

MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL, CASO DE ESTUDIO PARA UNA MINA SUBTERRANEA EN EL SUR DE MEXICO ⁽¹⁴⁾

Exponente	Día	Hora	Sala
Arturo Pérez y Larry Cope	Jueves 25	10:00 – 10:30	Sala A

Arturo Pérez Morán¹ y Larry Cope²

¹Hidrogeólogo Consultor, SRK Consulting (U.S.) Inc., Denver, CO, USA (aperez@srk.com),

²Hidrogeólogo Consultor Principal, SRK Consulting (U.S.) Inc., Fort Collins, CO, USA
(lcope@srk.com).

Antecedentes del proyecto.

El estudio hidrogeológico se llevó a cabo en una mina de oro en el sur del estado de Oaxaca. La geología de la zona la constituyen unidades sedimentarias del Cretácico compuestas de areniscas, lutitas y calizas. El fallamiento y levantamiento han expuesto el basamento del Cretácico a elevaciones máximas de unos 1,200 msnm hasta un mínimo de 600 msnm.

El vulcanismo en la zona es relativamente joven para la región y tuvo lugar hace aproximadamente 15 a 17 millones de años. Los productos volcánicos locales incluyen domos andesíticos a riolíticos y flujos asociados, unidades de brecha y horizontes piroclásticos, con inclinación primaria. Las cúpulas cercanas a la mina están alojadas dentro de una caldera con paquetes ignimbríticos gruesos y unidades relacionadas. Además de las estructuras relacionadas con el colapso de la caldera, se ha identificado una estructura regional ESE-WNW (SRK, 2012).

Las vetas varían de 0.2 a 1.0 m en la superficie y aumentan significativamente con la profundidad. Las rocas encajonantes de las vetas son rocas volcánicas intrusivas y extrusivas formadas en un ambiente de caldera (SRK, 2012). Los rumbos de las vetas principales son en promedio de 300°, mientras que el sistema de fallas presenta una tendencia general N-NW. Los echados de las vetas son en promedio de 76° hacia el NE. Los sistemas de vetas y fallas son relativamente paralelos a la dirección de flujo preferente, por lo que estos cuerpos mineralizados y estructuras principales pueden comportarse como canales de conducción para el agua subterránea.

La explotación se realiza por medio de túneles y contra frentes. Durante las diferentes etapas de minado, se incrementaron significativamente los volúmenes

de extracción de agua, especialmente en los niveles más profundos. Los registros diarios reportaban un caudal de bombeo promedio de 600 galones por minuto (gpm) durante la apertura de los niveles 13, 14, 15 y 17. El caudal se mantuvo estable hasta que se iniciaron las obras para la apertura del nivel 18. A partir de este nivel la entrada de agua a la mina incrementó desde 800 gpm hasta 1400 gpm en promedio, alcanzando más de 1600 gpm.

El manejo del agua consiste en su contención mediante una serie de piletas ubicadas en los niveles 1, 13, 14, 15, 19 y 20, donde el agua es bombeada con equipos de hasta 140 HP canalizada en tuberías HDPE de 6" y 4" de diámetro. El agua es contenida en 2 piletas de sedimentación de 600 m³ ubicadas en el nivel 11, las cuales se usan alternadamente con el fin de asentar la mayor cantidad de sólidos en suspensión para luego tratar el agua con polímeros. Una vez tratada, el agua descarga hacia la presa y aproximadamente el 4% del total del volumen ingresa nuevamente a la mina para su reutilización en las perforaciones exploratorias.

Objetivo del Estudio

Realizar una evaluación de los factores físicos y químicos que controlan la entrada de agua en la mina, desarrollar un modelo conceptual del flujo de agua subterránea y proveer recomendaciones para mejorar en el sistema de manejo de agua

Actividades de campo realizadas

Se identificaron las fuentes de entrada de agua principales y se realizaron mediciones in situ de los caudales del agua en la mina (Tabla 1).

Se tomaron 8 muestras de agua subterránea dentro de la mina, en las zonas de aporte más representativas; incluyendo controles QA/QC. Se tomaron muestras de agua fluyendo directamente de las principales vetas y estructuras dentro de la mina (Tabla 2).

Elevación (msnm)	Nivel	Tipo	Fuente	GPM
588	17.5	Vertedor	Veta 1	435
588	17.5	Pileta	Veta 1	515
569	18	Corriente	Veta 3	346
554	18.5	Corriente	Veta B, Veta S	188
554	19	Canal	Veta 3, veta B	1,832
530	20	Corriente	Veta B 2, Veta S	1,409

Tabla 1. Mediciones puntuales de caudal

Elevación (msnm)	Nivel	Veta / estructura	pH	°C	CE (µS)
648	14	Rampa	6.9	35.1	2,230
611	16	Veta SL	7.7	31.8	6,910
588	17	Veta C	7.6	34.0	10,800
588	17.5	Veta 1	6.9	46.0	13,220
588	17.5	Dique granodiorítico	6.7	32.8	9,790
569	18	Veta 3	6.2	41.6	10,190
554	19	Veta S	6.4	36.6	15,510
554	19	Veta B	6.9	35.0	16,280

Tabla 2. Relación de muestras tomadas en las obras subterráneas

Modelo Conceptual

Se determinó que la dirección de las vetas donde se observaron entradas de agua es en promedio NW-SE. Esta dirección es paralela a la dirección de flujo del agua subterránea estimada dentro de la mina. Asimismo, esta tendencia de flujo es similar a la dirección de flujo regional determinada por CONAGUA en 2009, la cual establece que es, en términos generales, NW-SE para todo el acuífero. Estas condiciones dentro de la mina sugieren que las vetas y sistemas estructurales pueden actuar como conductores de agua subterránea.

Considerando la calidad del agua de los niveles superiores a los niveles inferiores (Tabla 2), es posible conceptualizar que existe una compartimentalización del sistema hidrogeológico en la mina, donde el control estructural principal lo ejerce el sistema de fallas con rumbo general N-NW, las cuales actúan como barreras impermeables y afectan tanto el caudal como la calidad del agua en la mina. Como es el caso de las muestras colectadas en los niveles 14 y 16, tomadas al Este de la falla central. En ambos casos, el flujo del agua fue menor a 1 gpm, pero con una gran diferencia en la calidad.

Los caudales más importantes medidos en la mina fueron aquellos provenientes de las vetas en los niveles 19 y 20. Se estimó un aporte total de 1,832 gpm en el nivel 19, de los cuales 187 gpm serían aportados por las vetas B y S. Para el nivel 20, se estimó un caudal de 1,409 gpm aportado principalmente por la veta S, con un aporte mínimo de Veta B. Como se ha mencionado, la orientación general de estas vetas es NW-SE, relativamente paralelas a la dirección de flujo del agua subterránea, lo que sugiere ser la razón para el aporte de altos caudales (Figuras 1 y 2).

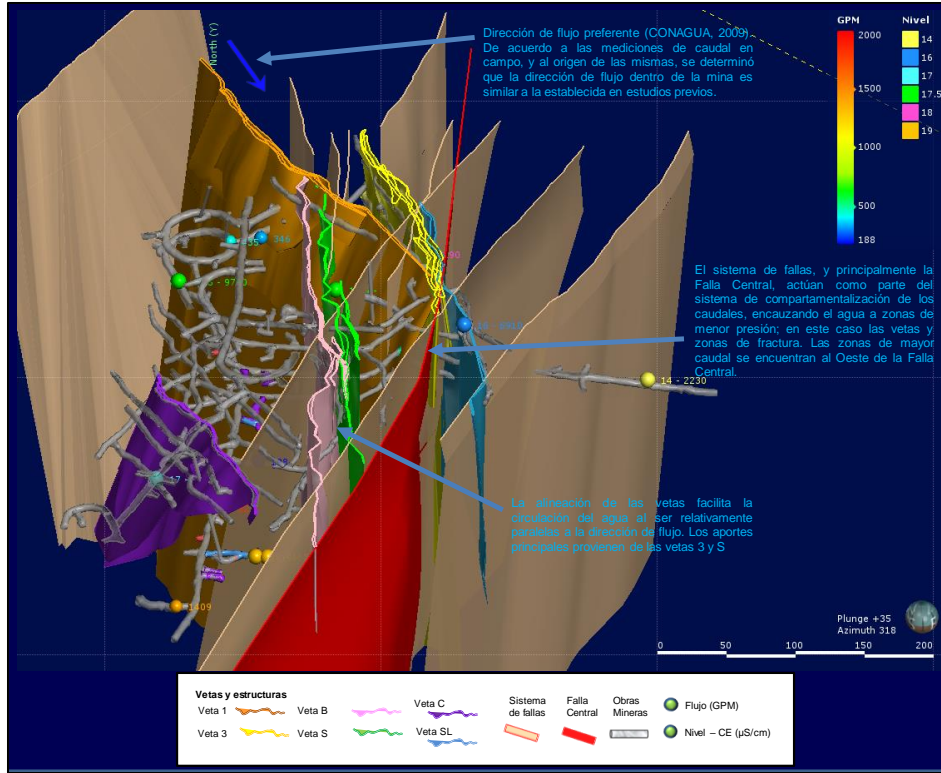


Figura 1. Modelo conceptual del sistema de flujo subterráneo.

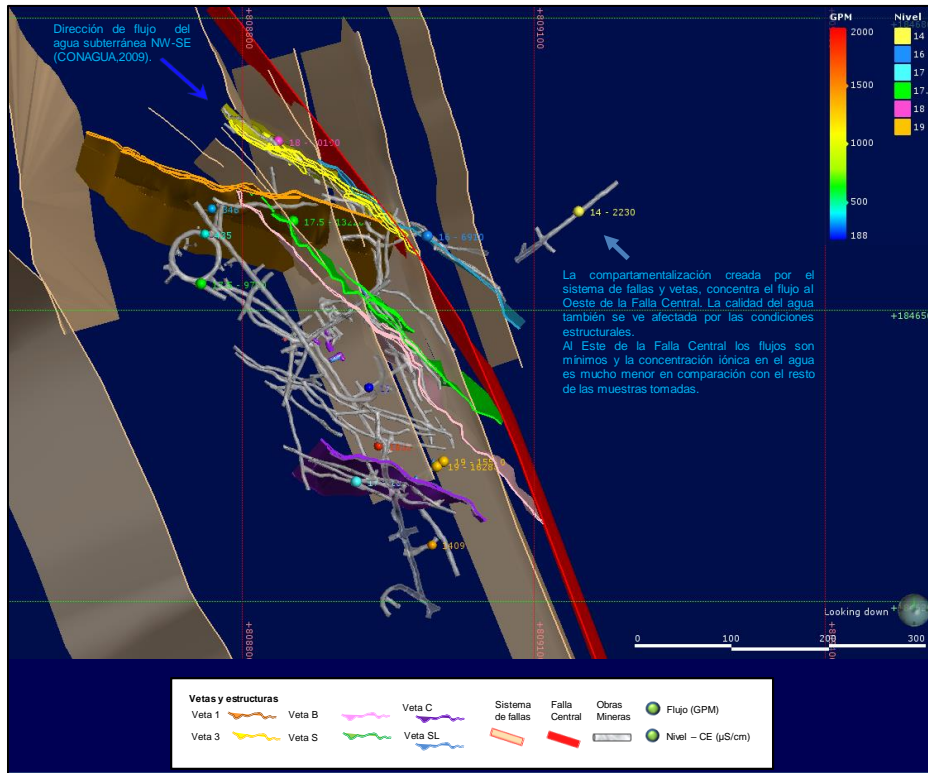


Figura 2. Modelo conceptual del sistema de flujo subterráneo, vista en planta.

Conclusiones

Es posible inferir que, como se ha ido observado durante el desarrollo de las obras, continúe la tendencia a que disminuyan los caudales en niveles superiores de la mina cuando se cortan estructuras con agua en los niveles inferiores. Lo cual sugiere una tendencia de drenado para esta parte “confinada” del acuífero conforme el agua fluya hacia las perforaciones exploratorias y la apertura de niveles que propician el flujo del agua hacia el interior de la mina.

Los resultados de laboratorio arrojan concentración de sólidos totales disueltos mayores a 6,800 mg/l en promedio, por lo tanto, es importante considerar este factor al momento de diseñar los sistemas de bombeo y conducción del agua hacia las piletas de asentamiento y el tratamiento posterior antes de descargar al medio ambiente.

En resumen, los datos de la química del agua indican lo siguiente:

- Las aguas son derivadas del sistema hidrotermal que da origen al yacimiento.
- La concentración de iones incrementa con la profundidad. La concentración se diluye conforme esta fluye hacia arriba y se mezcla con agua de la recarga (Figura 3).
- Debido a las altas concentraciones de sodio y cloro en el agua, se espera que el agua que fluye en la mina sea muy corrosiva.
- Las aguas están saturadas respecto a la calcita y el yeso, como lo indica la Figura 4, donde las muestras se encuentran sobre las líneas de saturación.
- La muestra tomada en el nivel 14 es de una fuente diferente a las demás, limitada por la compartimentalización creada por el sistema estructural (Figura 2).

Considerando que la zona del proyecto se encuentra dentro de un acuífero libre, es posible esperar que el sistema de flujo reciba una recarga de agua de manera constante y que los aportes de agua hacia a la mina serán proporcionales a la recarga.

No es probable que se produzca un equilibrio entre los fluidos hidrotermales y el agua de recarga durante el desarrollo de las operaciones mineras, ya que la mina continúa avanzando hacia aguas hidrotermales más profundas. Sin embargo, una vez que concluyan los trabajos y los niveles del agua se recuperen, se llevarán a cabo reacciones de equilibrio que producirán una mezcla de agua relativamente constante en las obras inundadas.

Con base a los datos históricos y la correlación entre las tasas de flujo y las profundidades de las obras mineras, se anticipa que el flujo de entrada incrementará conforme aumente en profundidad la mina. Conforme a la tendencia que ya se ha observado, se estima que el flujo de entrada incremente a una tasa máxima de alrededor de 2,000 GPM.

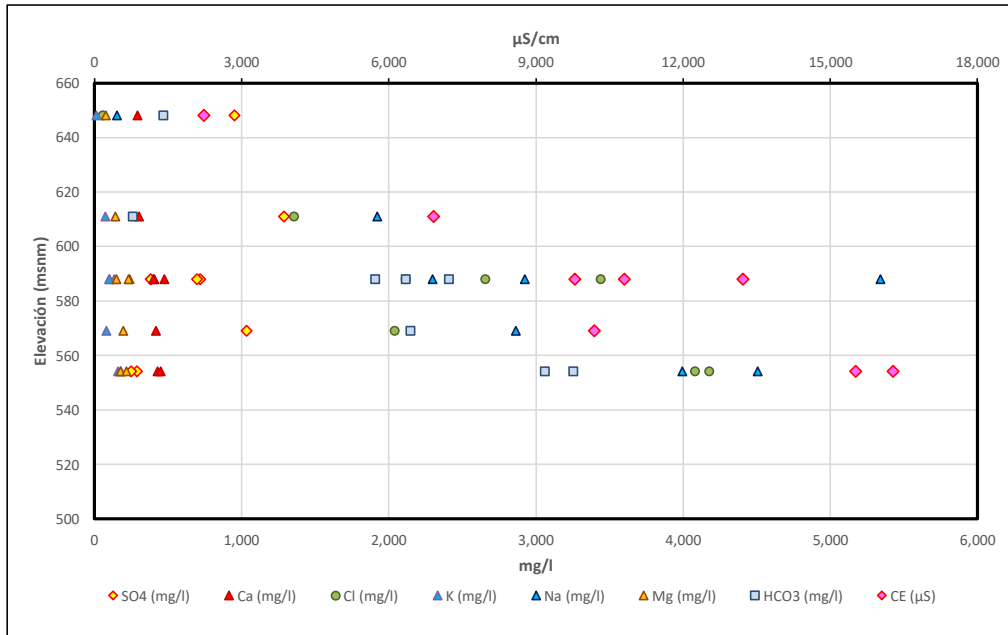


Figura 3. Iones mayores en función de la elevación

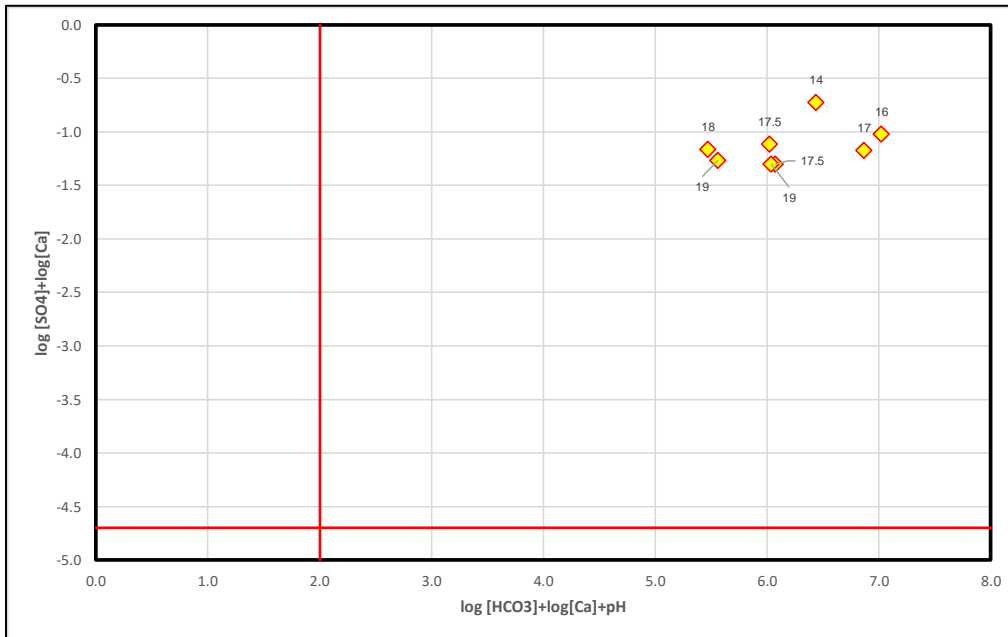


Figura 4. Productos de actividad iónica de las muestras por nivel con relación a los equilibrios de solubilidad de calcita y yeso

Recomendaciones

Las recomendaciones para reducir costos y esfuerzo, que resultan de la sobrecarga en los cárcamos y el consecuente daño a los equipos de bombeo, son las siguientes:

- Incrementar el tiempo de deposición para las partículas finas en el agua incrementando el volumen de los sumideros y manteniendo las barras de decantación entre las secciones del sumidero.
- Aumentar la capacidad de los cárcamos para permitir asentamiento adicional, de modo que las bombas estén inactivas menos tiempo por reparación, lo que resulta en menos re-bombeo de desde niveles superiores que drenan hacia abajo de la rampa.
- Mantener significativamente los niveles operacionales de los sumideros por debajo del nivel de derrame para generar almacenamiento adicional en caso de flujos entrada que pongan en riesgo la capacidad de bombeo y establecer cárcamos de respaldo para eventos de gran magnitud.
- Proveer capacidad de bombeo redundante en los cárcamos clave, y alternar cíclicamente para mantener disponible la capacidad de bombeo adicional
- Incrementar el diámetro de tubería HDPE en ubicaciones clave con alto flujo para incrementar la tasa de bombeo al disminuir las pérdidas por fricción.

Para interceptar y extraer el agua subterránea, se recomienda lo siguiente:

- Instalación de pozos de monitoreo para medir el abatimiento o recarga del agua en la mina. Se pueden utilizar los barrenos exploratorios ya perforados siempre que puedan ser equipados con tubería de PVC cédula 80.
- Es recomendable hacer mediciones de caudal puntuales conforme se realicen las perforaciones exploratorias, mediante pruebas hidráulicas a profundidades específicas para estimar parámetros hidráulicos. Los datos obtenidos mediante estas pruebas ayudarían a determinar los caudales reales esperados, sobre todo respecto a los niveles más profundos a los que se espera llegar y de este modo realizar un diseño más adecuado para los sistemas de bombeo.
- Se deben considerar alternativas al sistema de desagüe actual, como la perforación y equipamiento de uno o dos pozos de desagüe aguas arriba de la mina para interceptar las líneas de flujo antes de las obras mineras, esto ayudaría a crear un cono de abatimiento previo a la mina y ayudaría a disminuir los volúmenes de entrada de agua, así como los consumos de energía para el desagüe.

- Realizar pruebas hidráulicas durante el programa de barrenación exploratoria y llevar una bitácora de obra en donde se registren puntualmente las profundidades a las que se observan entradas de agua en los barrenos que se perforen orientados a las vetas con rumbo NW-SE o azimut del orden de 300°, además de realizar una estimación del caudal directamente del barreno o a lo largo de un canal por donde fluya el agua de ingreso, así como tomar nota de la temperatura, conductividad eléctrica y pH del agua.

<http://congresominerosonora.com/es/inicio/>