero 120 de interior mina.

Prueba de Lugeon

Proyecto: Estudio Hidrogeológico Rausa	Prof. de Ensayo De: 23.00 A 56.70	Sondaje: AMP-02
Area: Nivel 200	Fecha: 13-feb-16	Hora Inicio: 11:55 pm
Coordenadas (m): 307834.69 E 8843737.67 N	Altura Caudalímetro: 0.50	Hora Final: 02:30 am
Elevación (msnm): 4213.75	Litología del intervalo: Slkam / Granodiorita	Prof. total (m): 56.7
		Supervisor: JL



Formulas:
 $P_{inj} = (Hw - Hc) \cdot 1.42 + P_{gmax}$
 $P_{min} = 1.2 \cdot P_{inj} + P_s + 1.42 \cdot Hc'$
 $P_{max} = P_{min} + 1.42 \cdot Hc'$
 $hf = 1.541e-8 \cdot Lp \cdot (Q/140)^{1.05} / (rp^A \cdot R^{0.55})$
 $H_{wf} = (Hwf' - Hcf' - Hf + Hg) + Pg / 1.42$
 $K = (Q^2 \cdot Ln(R/r_1)) / (2 \cdot \pi \cdot H_{wf} \cdot L)$

Nota 1: si el pozo se encuentra seco, considerar SWL = profundidad.

Datos del Ensayo

SWL	Profundidad del nivel estático del agua (ver nota 1)	0.30 m
β	Inclinación desde la horizontal	90 °
Pa	Presión de ensanchamiento del packer	250 psi
Pwmax	Máxima presión de trabajo del packer	500 psi
Pgmax	Máxima presión manométrica prevista	30 psi
rb	Radio del pozo	0.045 m
rp	Radio de la tubería de descarga	0.039 m
Hw	Columna de agua sobre el packer	23.00 m
Hwf	Columna de agua sobre el punto medio	39.85 m
Hg	Altura del manómetro	0.50 m
Hc	Carga hidrostática en el packer	22.70 m
Hcf	Carga hidrostática en el punto medio	39.55 m
Hw'	Columna de agua sobre el packer (corregido)	23.00 m
Hwf'	Columna de agua sobre el punto medio (corregido)	39.85 m
SWL'	Nivel estático de agua (corregido)	0.30 m
Hc'	Carga hidrostática en el packer (corregido)	22.70 m
Hcf'	Carga hidrostática en el punto medio (corregido)	39.55 m
L	Longitud del intervalo de prueba	33.70 m
Lp	Longitud de tubería de descarga	23.50 m
R	Radio de influencia	33.70 m

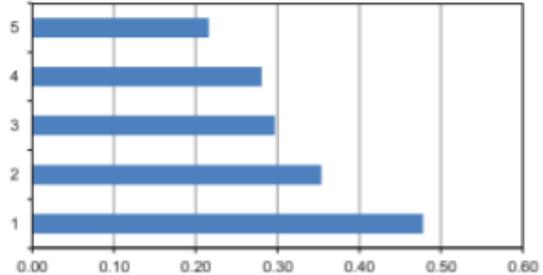
Presiones del Packer

Pnip	Presión Neta de inyección al packer	31 psi
Ppmin	Presión mínima de inflado del packer	320 psi
Ppmax	Presión máxima de inflado del packer	532 psi

Factores de Conversión

10.2 m de agua = 1 bar = 1kg/cm² = 14.5 psi
 1 m = 3.281 pies = 39.37 pulgadas
 1 litro/seg = 15.85 gpm = 86.38 m³/día = 60 l/min

Representación Gráfica



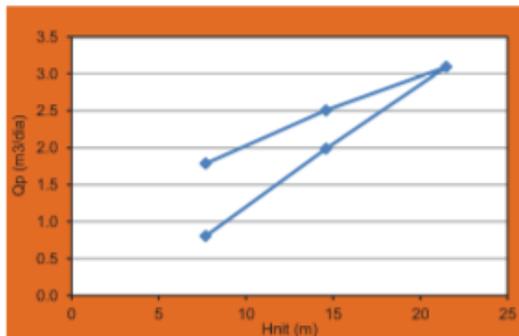
Observaciones de Campo

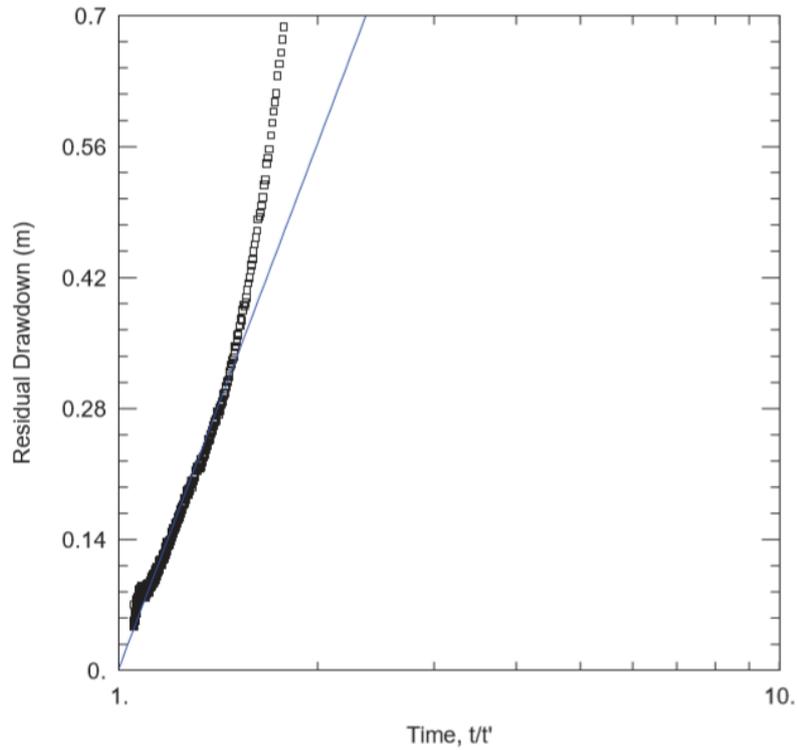
Presión de Packer = 250 PSI
 La prueba se realizó con tubería HQ.
 El ensayo fue realizado por personal de Amphos

Resultados y Conclusiones

Los lugeones decrecen en el proceso de la prueba (los vacíos son gradualmente rellenados). En esta prueba, el tipo de flujo presentado es un flujo de relleno. El valor de permeabilidad es considerada para la presión mínima $K=3.8 \text{ E-}06 \text{ cm}^2/\text{seg}$.

Tiempo (min)	Q (L/min)				
	P ₁ (psi) Baja	P ₂ (psi) Media	P ₃ (psi) Alta	P ₄ (psi) Media	P ₅ (psi) Baja
1	1.40	1.90	2.30	1.30	0.60
2	1.20	1.80	2.30	1.40	0.50
3	1.30	1.60	2.10	1.30	0.60
4	1.30	1.80	2.10	1.40	0.50
5	1.20	1.70	2.20	1.40	0.60
6	1.20	1.70	2.10	1.40	0.50
7	1.20	1.70	2.10	1.40	0.50
8	1.20	1.70	2.10	1.40	0.60
9	1.20	1.80	2.10	1.40	0.60
10	1.20	1.70	2.10	1.40	0.60
Q _D (lit/min)	1.24	1.74	2.15	1.38	0.56
Q _D (m ³ /día)	1.8	2.5	3.1	2.0	0.8
Hf (m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hwf (m)	7.7	14.6	21.5	14.6	7.7
K (m/día)	7.2E-03	5.3E-03	4.5E-03	4.2E-03	3.2E-03
K (cm/seg)	8.3E-06	6.2E-06	5.2E-06	4.6E-06	3.8E-06
UL	0.48	0.35	0.30	0.28	0.22
K Sensibilidad:		2.07E-05 (m/día)		2.40E-08 (cm/seg)	





WELL TEST ANALYSIS

Data Set: P:\...\AMP-02 Recuperación.aqt

Date: 05/04/16

Time: 14:33:50

PROJECT INFORMATION

Company: Amphos 21

Client: CM Raura

Project: 266_15

Location: Lima

Test Well: Recuperación

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 150. m

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA

Pumping Wells

Observation Wells

Well Name	X (m)	Y (m)	Well Name	X (m)	Y (m)
AMP-02	0	0	AMP-02	0	0

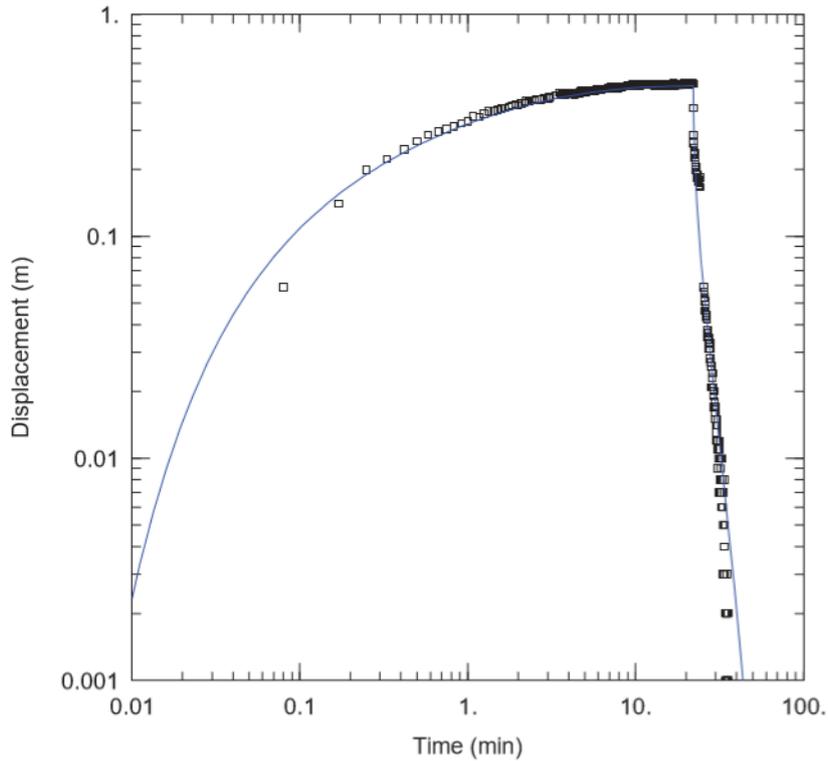
SOLUTION

Aquifer Model: Confined

Solution Method: Theis (Recovery)

T = 0.849 m²/day

S/S' = 0.9971



WELL TEST ANALYSIS

Data Set: P:\...\AMP-01.aqt
 Date: 05/04/16

Time: 14:41:39

PROJECT INFORMATION

Company: Amphos 21
 Client: CM Raura
 Project: 266_15
 Location: Lima
 Test Well: Bombeo

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 80. m

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA

Pumping Wells			Observation Wells		
Well Name	X (m)	Y (m)	Well Name	X (m)	Y (m)
AMP-01	0	0	□ AMP-01	0	0

SOLUTION

Aquifer Model: Confined

Solution Method: Hantush (Wedge)

T = 0.1018 m²/day
 r/a = 0.1248

S = 0.003201



Fotografía 3: Se ilustra la toma de parámetros físicos químicos in situ con un equipo multiparamétrico (HANNA). Durante los trabajos de mapeo hidrogeológico.



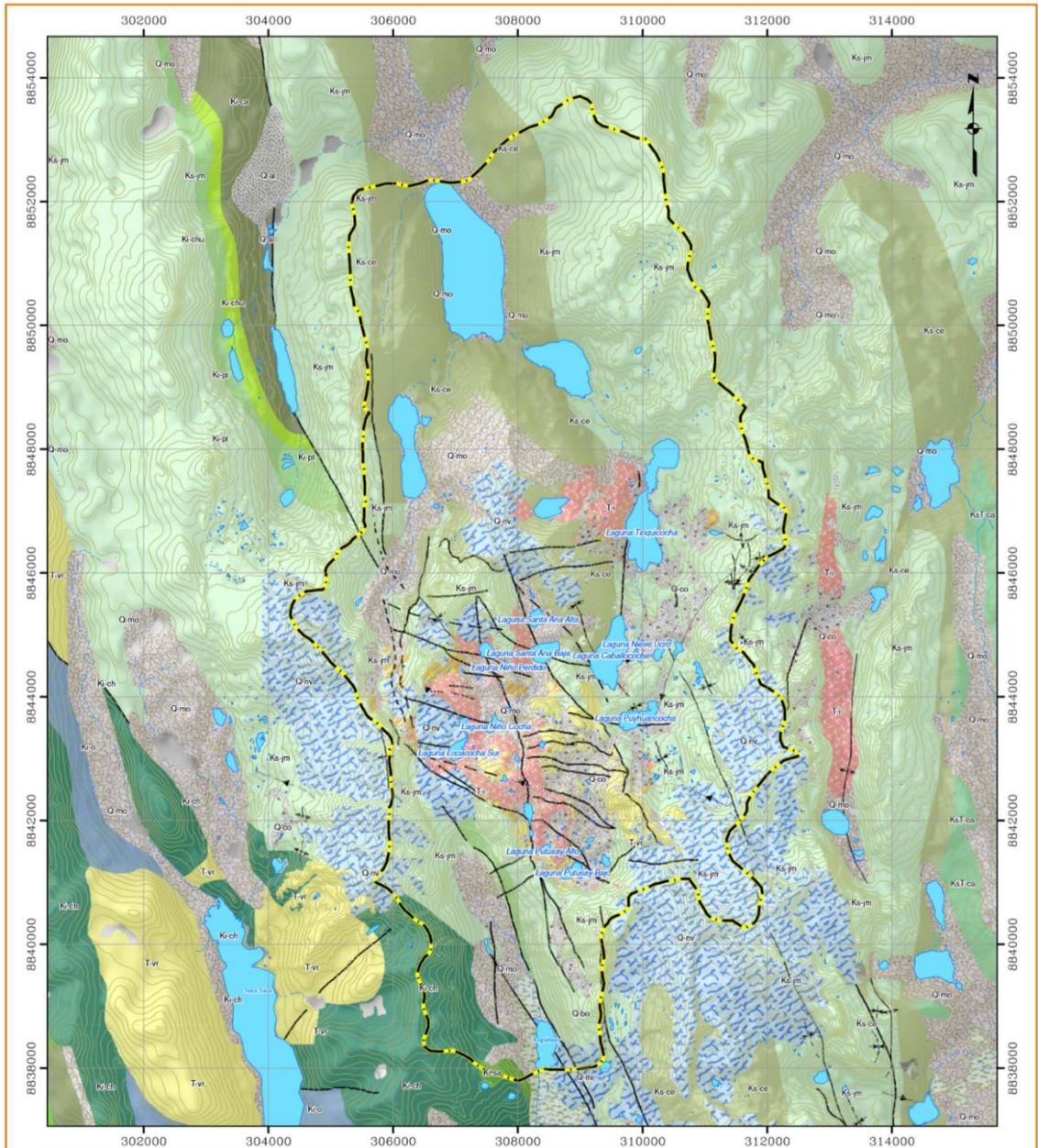
Fotografía 4: Se muestra la medición de caudal en quebradas utilizando un correntómetro durante los trabajos de mapeo hidrogeológico.



Fotografía 5: La fotografía de la izquierda y derecha ilustran las mediciones de caudal del nivel 200 la bocamina Hidro. Durante los trabajos de mapeo Hidrogeológico en el interior Mina.



Fotografía 6: La fotografía muestra la perforación dinámica realizada en el nivel 200 del sondaje AMP-02



LEYENDA

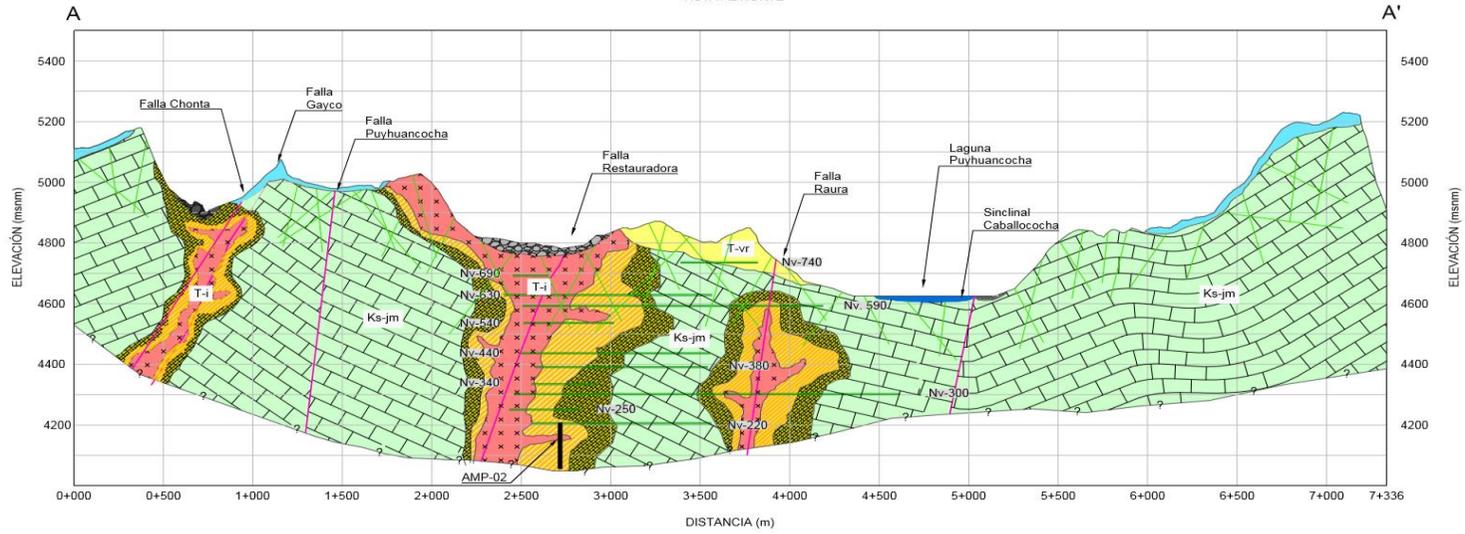
Simbología

	Eje Anticlinal		Rios		Nevados Perpetuos		Fm. Farrat
	Eje Sinclinal		Topo_WGS84		Volcánico Raura		Fm. Carhuaz
	Falla Dextral		Lagunas		Fm. Casapalca		Fm. Santa
	Falla Sinistral		Área de estudio		Fm. Celendin		Fm. Chimu
	Falla Inversa	Unidades Litoestratigráficas			Fm. Jumasha		Fm. Oyón
	Falla Inversa Inferida		bofedal		Fm. Pariatambo		Intrusivo (gd,dl,mz)
	Falla Normal		Depósito Aluvial		Fm. Chulec		Marmol
	Falla Normal Inferida		Depósito Coluvial		Fm. Pariahuanca		Skarn
	Quebradas		Depósito Morrénico				



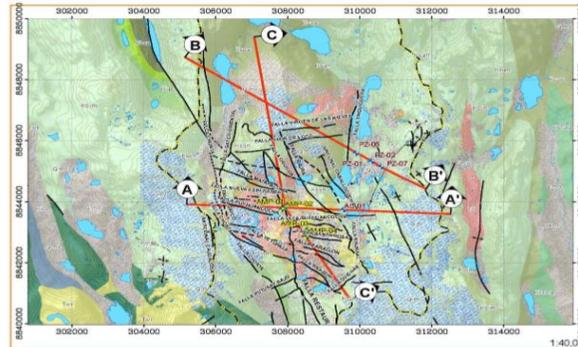
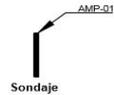
	CLIENTE:	COMPANÍA MINERA RAURA S.A.
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO
TÍTULO:		
GEOLOGÍA LOCAL		
EMPRESA:	PROTECCIÓN:	FIGURA N°:
AMPHOS 2	LITM	266 45
	WGS 84	Nov 2010
	ESCALA:	1:60 000
	REVISADO:	E. Ruiz
	DISEÑADO:	R. Moya
	REVISIÓN:	1

SECCIÓN GEOLÓGICA A - A'
VISTA AL NORTE



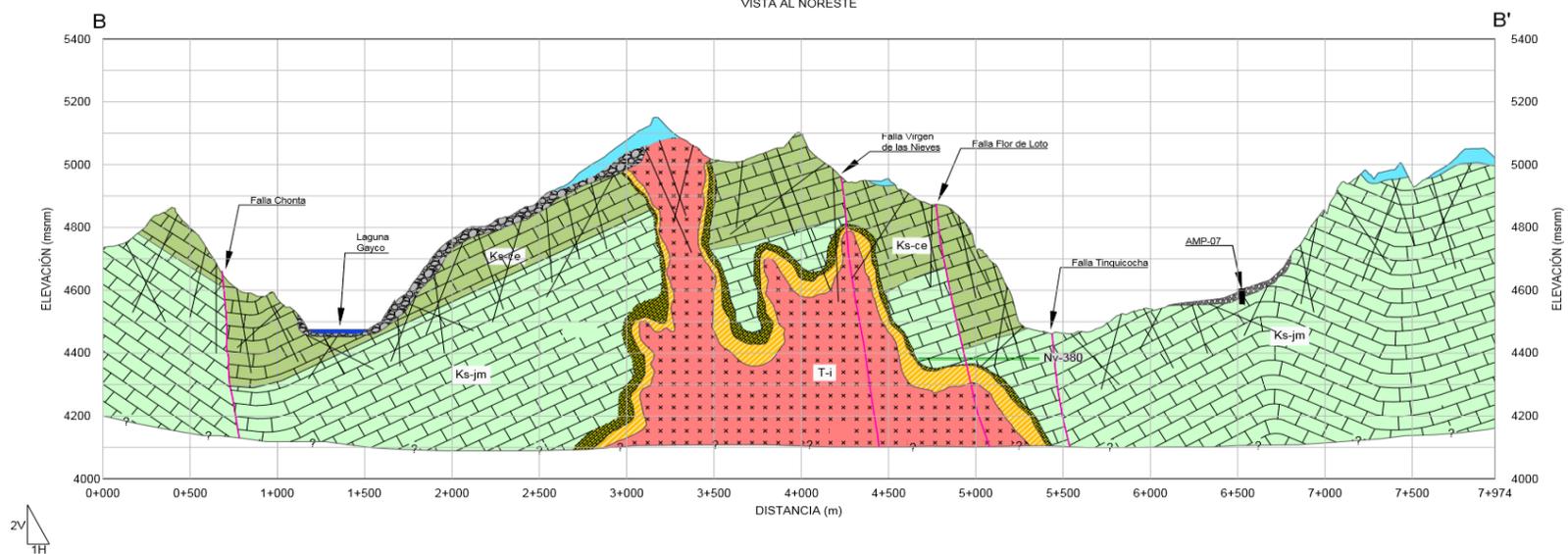
LEYENDA

- Depósito Coluvial (Q-co) - Grava angulara de composición polimíctica.
- Depósito Morrénico (Q-mo) - Fragmentos de roca de composición polimíctica en matriz arcillosa.
- Nevados Perpetuos (Q-nv) - Glaciares ubicados en las partes altas de las cadenas montañosas.
- Volcánico Raura (T-vr) - Flujos riolíticos y tobas de composición dacítica y riódacítica.
- Formación Jumasha (Ks-jm) - Calizas con potencia de 1000 m descritas como micritas.
- Intrusivo (T-i) - Stock complejo de composición granodiorita, diorita.
- Mármol
- Skarn
- Falla
- Niveles de labores subterráneas

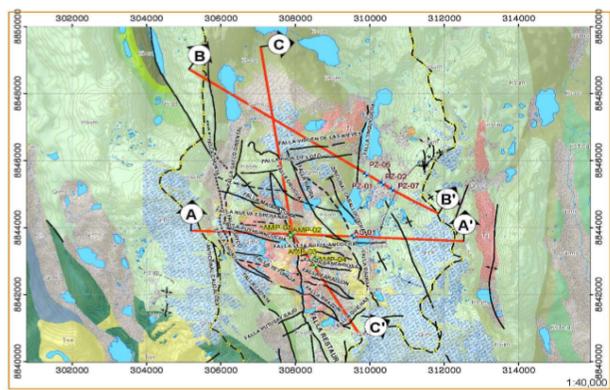


	CLIENTE:	COMPañIA MINERA RAURA S.A.
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO
TÍTULO:	SECCIÓN GEOLÓGICA A-A'	
EMPRESA:	PROYECCIÓN: UTM	PROYECTO N°: 200-10
AMPHOS S.A. Ingeniería y Geología	FECHA: WGS 84	FECHA: Nov 2016
	ZONA: 18 S	REVISADO: L. Huamani
	ESCALA: 1:25,000	APROBADO: E. Ruiz
	DIBUJADO: R. Mayta	REVISIÓN: 1

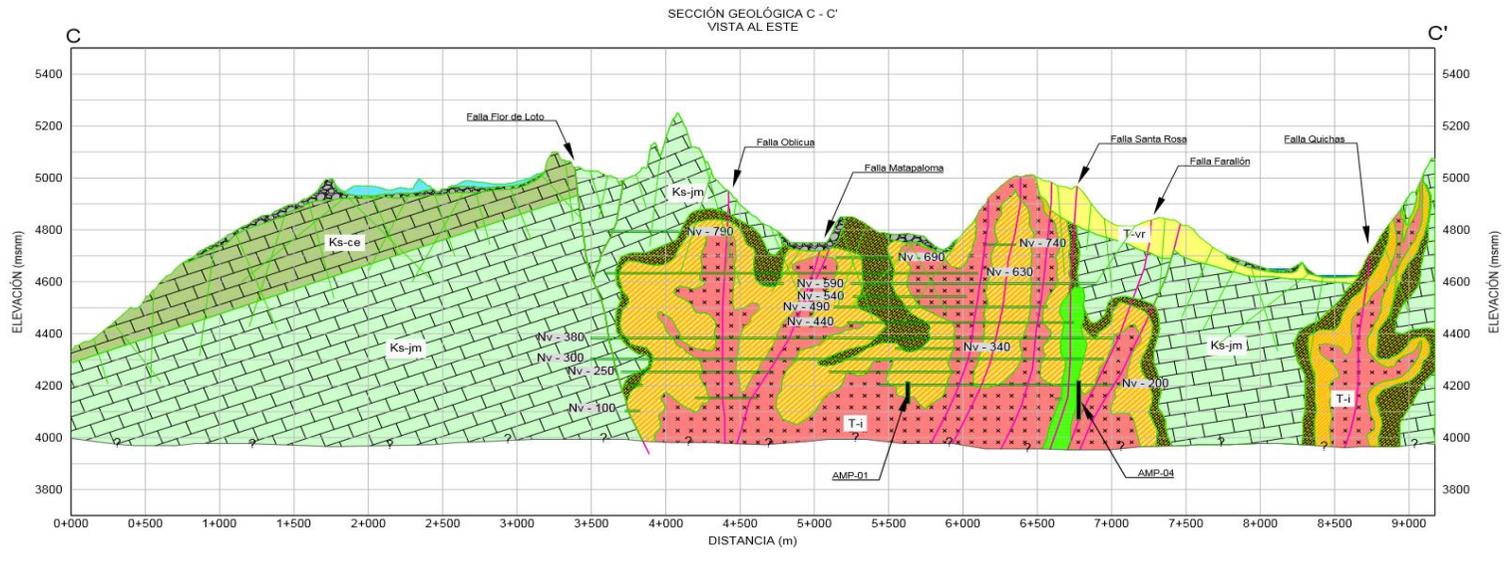
SECCIÓN GEOLÓGICA B - B'
VISTA AL NORESTE



LEYENDA	
	Depósito Coluvial (Q-co) - Grava angulosa de composición polimíctica.
	Depósito Morrenico (Q-mo) - Fragmentos de roca de composición polimíctica en matriz arcillosa.
	Nevados Perpetuos (Q-nv) - Glaciares ubicados en las partes altas de las cadenas montañosas.
	Formación Celendin (Ks-ce) - Calizas margosas nodulares con presencia de fósiles.
	Formación Jumasha (Ks-jm) - Calizas con potencia de 1000 m descritas como micritas.
	Intrusivo (T-i) - Stock complejo de composición granodiorita, diorita.
	Mármol
	Skarn
	Falla
	Niveles de labores subterráneas
	Sondaje



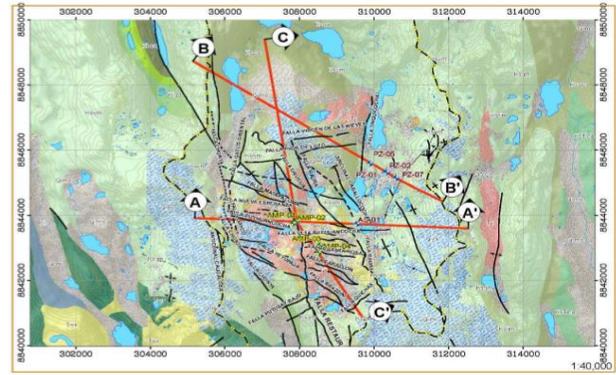
	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.		
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLOGICO		
TITULO:	SECCIÓN GEOLÓGICA B-B'			
EMPRESA:	PROYECCIÓN: UTM	PROYECTO N°: 200_10	FIGURA N°:	
AMPHOS Ingeniería y Estudios Geológicos	FECHA:	Nov. 2010		
	ZONA:	18 S		
	ESCALA:	1:25,000	APROBADO: E. Ruiz	4.3
	DIBUJADO: R. Mayta	REVISOR: 1		



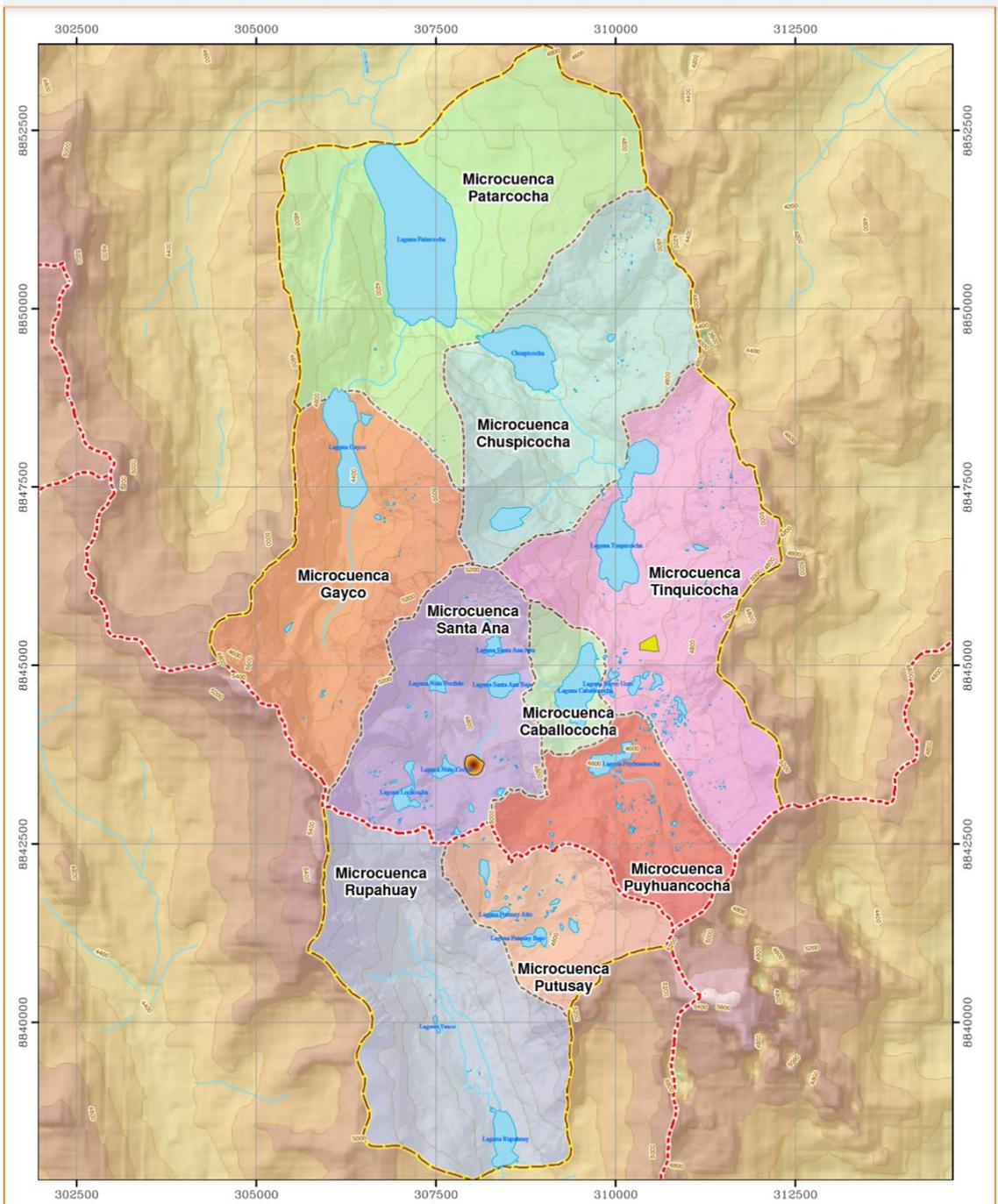
LEYENDA

	Depósito Coluvial (Q-co) - Grava angulosa de composición polimíctica.
	Depósito Morrenico (Q-mo) - Fragmentos de roca de composición polimíctica en matriz arcillosa.
	Nevados Perpetuos (Q-nv) - Glaciares ubicados en las partes altas de las cadenas montañosas.
	Volcánico Raura (T-vr) - Flujos riolíticos y tobas de composición dacítica y riódacítica.
	Formación Celendin (Ks-ce) - Calizas margosas nodulares con presencia de fósiles.
	Formación Jumasha (Ks-jm) - Calizas con potencia de 1000 m descritas como micritas.
	Intrusivo (T-i) - Stock complejo de composición granodiorita, diorita.
	Dique - Pórfido dacítico, corta al intrusivo.
	Mármol
	Skarn
	Falla
	Niveles de labores subterráneas

Sondaje



	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLOGICO
TÍTULO:		
SECCIÓN GEOLÓGICA C-C'		
EMPRESA:	PROYECCIÓN: UTM	PROYECTO: R ^o 256-10
	FECHA: 18/05/2015	FIGURA N ^o :
	ESCALA: 1:30,000	APPROBADO: E. Ruiz
DIBUJADO: R. Mayta	REVISIÓN: 1	4.4

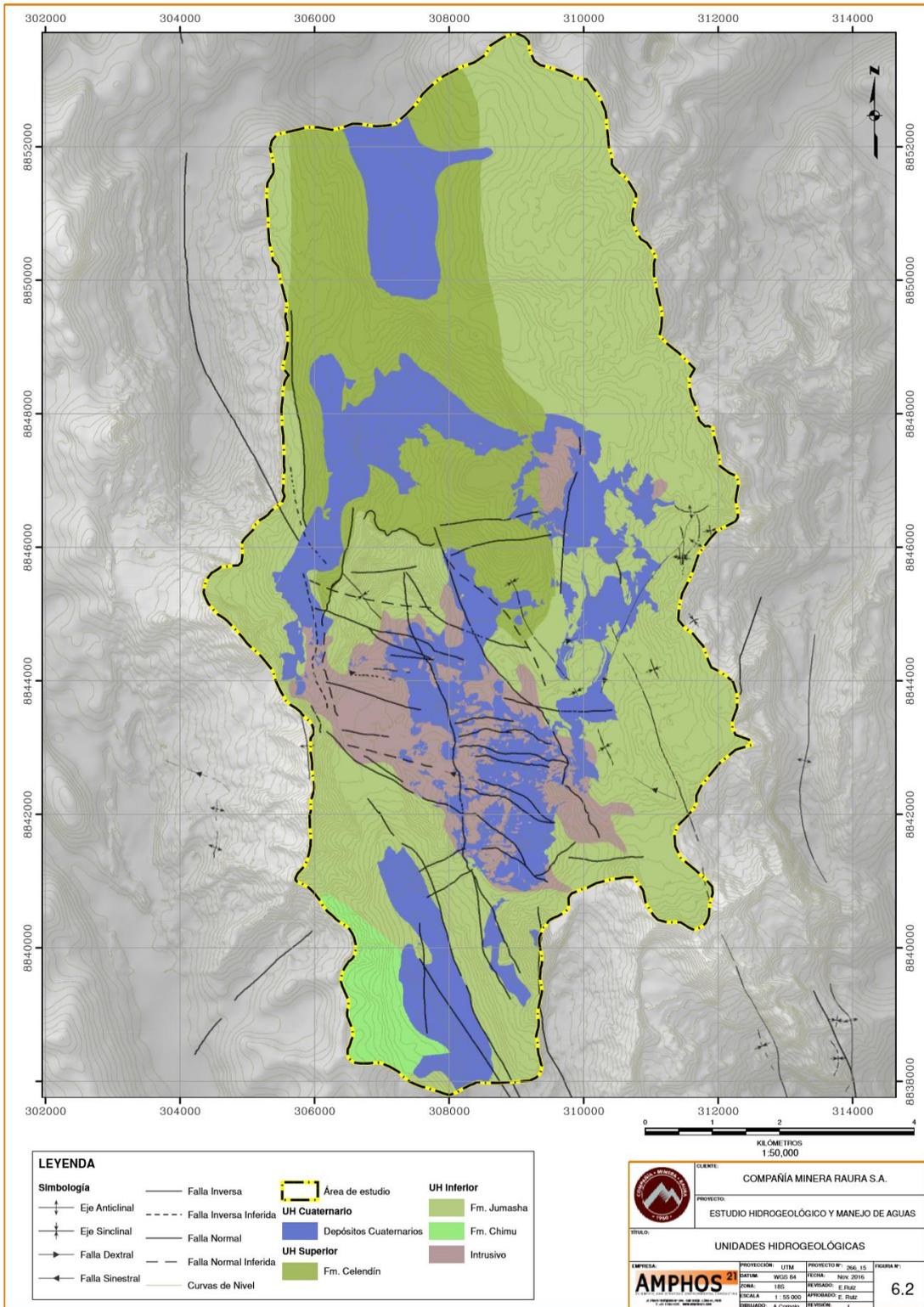


LEYENDA

— Curvas de nivel (marm)	▭ Área de Estudio	▭ Pataasco
— Ríos y Quebradas	▭ División de Vertientes	▭ Putusay
▭ Lagunas	Microcuencas	▭ Puyhuancocha
▭ Depósitos	▭ Caballococha	▭ Rupahuay
▭ Relavera	▭ Chuspicocha	▭ Santa Ana
▭ Tajos	▭ Gayco	▭ Tinquicocha



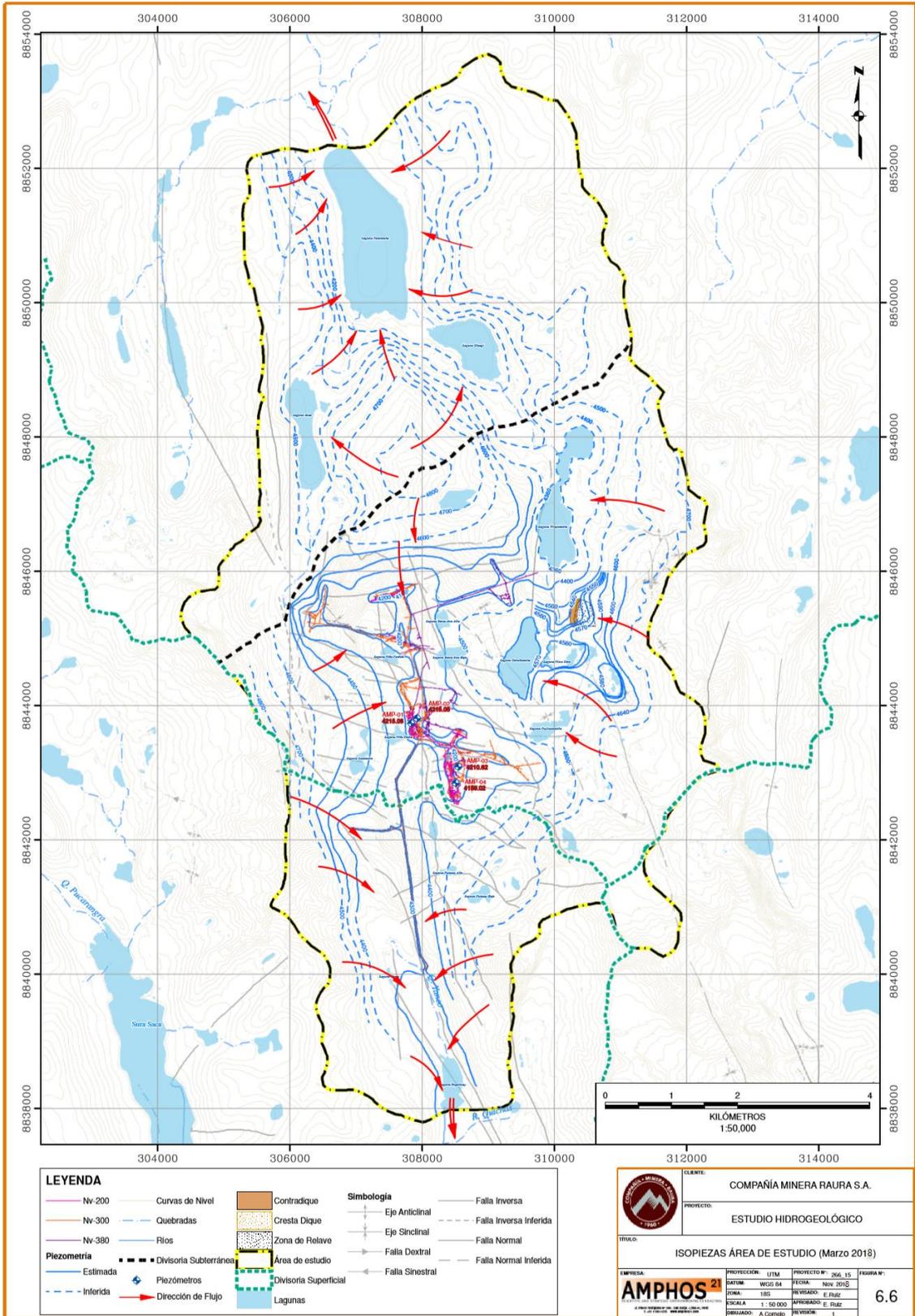
	CLIENTE:		COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.
	TÍTULO:		ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MANEJO DE AGUAS
		HIDROGRAFÍA LOCAL	
EMPRESA:	PROYECCIÓN:	UTM	PROYECTO N°:
AMPHOS 21	ZONA:	18S	06G.15
	FECHA:	Nov. 2016	FIGURA N°:
	REVISADO:	J. Zaba	5.2
	ESCALA:	1:50,000	
	DISEÑADO:	E. Velazco	
	REVISOR:		



LEYENDA

Simbología	— Falla Inversa	□ Área de estudio	UH Inferior
↕ Eje Anticlinal	- - - Falla Inversa Inferida	■ UH Cuaternario	■ Fm. Jumasha
↕ Eje Sinclinal	— Falla Normal	■ Depósitos Cuaternarios	■ Fm. Chimu
↗ Falla Dextral	- - - Falla Normal Inferida	■ UH Superior	■ Intrusivo
↖ Falla Sinistral	— Curvas de Nivel	■ Fm. Celendin	

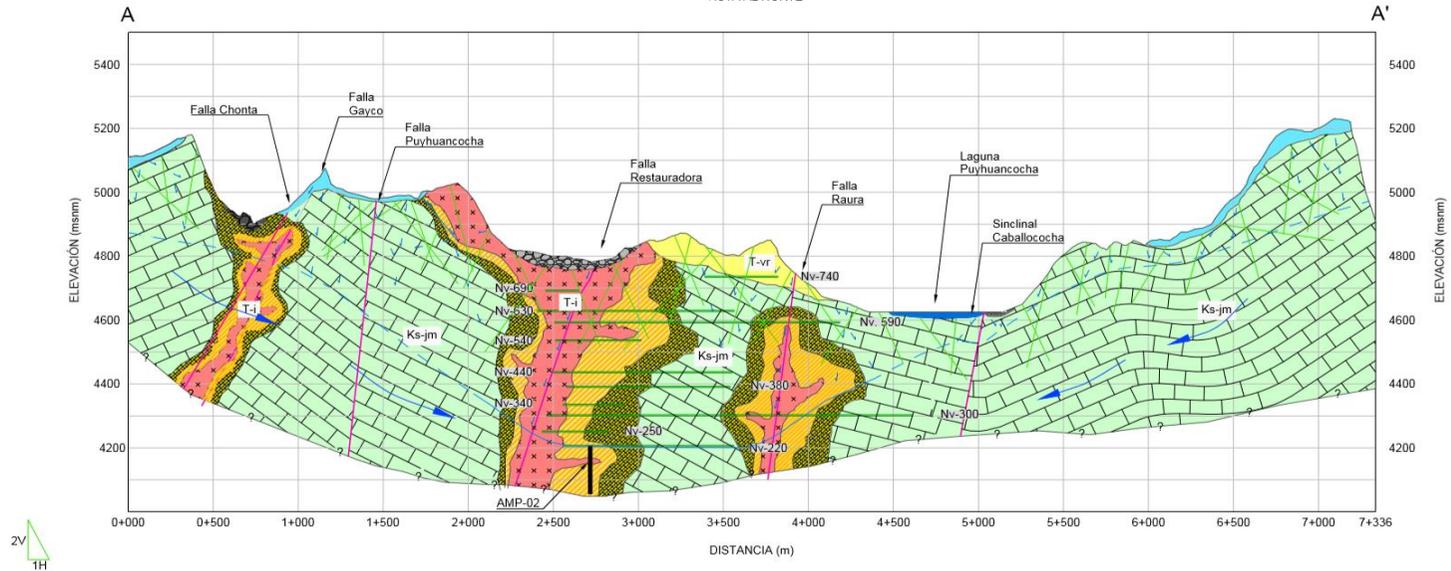
	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.		
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MANEJO DE AGUAS		
TITULO:	UNIDADES HIDROGEOLOGICAS			
	PROTECCION:	UTM	PROYECTO N°:	206.15
	DATUM:	WGS 84	FECHA:	Nov. 2015
	ESCALA:	1:50,000	REVISADO:	E. Ruiz
	DESEÑADO:	A. Cotoche	APROBADO:	E. Ruiz
			REVISOR:	1
				6.2



LEYENDA		Simbología	
Nv-200	Curvas de Nivel	Eje Anticlinal	Falla Inversa
Nv-300	Quebradas	Eje Sinclinal	Falla Inversa Inferida
Nv-380	Ríos	Falla Dextral	Falla Normal
Estimada	Divisoria Subterránea	Falla Sinistral	Falla Normal Inferida
Interida	Piezómetros		
	Divisoria Superficial		
	Lagunas		
	Contradique		
	Cresta Dique		
	Zona de Relave		
	Área de estudio		
	Dirección de Flujo		

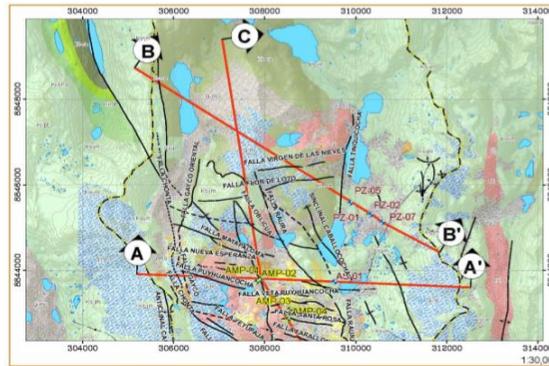
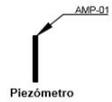
	CLIENTE:	COMPANHIA MINERA RAURA S.A.
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLOGICO
TITULO:		
ISOPIEZAS AREA DE ESTUDIO (Marzo 2018)		
EMPRESA:	PROYECTOR:	UTM
	FECHA:	Marzo 2018
	ESCALA:	1:50.000
	APPROBADO:	E. Ruiz
	REVISADO:	E. Ruiz
DIBUJADO:		A. Camp
REVISION:		1
FIGURA Nº:		6.6

SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA A - A'
VISTA AL NORTE



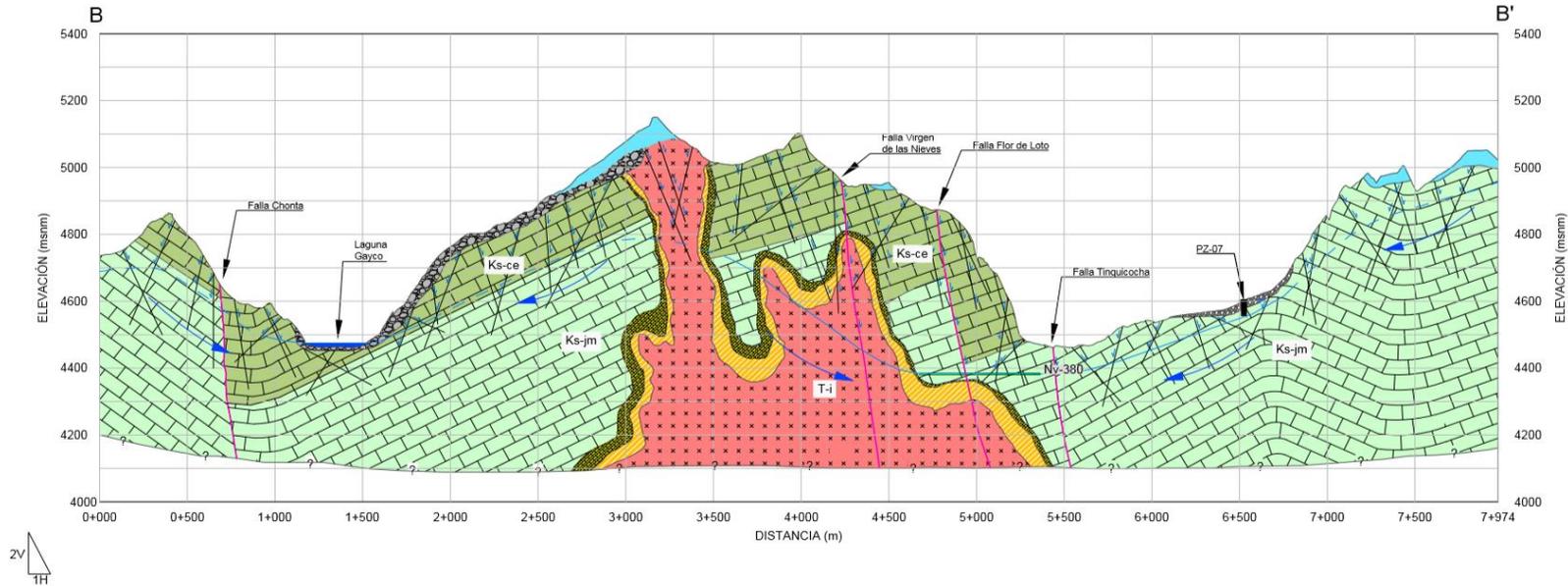
LEYENDA

- Depósito Coluvial (Q-co) - Grava angulosa de composición polimíctica.
- Depósito Morrénico (Q-mo) - Fragmentos de roca de composición polimíctica en matriz arcillosa.
- Nevados Perpetuos (Q-nv) - Glaciares ubicados en las partes altas de las cadenas montañosas.
- Volcánico Raura (T-vr) - Flujos riolíticos y tobas de composición dacítica y riódacítica.
- Formación Jumasha (Ks-jm) - Calizas con potencia de 1000 m descritas como micritas.
- Intrusivo (T-I) - Stock complejo de composición granodiorita, diorita.
- Mármol
- Skarn
- Falla
- Niveles de labores subterráneas
- Líneas de Flujo
- Nivel freático
- Nivel freático inferido



	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.		
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO		
TÍTULO:				
SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA A-A'				
EMPRESA:	PROYECCIÓN:	UTM	PROYECTO N°:	256_15
	DATUM:	WGS 84	FECHA:	Nov. 2016
	ZONA:	18 S	REVISADO:	L. Huamant
	ESCALA:	1:25,000	APROBADO:	E. Ruiz
	DIBUJADO:	R. Mayta	REVISIÓN:	1
FIGURA N°:				6.7

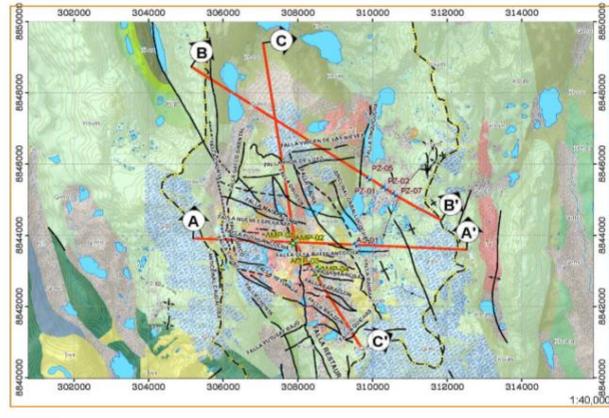
SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA B - B'
VISTA AL NORESTE



LEYENDA

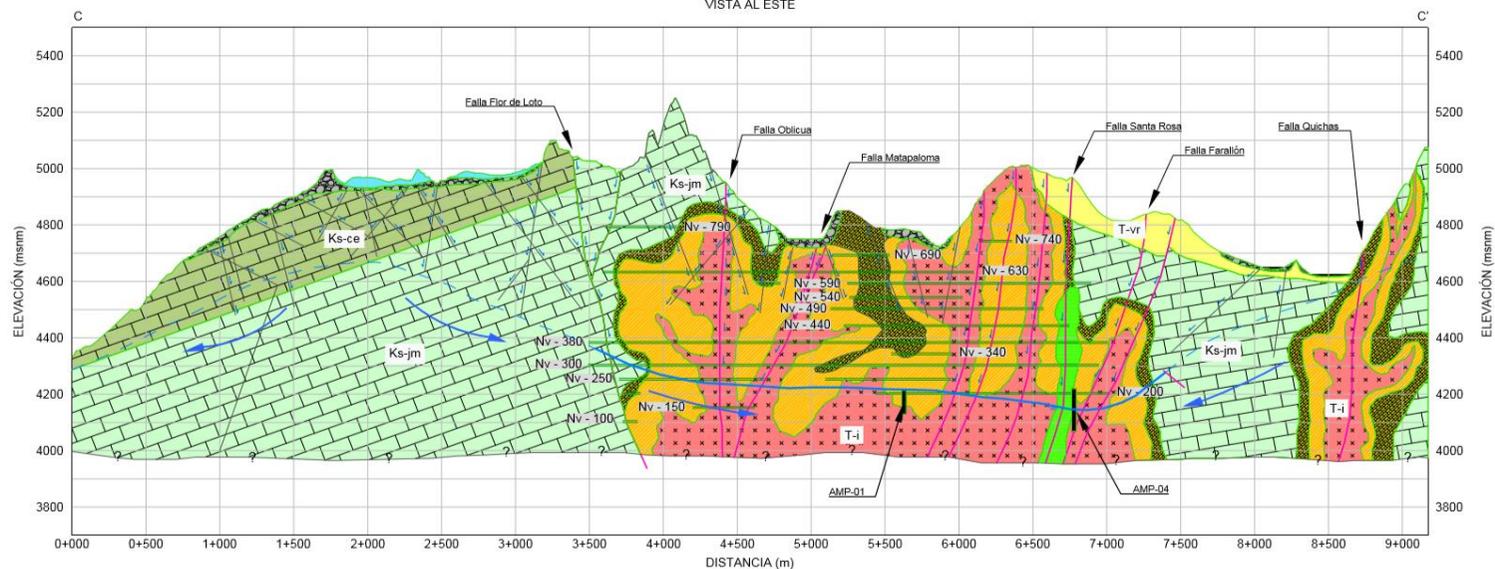
- Depósito Coluvial (Q-co) - Grava angulosa de composición polimíctica.
- Depósito Morrénico (Q-mo) - Fragmentos de roca de composición polimíctica en matriz arcillosa.
- Nevados Perpetuos (Q-nv) - Glaciares ubicados en las partes altas de las cadenas montañosas.
- Formación Celendín (Ks-ce) - Calizas margosas nodulares con presencia de fósiles.
- Formación Jumasha (Ks-jm) - Calizas con potencia de 1000 m descritas como micritas.
- Intrusivo (T-i) - Stock complejo de composición granodiorita, diorita.
- Mármol
- Skarn
- Falla
- Niveles de labores subterráneas
- Línea de flujo
- Nivel freático
- Nivel freático inferido

Piezómetro



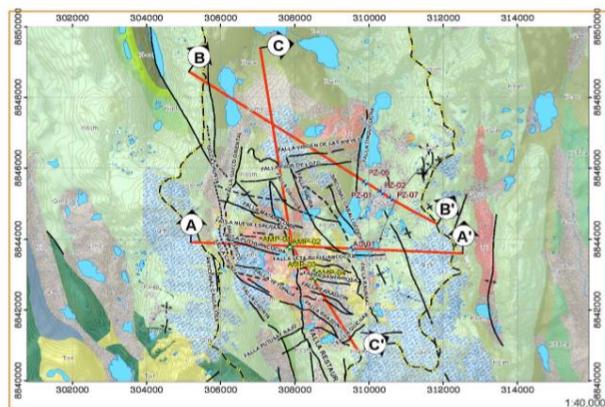
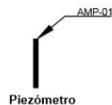
	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.		
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO		
TÍTULO:	SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA B-B'			
EMPRESA:	PROYECCIÓN: UTM	PROYECTO: H° 256_10	FIGURA N°	
AMPHOS	DATUM: WGS 84	FECHA: Nov 2016	8.8	
<small>Av. Pedro Sarmiento de Gamboa 1001 - San José - Lima - Perú T. +51 1 980 1007 - www.amphos.com</small>	ZONA: 18 S	REVISADO: L. HUAMANTLA		
	ESCALA: 1:25,000	APROBADO: E. RUIZ		
	DIBUJADO: J.L.	REVISIÓN: 1		

SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA C - C'
VISTA AL ESTE

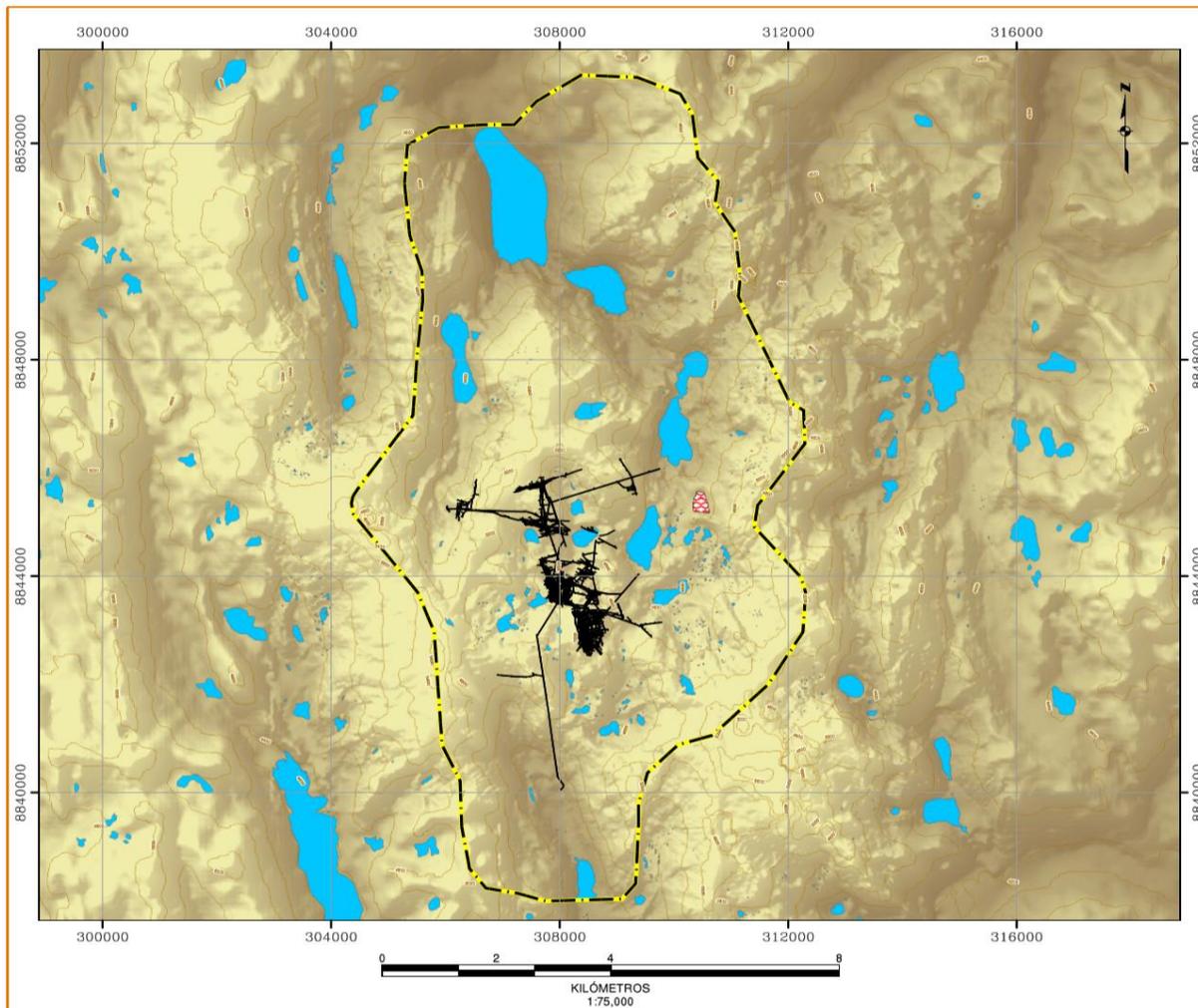


LEYENDA

- Depósito Coluvial (Q.co) - Grava angulosa de composición polimíctica.
- Depósito Morrénico (Q.mo) - Fragmentos de roca de composición polimíctica en matriz arcillosa.
- Nevados Perpetuos (Nv.) - Glaciares ubicados en las partes altas de las cadenas montañosas.
- Volcánico Raura (T.vr) - Flujos riolíticos y tobas de composición dacítica y riódacítica.
- Formación Celendín (Ks-ce) - Calizas margosas nodulares con presencia de fósiles.
- Formación Jumasha (Ks-jm) - Calizas con potencia de 1000 m descritas como micritas.
- Intrusivo (T-i) - Stock complejo de composición granodiorita, diorita.
- Dique - Pórfido dacítico, corta al intrusivo.
- Mármol - Roca metamórfica formada a partir de rocas caliza.
- Skarn - Roca metamorfozada con presencia de carbonatos y minerales.
- Falla
- Nivel de labores subterráneas
- Línea de flujo
- Nivel freático
- Nivel freático inferido



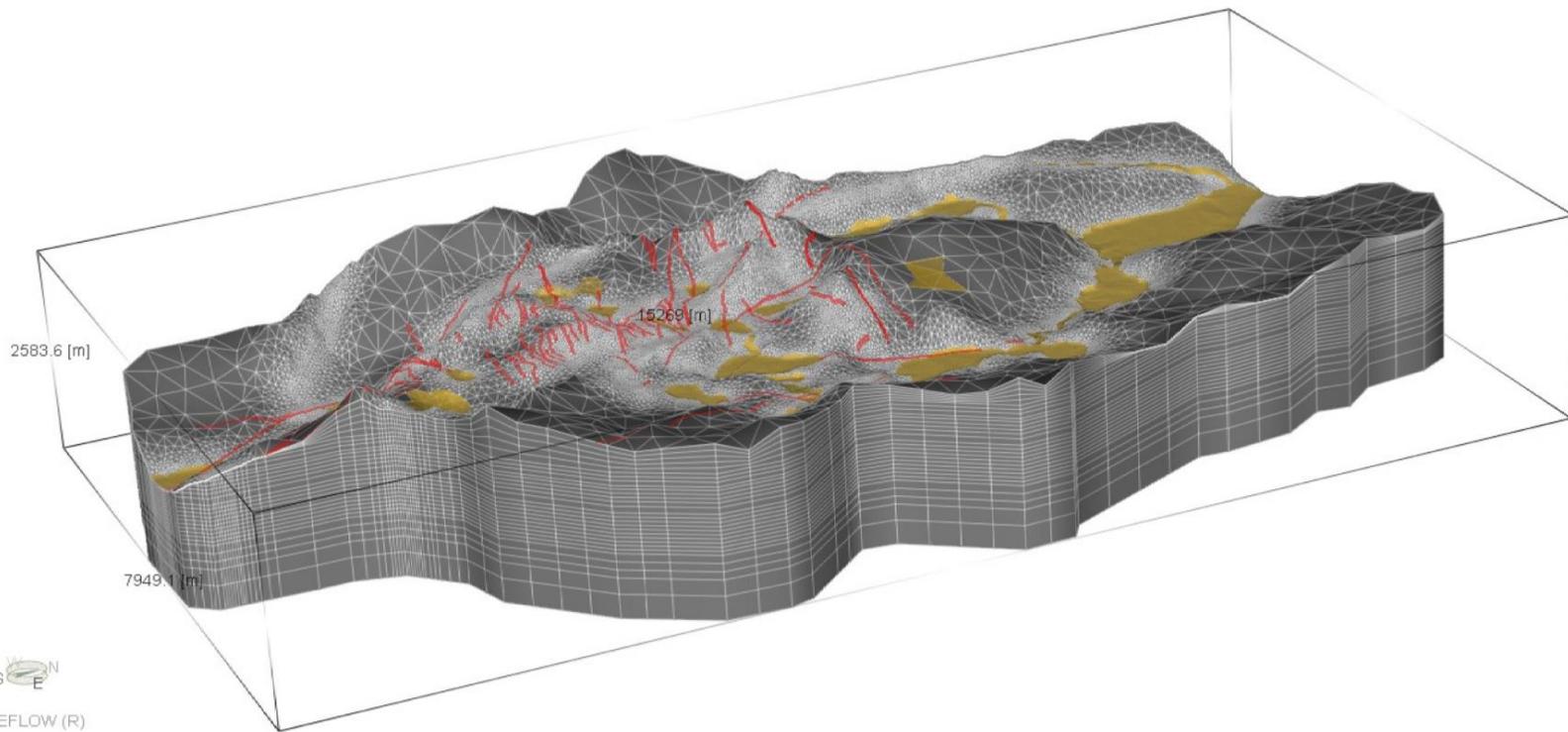
	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.	
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA C-C'		
EMPRESA:	PROYECCIÓN: UTM	PROYECTO N°: 205_15	FIGURA N°:
	FECHA: WGS 84	FECHA: Nov. 2016	
	ZONA: 18 S	REVISADO: L. Huamani	
	ESCALA: 1:40,000	APROBADO: E. Ruiz	
	DESBARDO: J. L.	REVISOR: T	
			6.9



LEYENDA

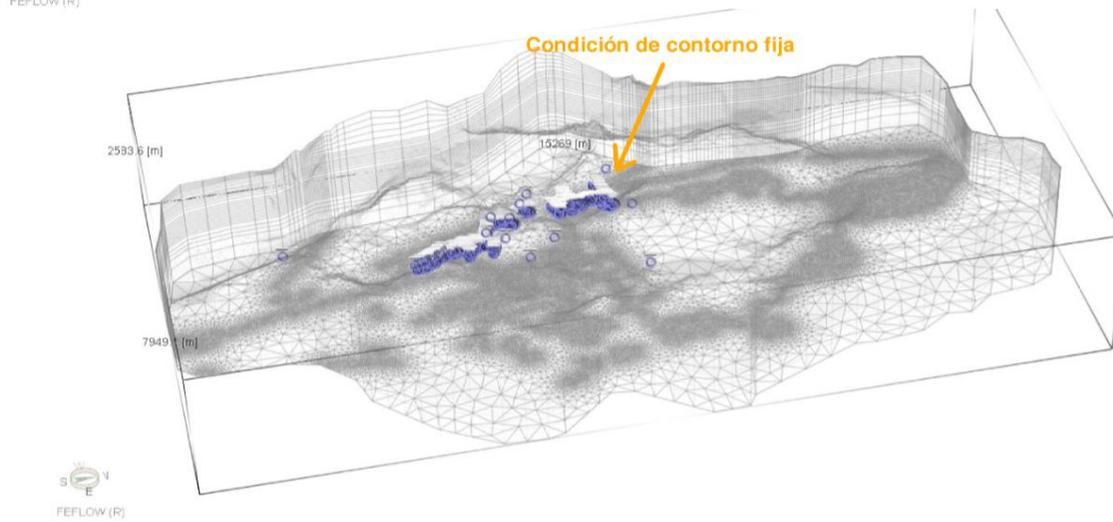
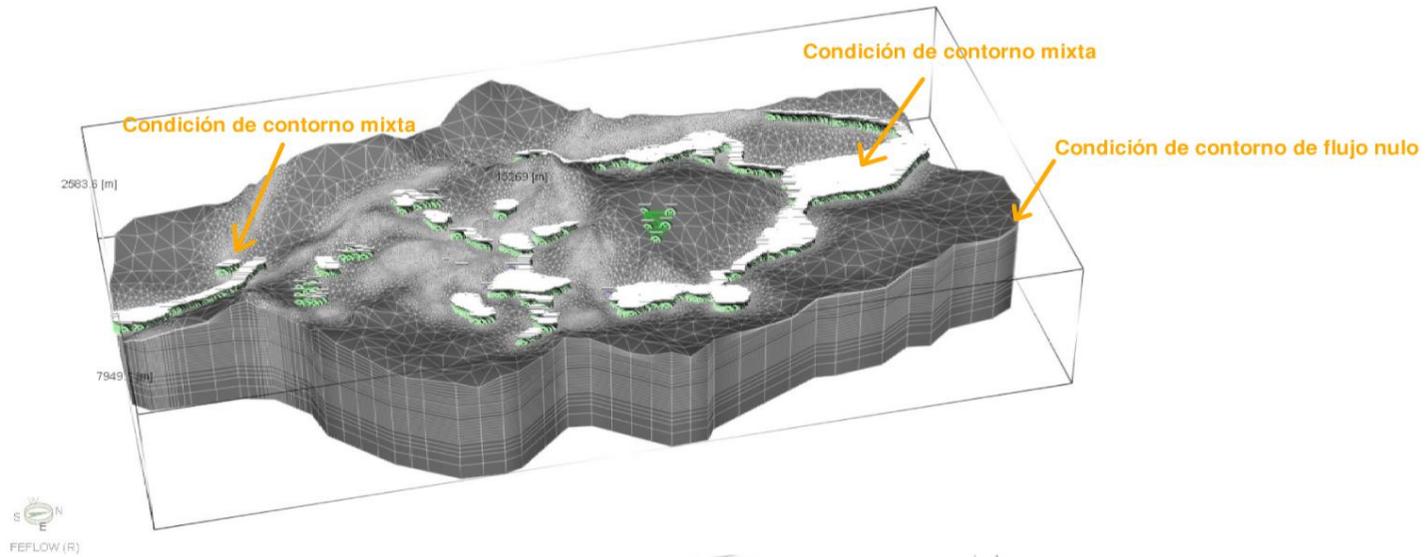
- Niveles Mina Compilados
- Límite Modelo
- Zona de Relave
- Lagunas
- Ríos y Quebradas
- Curvas de Nivel (msnm)

	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MANEJO DE AGUAS
TÍTULO:		
LÍMITES DEL MODELO NUMÉRICO		
EMPRESA:	PROYECCIÓN:	UTM
	DATUM:	WGS 84
	FECHA:	Nov. 2016
	ESCALA:	1:75,000
	APROBADO:	E. Ruiz
	DISEÑADO:	A. Cornejo
	REVISIÓN:	1
		7.1

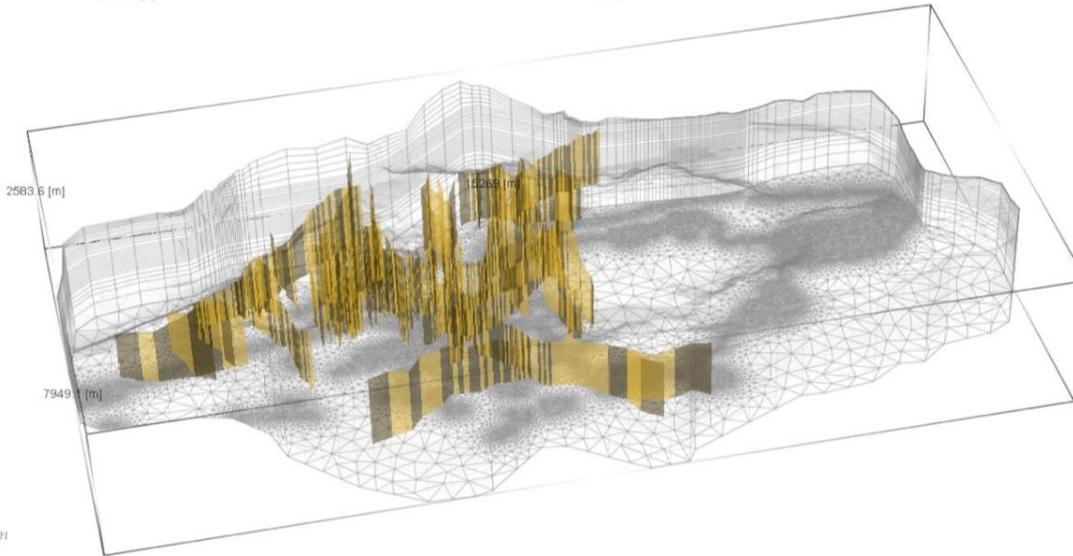
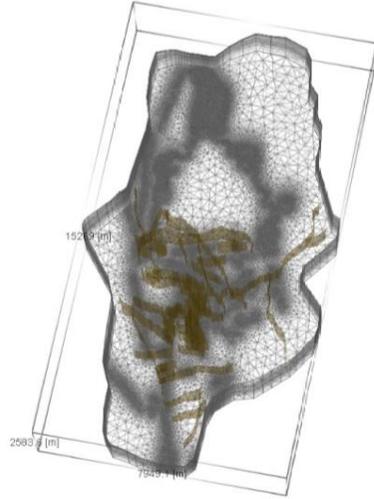


FEFLOW (R)

	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.		
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MANEJO DE AGUAS		
TITULO:				
DISCRETIZACIÓN DE MALLA DEL MODELO NUMÉRICO				
EMPRESA:	PROYECCIÓN:	UTM	PROYECTO N°:	266-15
	DATUM:	WGS 84	FECHA:	Nov 2016
	ESCALA:	1:20,000	APROBADO:	E. Ruiz
	DIBUJADO:	A. Cornejo	REVISIÓN:	1



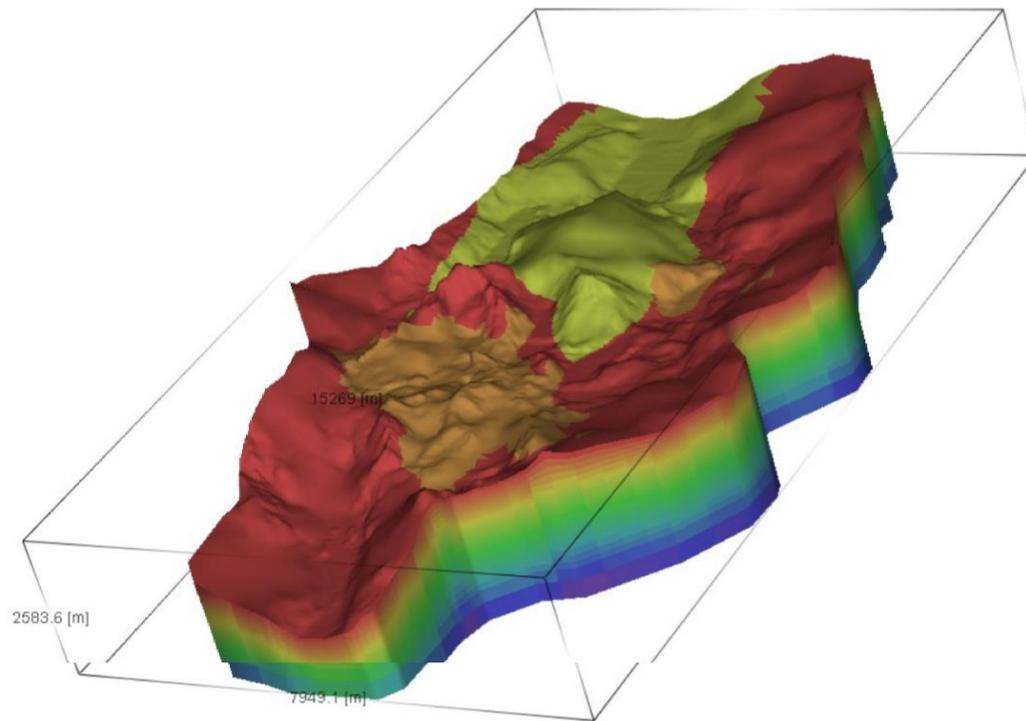
	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.		
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MANEJO DE AGUAS		
TÍTULO: CONDICIONES DE CONTORNO IMPLEMENTADAS EN EL MODELO NUMÉRICO				
EMPRESA:	PROYECCIÓN:	PROYECTO N°:	FIGURA N°:	
AMPHOS 21	UTM	266_15	7.3	
	DATUM:	FECHA:		
	WGS 84	Nov. 2016		
	ZONA:	REVISADO:		
	18 S	E. Ruiz		
	ESCALA:	ELABORADO:		
	1:50.000	E. Ruiz		
		REVISIÓN:		
		1		



	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAÚRA S.A.	
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MANEJO DE AGUAS	
TÍTULO:			
FRACTURACIÓN IMPLEMENTADA EN EL MODELO NUMÉRICO			
EMPRESA:	PROYECCIÓN: UTM	PROYECCIÓN N°: 268-16	FIGURA N°:
	ENTUM: VGSB 84	FECHA: Nov 2016	7.4
	ESCALA: 1:50.000	APROBADO: E. Ruiz	
	DISEÑADO: A. Cornejo	REVISIÓN: 1	

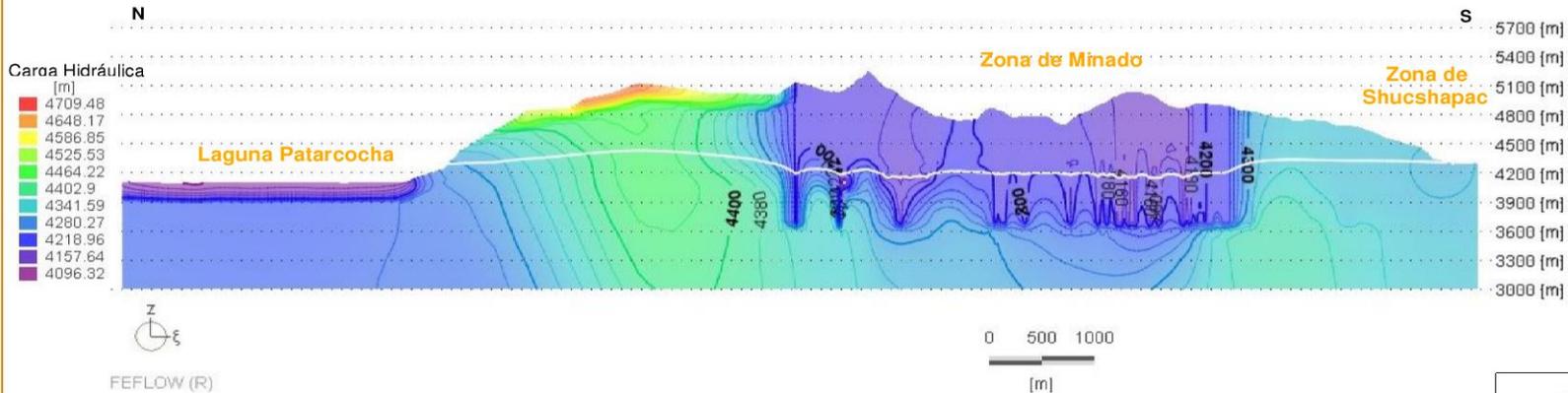
Permeabilidad

- [m/d]
- 1
 - 0.127774
 - 0.0163261
 - 0.00208604
 - 0.00026654
 - 3.40568e-05
 - 4.35156e-06
 - 5.56014e-07
 - 7.10438e-08
 - 9.07752e-09
 - 1.15987e-09

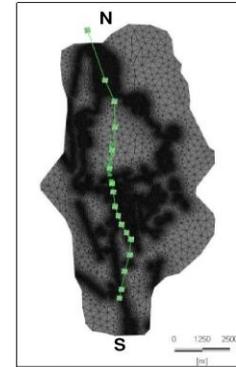
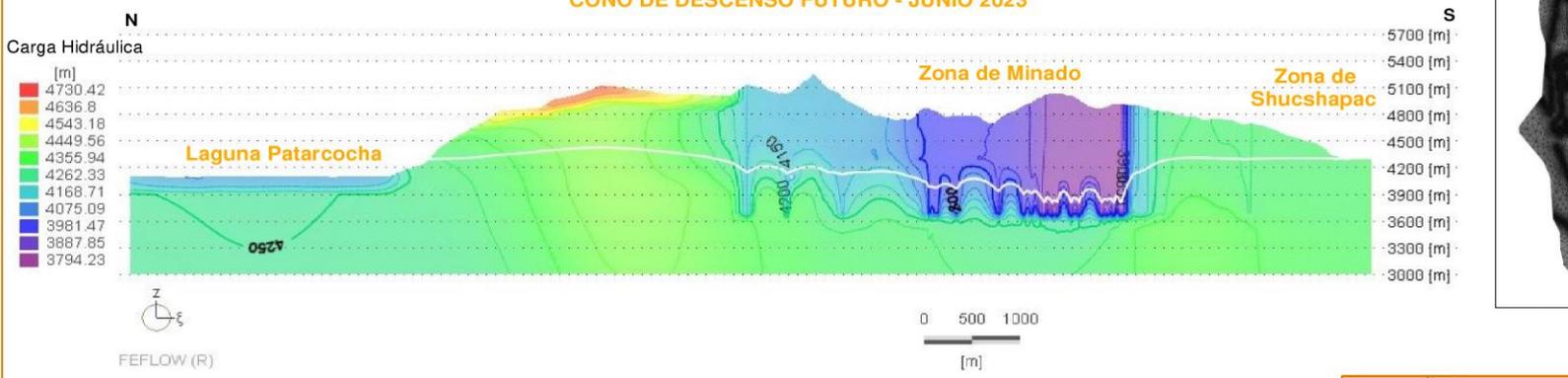


	CLIENTE:	COMPAÑÍA MINERA RAURA S.A.			
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y DE MANEJO DE AGUAS			
	TÍTULO:	DISTRIBUCIÓN DE LA PERMEABILIDAD			
EMPRESA:	PROYECCIÓN:	UTM	PROYECTON°:	266_18	
	FECHA:	Nov. 2016	FIGURAN°:	7.5	
	DATUM:	WGS 84	REVISADO:		E. Ruiz
	ESCALA:	1:80.000	APROBADO:		E. Ruiz
	DISEÑADO:	A. Cornejo	REVISIÓN:		1

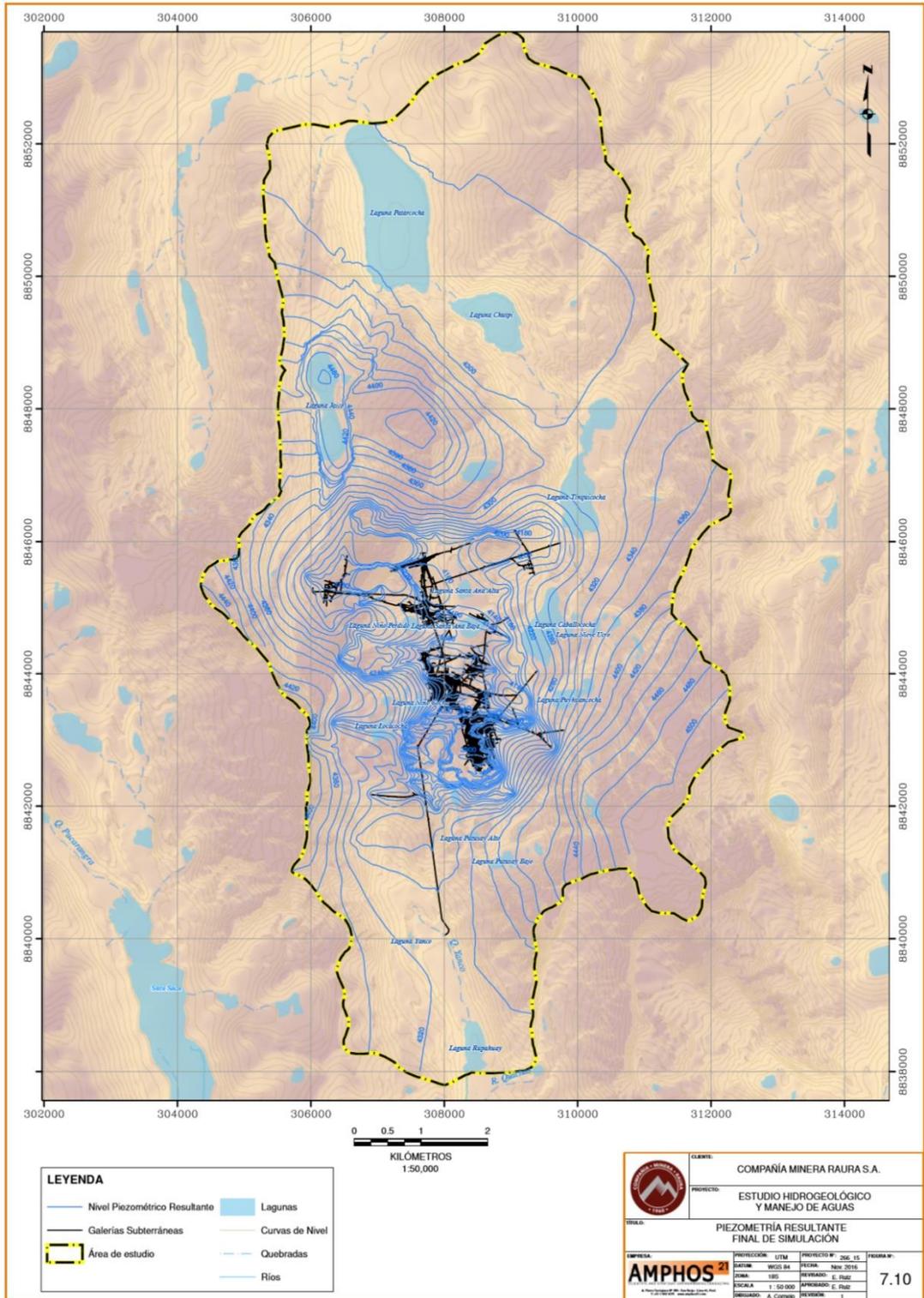
CONO DE DESCENSO ACTUAL - JULIO 2016



CONO DE DESCENSO FUTURO - JUNIO 2023



	CLIENTE:	COMPANIA MINERA RAURA S.A.
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y DE MANEJO DE AGUAS
TITULO:		
SECCIONES PIEZOMETRICAS - CONO DE DESCENSOS		
EMPRESA:	PROYECCION:	PROYECCION:
AMPHOS 21	UTM	266.15
	WGS 84	Nov. 2016
	ZONA:	REVISADO:
	18.S	E. Ruiz
	ESCALA:	APROBADO:
	1:20.000	E. Ruiz
FIGURAS:		
7.8		



LEYENDA

	Nivel Piezométrico Resultante		Lagunas
	Galerías Subterráneas		Curvas de Nivel
	Area de estudio		Quebradas
			Rios

0 0.5 1 2
KILÓMETROS
1:50.000

	CLIENTE:	COMPANÍA MINERA RAURA S.A.		
	PROYECTO:	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MANEJO DE AGUAS		
OBJETO:	PIEZOMETRÍA RESULTANTE FINAL DE SIMULACIÓN			
EMPRESA:	PROYECCION:	UTM	PROYECTO N°:	206-13
	FECHA:	WGS 84	FECHA:	May 2016
	ZONA:	18S	PREPARADO:	E. Plaza
	ESCALA:	1:50.000	REVISADO:	E. Plaza
	ELABORADO:	A. Cornejo	REVISOR:	1
				7.10

