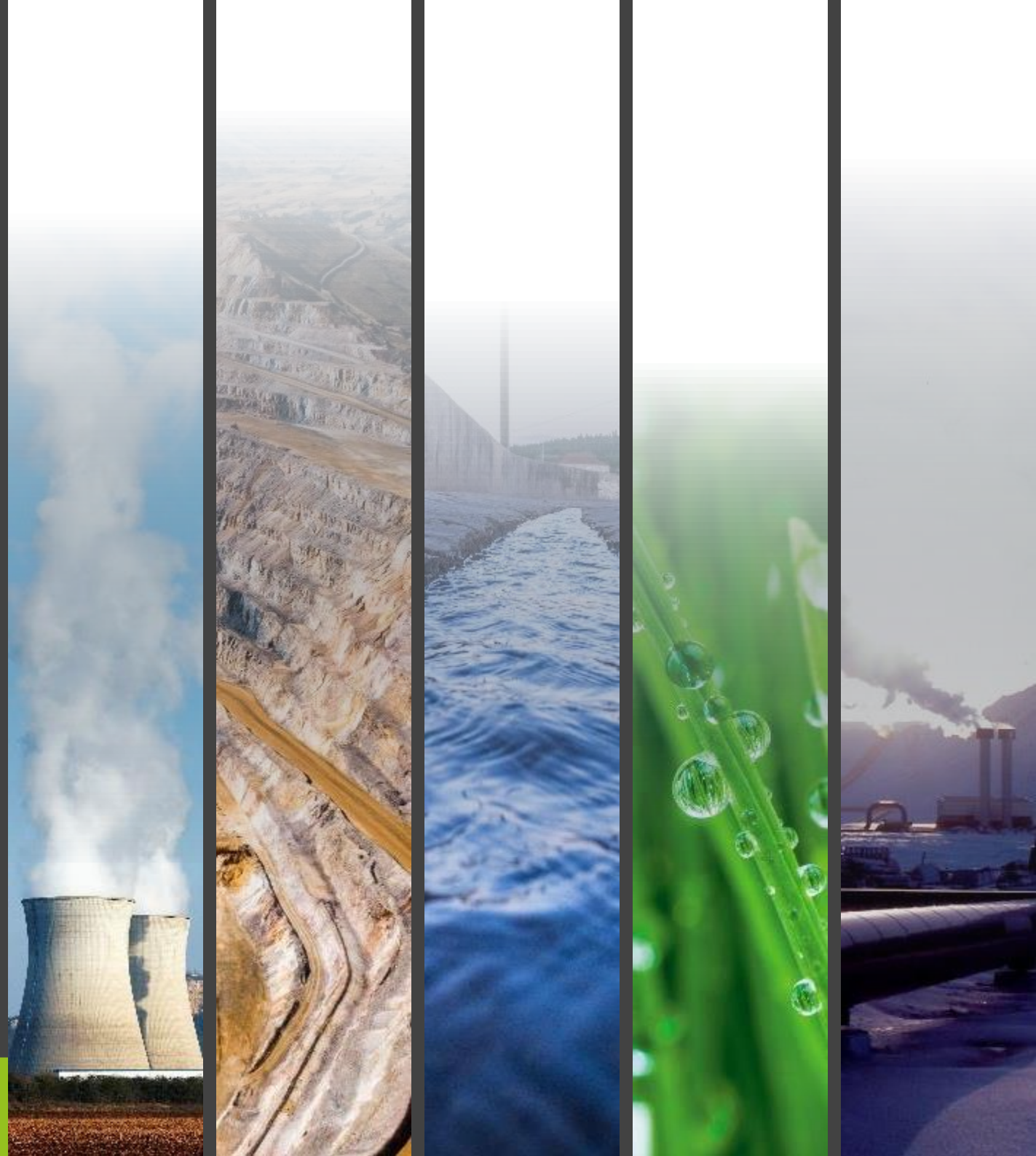


Efectos potenciales de ampliación y cierre de minas subterráneas en la operación y el medio ambiente

Caso de estudio de una mina en Perú



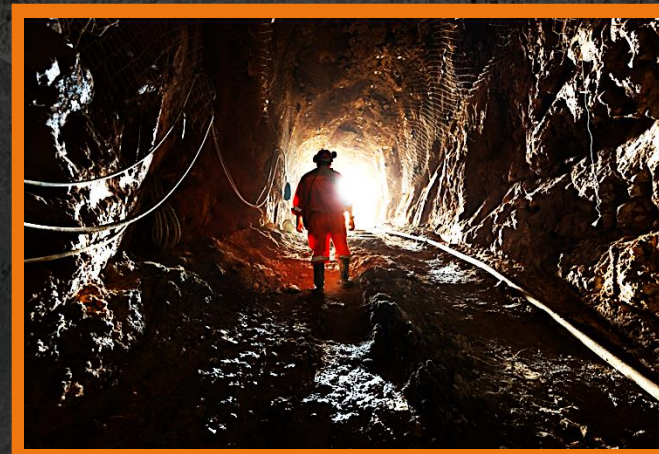
Introducción

Los proyectos mineros buscan alargar su vida útil, lo que implica la ampliación a sectores laterales o a mayor profundidad, mientras que zonas explotadas inician el cierre progresivo.

El aporte de agua subterránea hacia las labores condiciona el **CAPEX** y **OPEX**, afectando la viabilidad del proyecto.

La afectación no prevista de cuerpos de agua (quebradas, lagunas, bofedales) puede generar conflictos sociales y sanciones, impactando la reputación de la compañía.

Este estudio se centra en una mina subterránea en los Andes centrales del Perú para prever los efectos de la interacción del agua subterránea con la ampliación y el cierre de sectores mineros.



Un enfoque metodológico integral

Desafío Hidrogeológico

La operación en entornos geológicos complejos requiere comprender el flujo subterráneo y la conectividad estructural que controla el ingreso de agua a labores profundas.

Metodología Clave

Integración de levantamientos geológicos, perforación con instrumentación piezométrica, ensayos hidráulicos/trazadores y modelación numérica.



Caso de estudio



Ubicación

Sierra central del Perú, región Huánuco. Altitud entre 4,000 y 4,800 m.s.n.m.
Zona de alta montaña.



Clima y Topografía

Clima frío de alta montaña. Estacionalidad marcada: lluvias (Nov-Abr) y seca (May-Oct). Relieve escarpado con glaciares, bofedales y lagunas.



Geología

Formaciones sedimentarias, volcánicas e intrusivas (Mesozoico y Cenozoico). Sistema estructural complejo con fallas y fracturas que controlan el flujo subterráneo.



Ubicación

Sierra central del Perú, región Huánuco. Altitud entre 4,000 y 4,800 m.s.n.m. Zona de alta montaña.



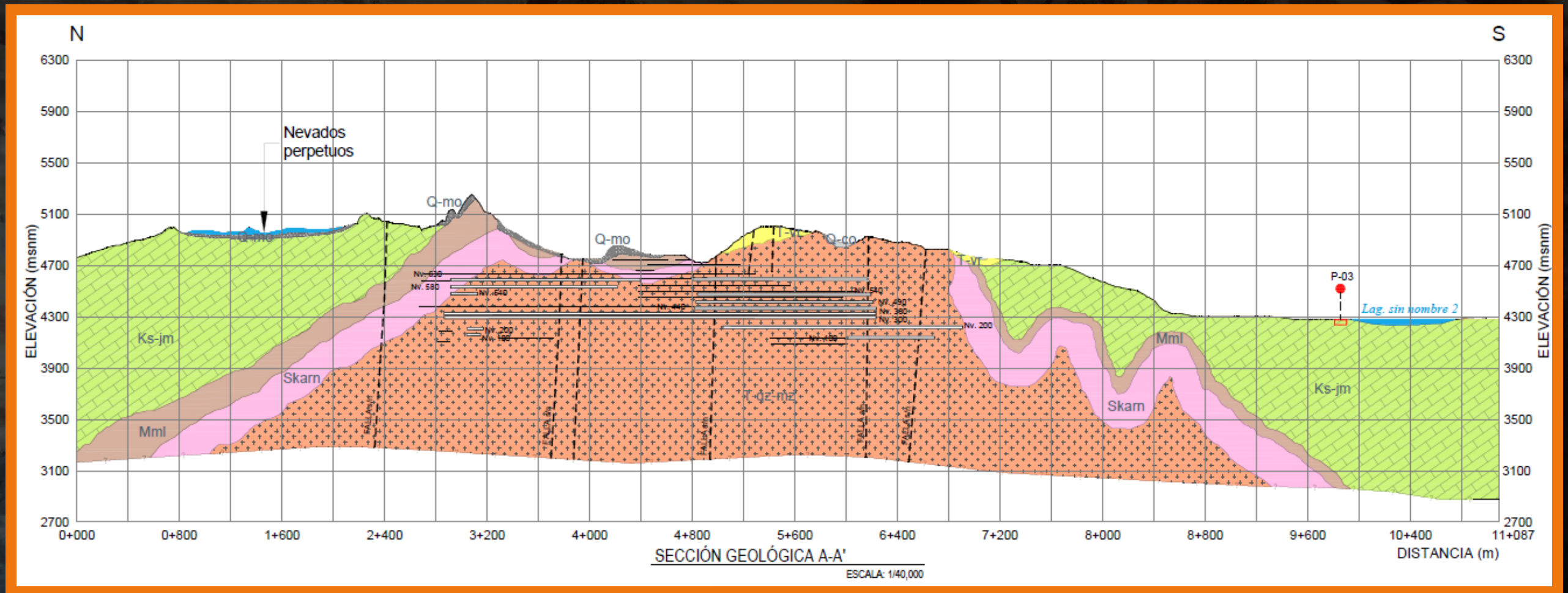
Clima y Topografía

Clima frío de alta montaña. Estacionalidad marcada: lluvias (Nov-Abr) y seca (May-Oct). Relieve escarpado con glaciares, bofedales y lagunas.



Geología

Formaciones sedimentarias, volcánicas e intrusivas (Mesozoico y Cenozoico). Sistema estructural complejo con fallas y fracturas que controlan el flujo subterráneo.

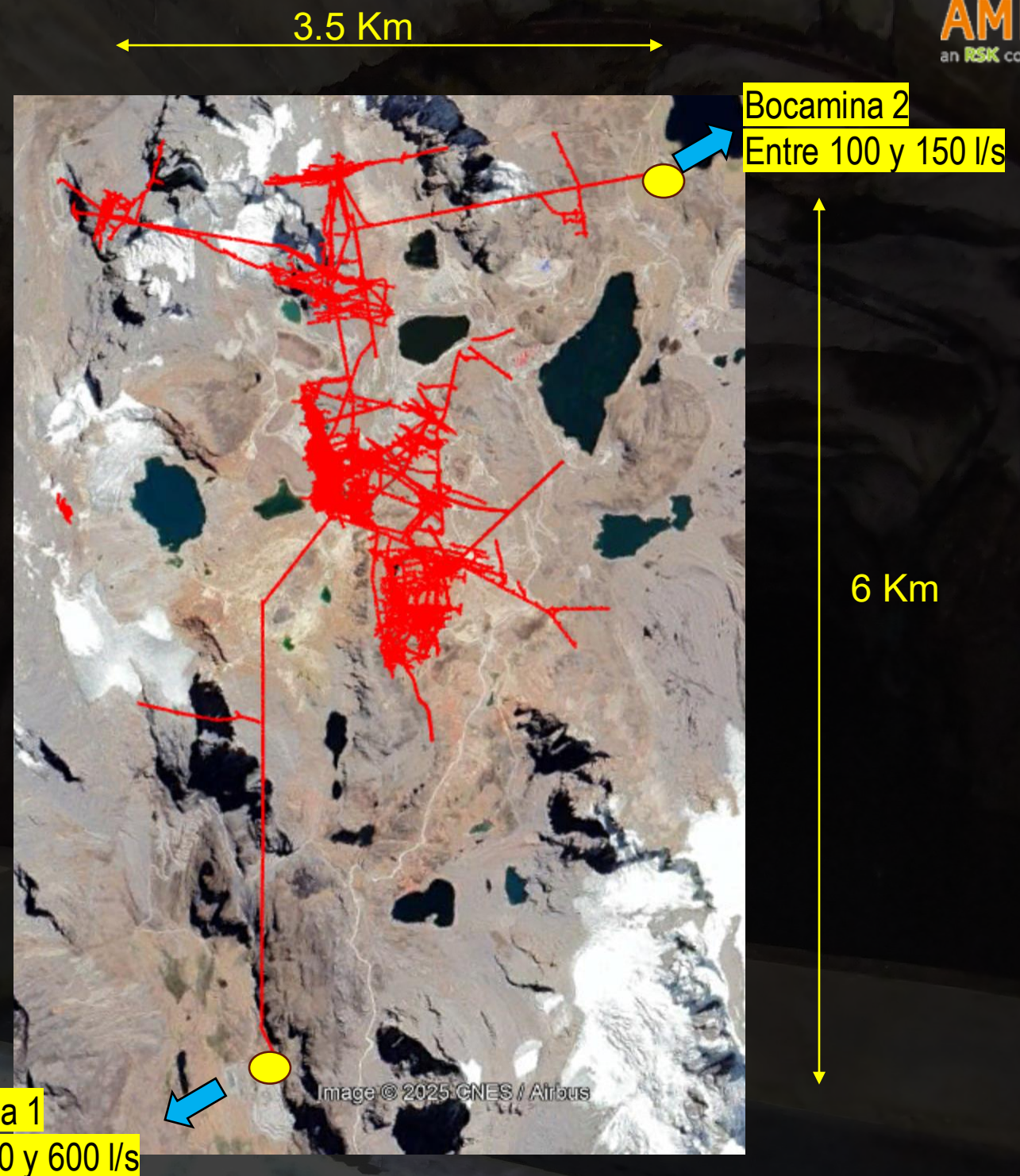


Geología

Formaciones sedimentarias, volcánicas e intrusivas (Mesozoico y Cenozoico). Sistema estructural complejo con fallas y fracturas que controlan el flujo subterráneo.

Caso de estudio

- Mina subterránea con más de 60 años de antigüedad
- Presenta 02 bocaminas de descarga de agua subterránea
- Tiene una extensión de 3.5 Km x 6 Km y aproximadamente 800 m de profundidad



Investigación de campo: mapeo y monitoreo



Mapeo Geológico e Hidrogeológico

Caracterización de unidades litológicas y estructurales. Identificación de zonas de recarga, descarga y rutas preferenciales de flujo (fallas y fracturas).



Perforaciones y Piezómetros

Sondajes diamantinos (DDH) desde superficie e interior mina. Instalación de piezómetros multinivel para monitoreo continuo de niveles piezométricos y calidad del agua.



Interacción Laguna-Mina

Se identificó un sumidero en la Laguna Sin Nombre 1 que causó su vaciado en época seca, evidenciando una fuerte conexión con el régimen de flujo subterráneo.

Investigación de campo: mapeo y monitoreo



Mapeo Geológico e Hidrogeológico

Caracterización de unidades litológicas y estructurales. Identificación de zonas de recarga, descarga y rutas preferenciales de flujo (fallas y fracturas).



Perforaciones y Piezómetros

Sondajes diamantinos (DDH) desde superficie e interior mina. Instalación de piezómetros multinivel para monitoreo continuo de niveles piezométricos y calidad del agua.



Interacción Laguna-Mina

Se identificó un sumidero en la Laguna Sin Nombre 1 que causó su vaciado en época seca, evidenciando una fuerte conexión con el régimen de flujo subterráneo.



Investigación de campo: mapeo y monitoreo



Mapeo Geológico e Hidrogeológico

Caracterización de unidades litológicas y estructurales. Identificación de zonas de recarga, descarga y rutas preferenciales de flujo (fallas y fracturas).



Perforaciones y Piezómetros

Sondajes diamantinos (DDH) desde superficie e interior mina. Instalación de piezómetros multinivel para monitoreo continuo de niveles piezométricos y calidad del agua.



Interacción Laguna-Mina

Se identificó un sumidero en la Laguna Sin Nombre 1 que causó su vaciado en época seca, evidenciando una fuerte conexión con el régimen de flujo subterráneo.

Investigación de campo: mapeo y monitoreo



Mapeo Geológico e Hidrogeológico

Caracterización de unidades litológicas y estructurales. Identificación de zonas de recarga, descarga y rutas preferenciales de flujo (fallas y fracturas).



Perforaciones y Piezómetros

Sondajes diamantinos (DDH) desde superficie e interior mina. Instalación de piezómetros multinivel para monitoreo continuo de niveles piezométricos y calidad del agua.



Interacción Laguna-Mina

Se identificó un sumidero en la Laguna Sin Nombre 1 que causó su vaciado en época seca, evidenciando una fuerte conexión con el régimen de flujo subterráneo.



Investigación de campo: mapeo y monitoreo



Mapeo Geológico e Hidrogeológico

Caracterización de unidades litológicas y estructurales. Identificación de zonas de recarga, descarga y rutas preferenciales de flujo (fallas y fracturas).



Perforaciones y Piezómetros

Sondajes diamantinos (DDH) desde superficie e interior mina. Instalación de piezómetros multinivel para monitoreo continuo de niveles piezométricos y calidad del agua.



Interacción Laguna-Mina

Se identificó un sumidero en la Laguna Sin Nombre 1 que causó su vaciado en época seca, evidenciando una fuerte conexión con el régimen de flujo subterráneo.

Investigación de campo: mapeo y monitoreo



Mapeo Geológico e Hidrogeológico

Caracterización de unidades litológicas y estructurales. Identificación de zonas de recarga, descarga y rutas preferenciales de flujo (fallas y fracturas).



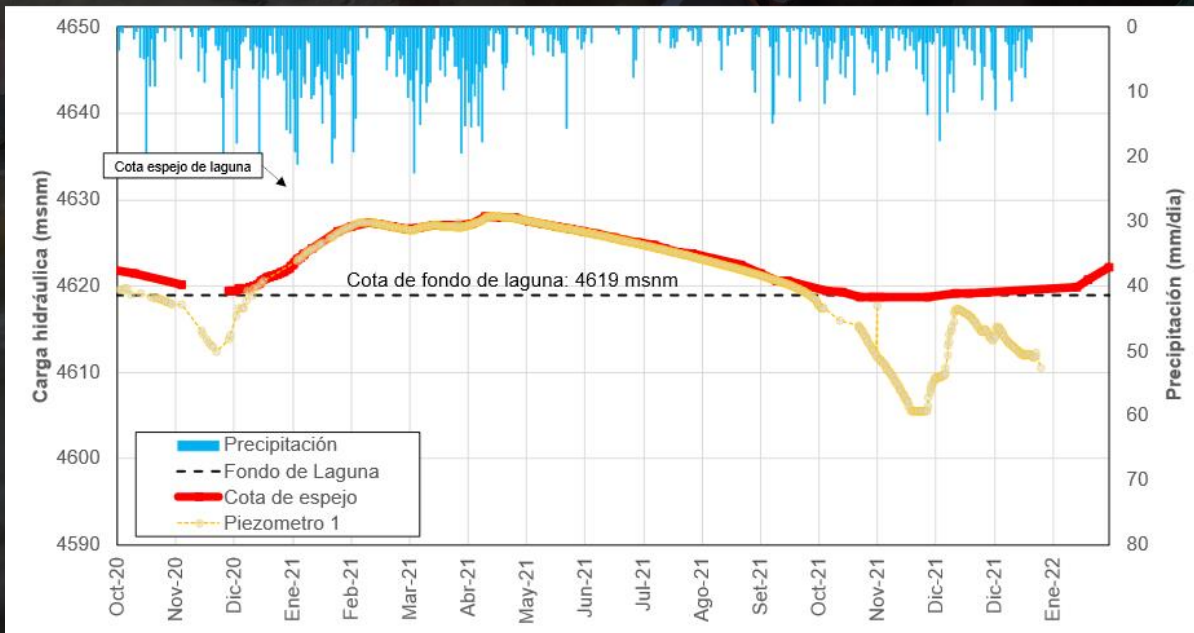
Perforaciones y Piezómetros

Sondajes diamantinos (DDH) desde superficie e interior mina. Instalación de piezómetros multinivel para monitoreo continuo de niveles piezométricos y calidad del agua.



Interacción Laguna-Mina

Se identificó un sumidero en la Laguna Sin Nombre 1 que causó su vaciado en época seca, evidenciando una fuerte conexión con el régimen de flujo subterráneo.



Ensayos hidráulicos y de trazadores

Ensayos Hidráulicos (Lugeon, Lefranc, Slug)

Cuantificación de la conductividad hidráulica (**K**). Variabilidad significativa: 1E-3 m/día (roca masiva) a 1 m/día (zonas fracturadas). Fundamental para definir unidades hidrogeológicas.

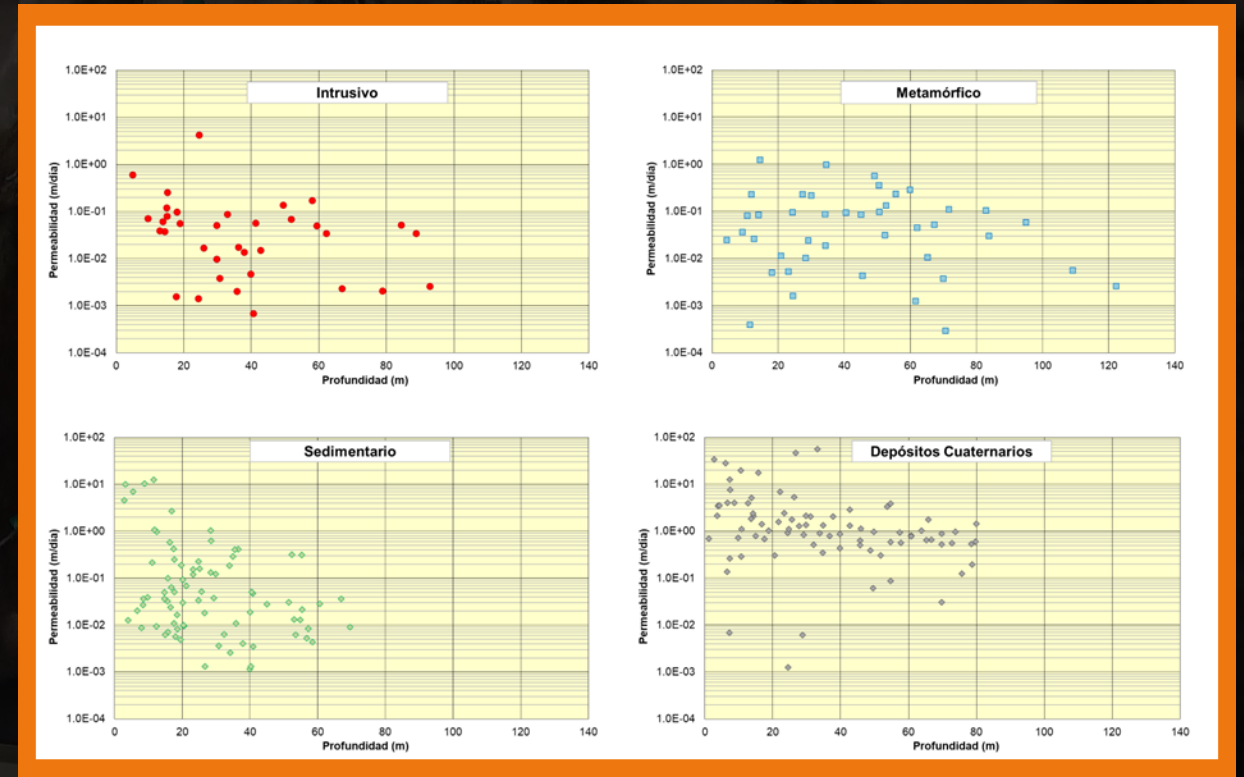
Ensayos de Trazadores (Rodamina WT, Uranina)

Evaluación de la conectividad hidráulica entre labores, bocaminas y descargas superficiales. Confirmó rutas preferenciales y conexiones con cuerpos de agua receptores.

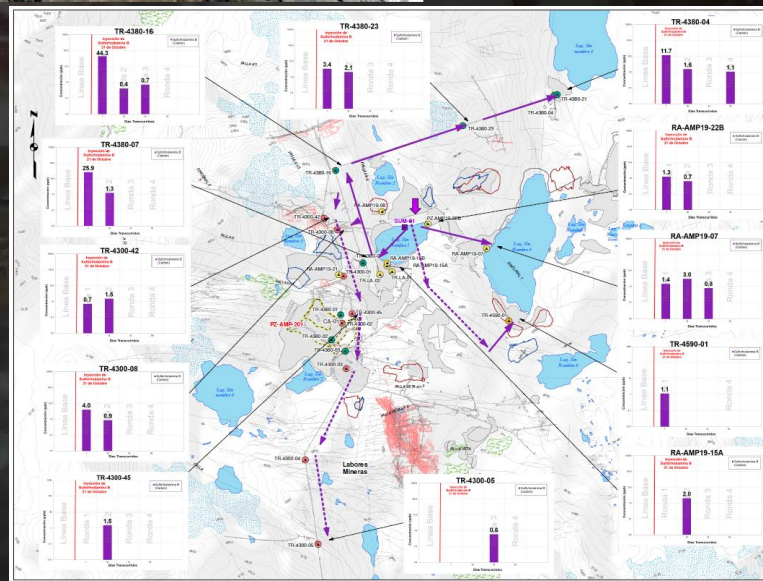
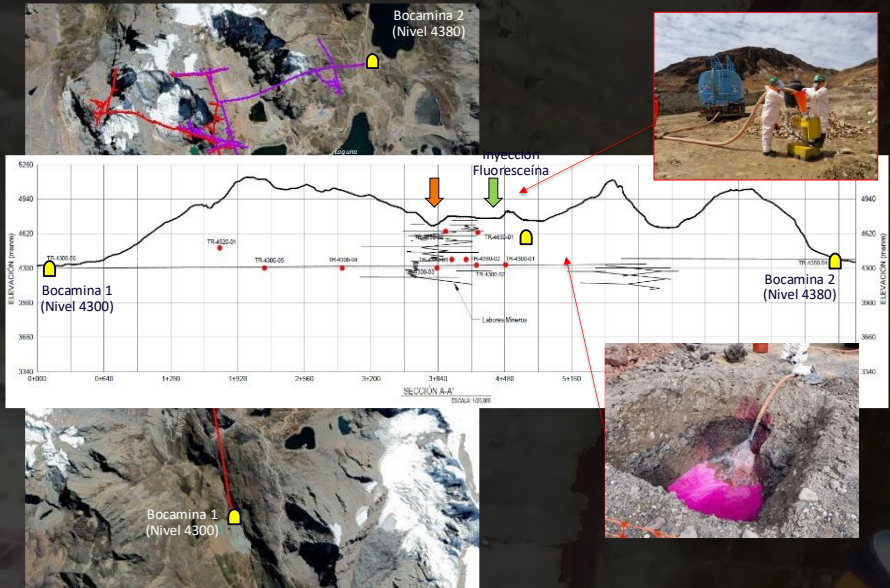
Ensayos hidráulicos y de trazadores

Ensayos Hidráulicos (Lugeon, Lefranc, Slug)

Cuantificación de la conductividad hidráulica (**K**). Variabilidad significativa: 1E-3 m/día (roca masiva) a 1 m/día (zonas fracturadas). Fundamental para definir unidades hidrogeológicas.



Ensayos hidráulicos y de trazadores



Ensayos de Trazadores (Rodamina WT, Uranina)

Evaluación de la conectividad hidráulica entre labores, bocaminas y descargas superficiales. Confirmó rutas preferenciales y conexiones con cuerpos de agua receptores.

Modelo conceptual y numérico



Modelo conceptual y numérico



Modelo conceptual y numérico



Modelo conceptual y numérico



Modelo conceptual y numérico

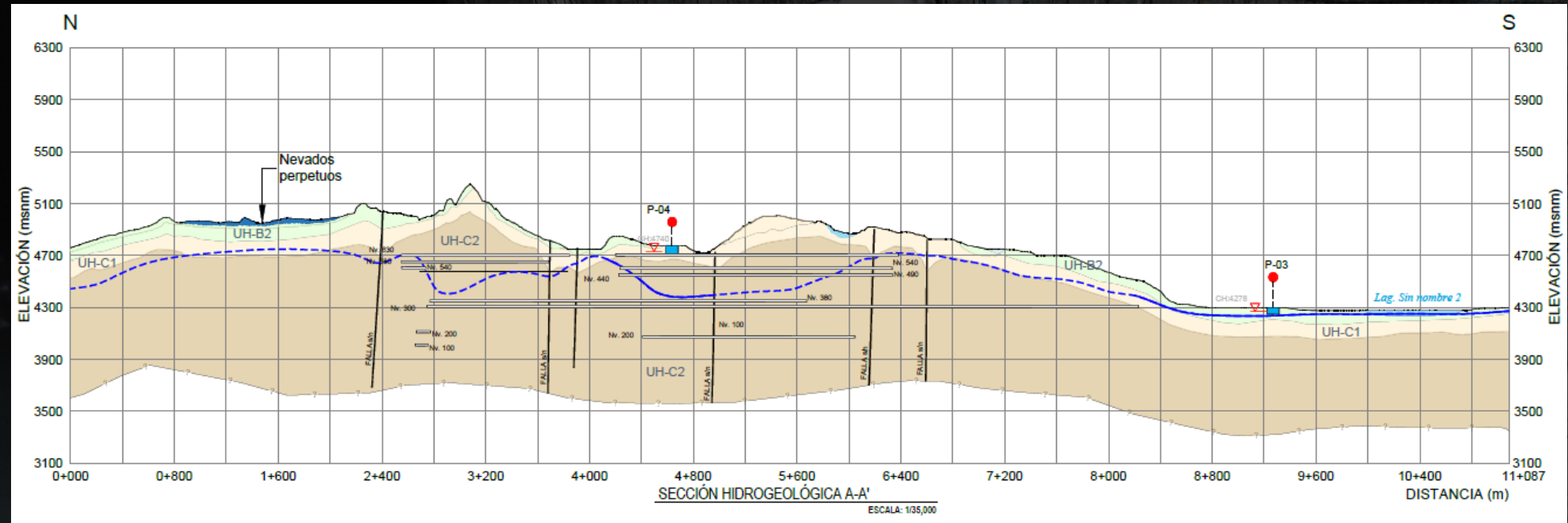


Modelo conceptual y numérico



Modelo conceptual y numérico

El modelo conceptual integró la información geológica, estructural e hidrogeológica, confirmando que el flujo en profundidad es controlado por estructuras tectónicas mayores.



Áreas de recarga superficial
Entrada de agua desde superficie

Flujo de agua subterránea

Cono de depresión localizado
Descenso del nivel freático

Fallas profundas
Vías preferentes de flujo

Galerías mineras
Intercepción de flujo subterráneo

Masa rocosa fracturada
Conectividad heterogénea

La Laguna Sin Nombre 1 está conectada al flujo subterráneo a través de morrenas y a las labores mineras por la **Falla 1**, una estructura conductiva.

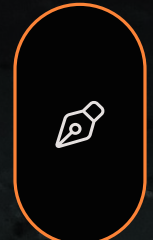
Modelación hidrogeológica (FEFLOW)

Se utilizó un modelo tridimensional (FEFLOW) calibrado con niveles piezométricos y caudales. Se implementó un medio poroso-fracturado, incorporando las fracturas de manera explícita como elementos discretos.



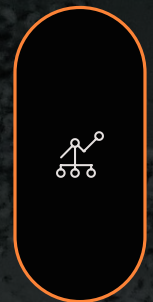
Dominio y Parámetros

Representación del dominio geológico, recarga natural y parámetros hidráulicos. Se asignaron condiciones de contorno tipo Cauchy (cuerpos de agua) y Dirichlet (labores mineras).



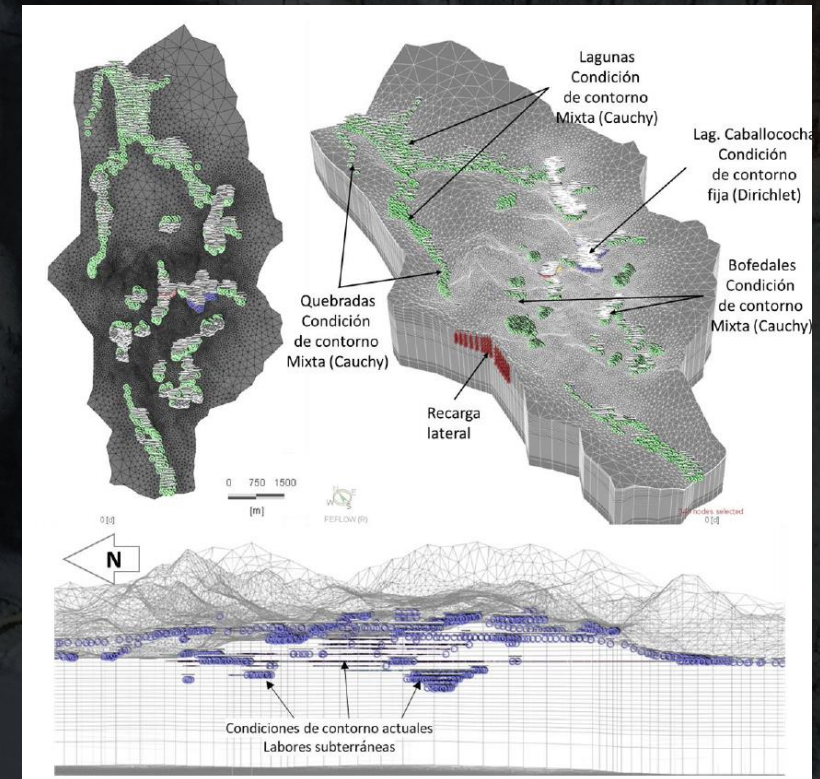
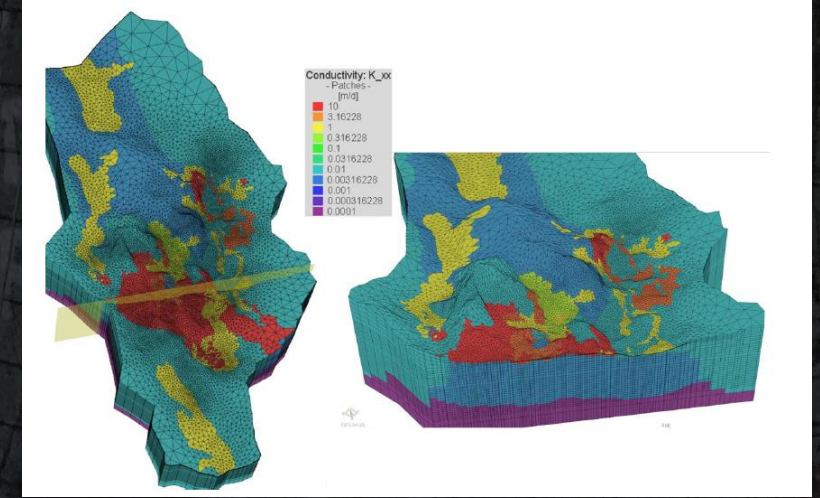
Fracturación Explícita

Los mayores aportes de flujo se dan a través de vías preferenciales. El modelo incorporó fallas y fracturas conductivas como elementos discretos bidimensionales.



Calibración

Calibración en régimen estacionario (71 piezómetros y 11 manantiales) y transitorio (flujos de drenaje en bocaminas). Se logró una correspondencia aceptable, validando el entendimiento conceptual.



Modelación hidrogeológica (FEFLOW)

Se utilizó un modelo tridimensional (FEFLOW) calibrado con niveles piezométricos y caudales. Se implementó un medio poroso-fracturado, incorporando las fracturas de manera explícita como elementos discretos.

Dominio y Parámetros



Representación del dominio geológico, recarga natural y parámetros hidráulicos. Se asignaron condiciones de contorno tipo Cauchy (cuerpos de agua) y Dirichlet (labores mineras).

Fracturación Explícita

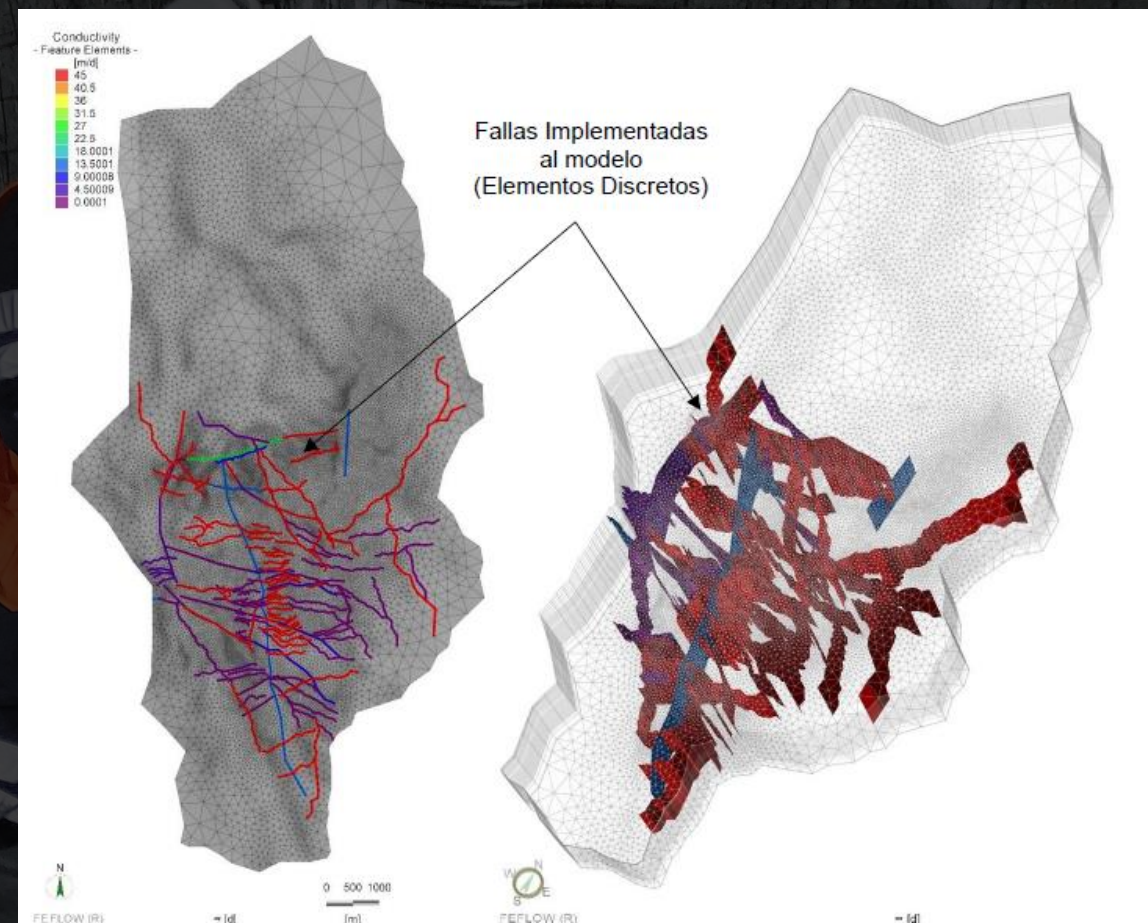


Los mayores aportes de flujo se dan a través de vías preferenciales. El modelo incorporó fallas y fracturas conductivas como elementos discretos bidimensionales.

Calibración



Calibración en régimen estacionario (71 piezómetros y 11 manantiales) y transitorio (flujos de drenaje en bocaminas). Se logró una correspondencia aceptable, validando el entendimiento conceptual.



Modelación hidrogeológica (FEFLOW)

Se utilizó un modelo tridimensional (FEFLOW) calibrado con niveles piezométricos y caudales. Se implementó un medio poroso-fracturado, incorporando las fracturas de manera explícita como elementos discretos.

Dominio y Parámetros

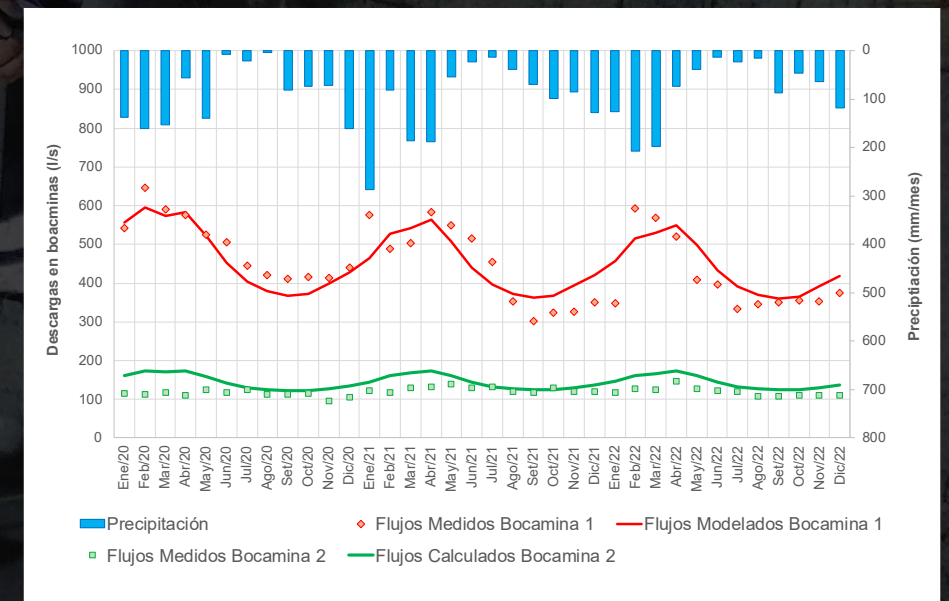
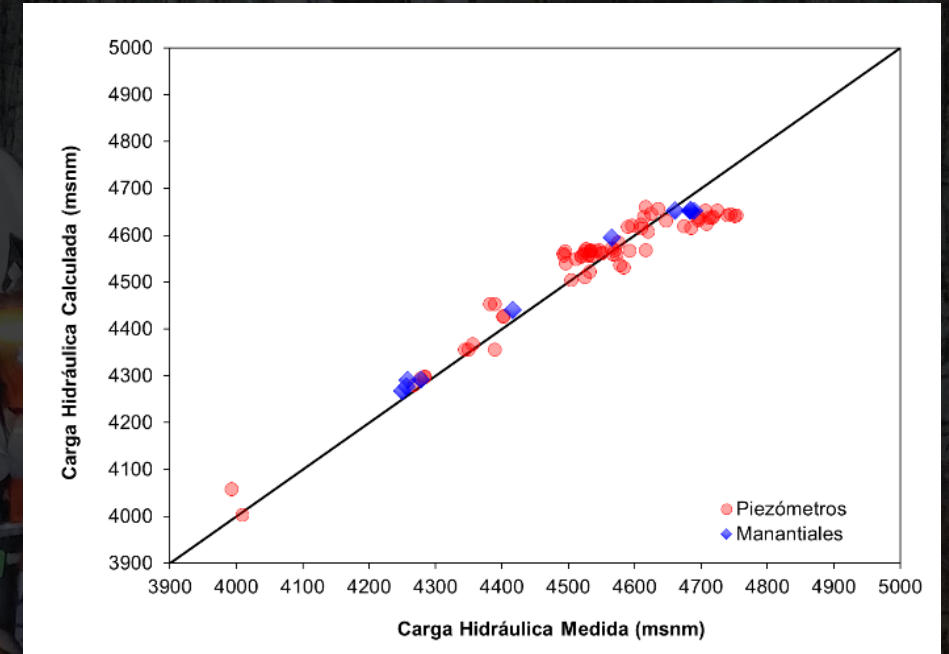
Representación del dominio geológico, recarga natural y parámetros hidráulicos. Se asignaron condiciones de contorno tipo Cauchy (cuerpos de agua) y Dirichlet (labores mineras).

Fracturación Explícita

Los mayores aportes de flujo se dan a través de vías preferenciales. El modelo incorporó fallas y fracturas conductivas como elementos discretos bidimensionales.

Calibración

Calibración en régimen estacionario (71 piezómetros y 11 manantiales) y transitorio (flujos de drenaje en bocaminas). Se logró una correspondencia aceptable, validando el entendimiento conceptual.

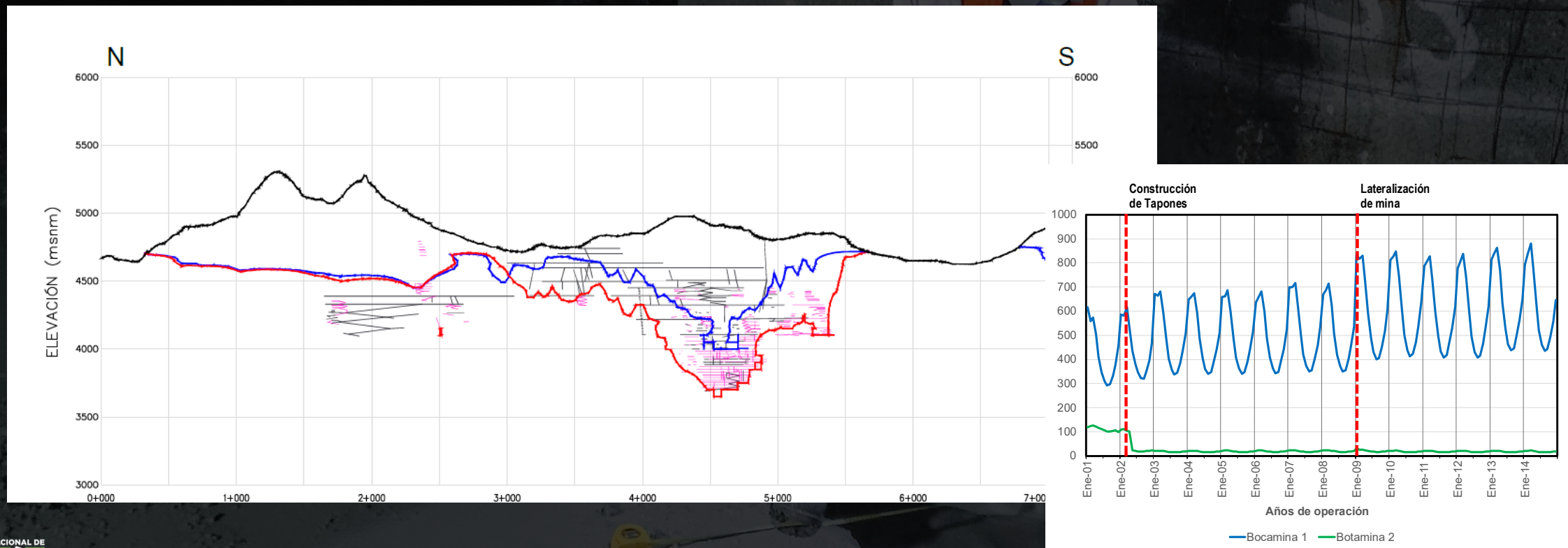


Resultados predictivos: operación y cierre

Se simularon escenarios de ampliación/profundización y cierre (instalación de tapones hidráulicos) para evaluar el comportamiento del flujo subterráneo.

Etapa Operativa (Ampliación)

Se observa una **depresión del nivel freático** alrededor de las labores. El modelo predijo una disminución del drenaje en la bocamina 2 (por tapones) y un incremento en la bocamina 1 (por ampliación).

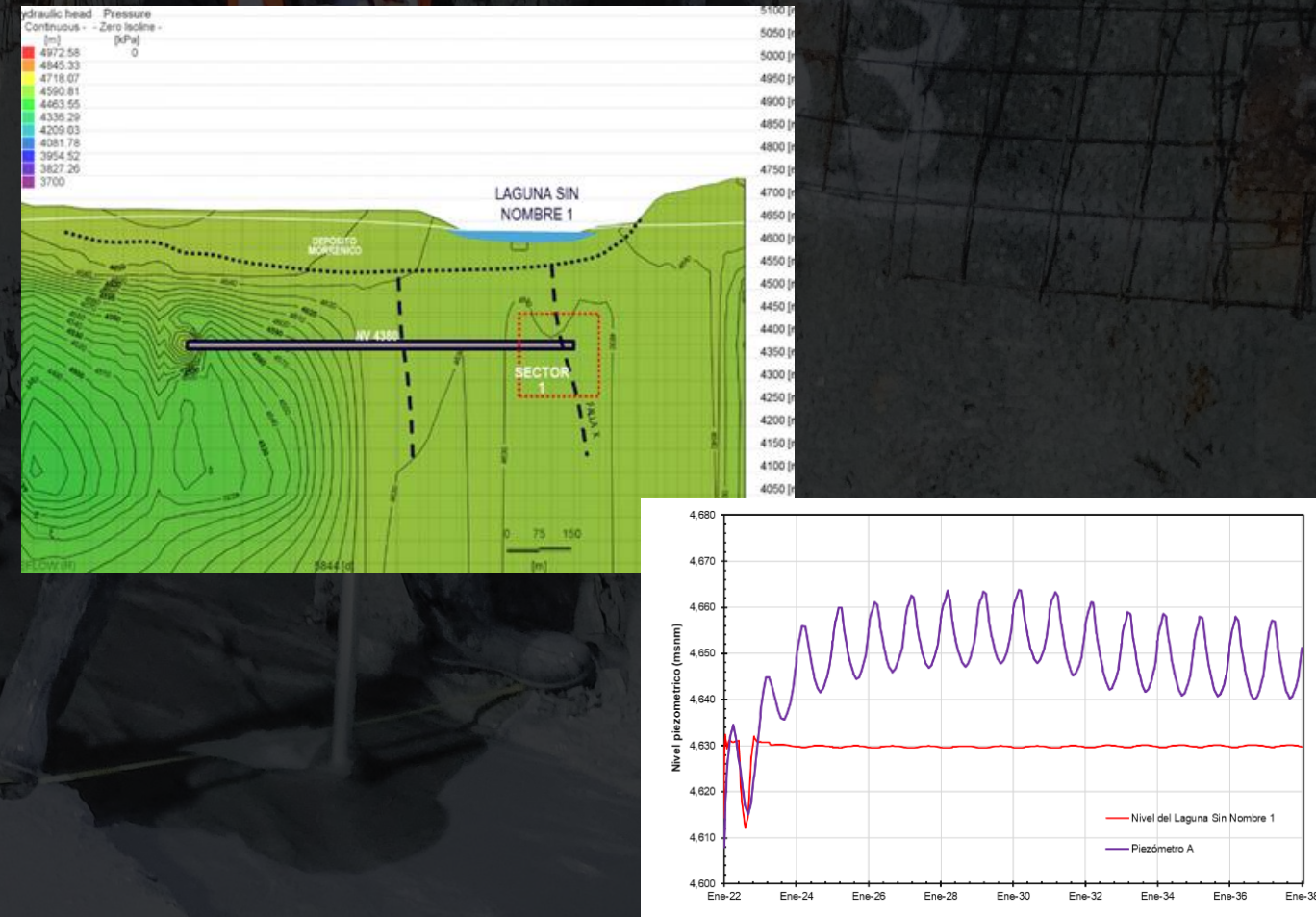
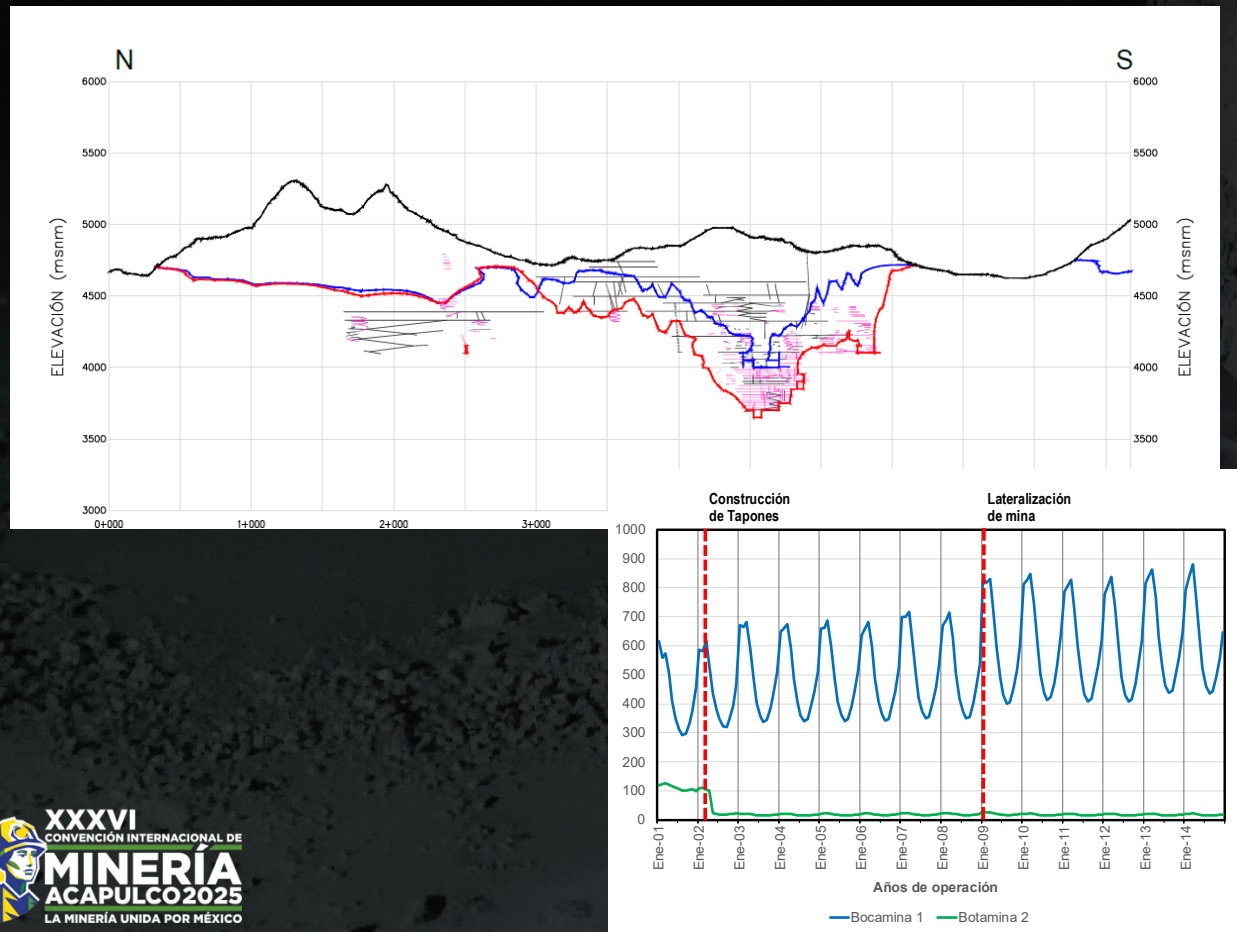


Resultados predictivos: operación y cierre

Se simularon escenarios de ampliación/profundización y cierre (instalación de tapones hidráulicos) para evaluar el comportamiento del flujo subterráneo.

Etapa de Cierre (Taponamiento)

Se simuló la recuperación gradual del nivel piezométrico. La construcción del tapón en el sector 1 genera una **recuperación sostenida** de los niveles en la Laguna Sin Nombre 1 y en los piezómetros cercanos.



Conclusiones

- La estimación de flujos permitió dimensionar de forma adecuada los sistemas de bombeo y las capacidades de tratamiento
- La laguna sin nombre podrá recuperarse de manera sostenida con las actividades de cierre propuestas en las estructuras que conectan dicho cuerpo con el régimen de flujo subterráneo
- Los resultados de las evaluaciones permitieron viabilizar los permisos ambientales y de construcción de las ampliaciones y cierre de sectores mineros

"Este enfoque aporta una guía práctica para abordar problemáticas hidrogeológicas en proyectos mineros con desarrollo subterráneo."



Preguntas/ comentarios:

Miguel Mendoza

miguel.mendoza@amphos21.com

Operations Manager, Amphos 21 Peru



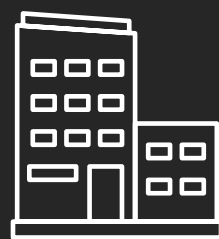
Amphos 21 es una empresa de ingeniería y consultoría técnica ambiental con una amplia gama de servicios enfocados en la sostenibilidad. Contamos con más de **30 años** de experiencia, brindando soluciones a la medida a diversos clientes de distintos sectores productivos como la minería, infraestructura civil, nuclear, oil & gas y energía.

Somos reconocidos por ofrecer soluciones eficientes y cuantitativas, especialmente orientadas en torno al ciclo del agua



500+

Profesionales y especialistas



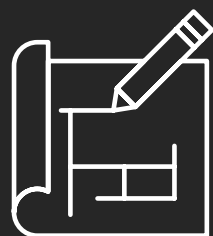
6

Oficinas cercanas a las operaciones de nuestros clientes en el mundo



250+

Clientes activos en 6 continentes



35+

Países donde desarrollamos proyectos



6

Continentes

¡Muchas gracias por su atención!