

# Hidrodinámica de filtraciones en minas ubicadas en el SE del Perú

Jacinto Valencia<sup>(1)</sup> [jvalencia@ipen.gob.pe](mailto:jvalencia@ipen.gob.pe); Rubén Rojas<sup>(1)</sup> [rojas@ipen.gob.pe](mailto:rojas@ipen.gob.pe);  
Enoc Mamani<sup>(1)</sup> [emamani@ipen.gob.pe](mailto:emamani@ipen.gob.pe)

(1) IPEN, Dirección General de Seguridad Radiológica, Dirección de Aplicaciones, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

## Resumen

Para el estudio de filtraciones en una mina subterránea se ha utilizado la técnica de isótopos ambientales O-18, Deuterio y Tritio, así como, en la interpretación de la química del agua para la determinación de su hidrodinámica y origen, a partir de muestras de agua de lagunas, ríos, agua de deshielos que puedan estar contribuyendo en las filtraciones en galería de mina. El agua de filtraciones indica un fenómeno de mezcla por efecto de su desplazamiento en medio fisurado.

## 1. Introducción

El presente estudio aborda la hidrodinámica de filtraciones en medios figurados de minas mediante la aplicación de técnicas isotópicas para el análisis de aguas subterráneas de una mina ubicada en el Sur-Este del país, con la cual se ha establecido tanto su dinámica como el origen de sus filtraciones en los niveles 4200 y 3800 de la mina.

## 2. Fundamentos de las técnicas utilizadas

Los átomos de Oxígeno e Hidrógeno que conforman la molécula de agua que existen en la naturaleza, contienen trazas de isótopos de estos elementos, siendo los más abundantes los isótopos no radioactivos o también denominados estables: Oxígeno-18 y el Hidrógeno-2 (denominado también Deuterio), y el isótopo radioactivo Hidrógeno-3 (denominado también Tritio).

El Tritio se forma en la alta atmósfera como producto de las reacciones nucleares entre los rayos cósmicos y los átomos de Nitrógeno contenidos en el aire, las mismas que en contacto con las nubes genera un intercambio isotópico con las moléculas del agua y llegan a la superficie de la Tierra formando parte de las aguas de lluvia. Teniendo en cuenta que el Tritio es un isótopo radioactivo (que tiene una vida media de 12.3 años), las concentraciones de este isótopo decaerán con el tiempo, característica que permite estimar la edad o el tiempo de residencia de las aguas subterráneas.

Además del origen natural del Tritio arriba descrito, hubo otro origen artificial y puntual muy importante que a pesar del tiempo transcurrido, aún se notan sus efectos:

durante los años 60 principalmente, los Estados Unidos y la ex Unión Soviética, desarrollaron numerosas pruebas nucleares en la atmósfera, lo cual trajo como consecuencia un incremento muy grande de las concentraciones de Tritio en las aguas de lluvias en todo el mundo, especialmente en el hemisferio norte de la Tierra, razón por la cual, actualmente aún es posible encontrar aguas subterráneas con concentraciones de Tritio mayores a las que tienen las lluvias, que revelan un origen posterior a la década de los años 60 .

### Marco Hidrogeológico de la zona de estudio

Las características geológicas y estructurales de la zona de estudios indican un ambiente de rocas sedimentarias metamorfizada, con presencia de un cuerpo intrusivo las que han sido afectadas por varios sistemas de fallas y fracturas orientadas en la dirección NO-SE, las que estarían más directamente relacionadas con las filtraciones en referencia.

### Movimiento de aguas subterráneas en medios fisurados

Tanto los principios básicos que rigen el movimiento de las aguas subterráneas, como los parámetros hidráulicos que caracterizan a estos flujos (transmisividad, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento), y el comportamiento hidroquímico, se han referido prioritariamente a los medios con porosidad intergranular, dejando prácticamente en el olvido la caracterización y evaluación de los medios con porosidad por fisuras.

En la inspección previa efectuada, se apreció que las filtraciones del nivel 4200 en referencia se encuentran selladas con

bloques de concreto y acero donde se encuentran conectadas a tuberías de drenaje con válvulas para el control de la salida del agua. Sin embargo, aun persisten las filtraciones en los alrededores de los puntos de sellado a la roca de la galería, las que afloran a alta presión y temperatura con un caudal total estimado del orden de 30 l/s.

Al interior de las galerías se pudo apreciar la existencia de otros puntos de filtraciones de aguas termales y frías localizados en diversos niveles donde se efectuaron mediciones de los parámetros físico-químicos de campo y se obtuvieron muestras para los fines del estudio.

### **3. Metodología**

Durante la explotación minera en una mina ubicada en la zona alta del Sur-Este se han presentado filtraciones de agua en su interior en los niveles 4200 y 3800 m.s.n.m., las mismas que han sido identificadas y muestreadas a fin de realizar el estudio de su hidrodinámica y para poder establecer su procedencia.

La toma de muestras se efectuó tanto en las filtraciones como en superficie, a fin de ser analizadas y relacionadas con las aguas de las filtraciones en interior mina; para cuyo efecto se han aplicado técnicas isotópicas y convencionales que permitan obtener la información del posible origen de las filtraciones.

### **4. Resultados de los Análisis**

#### **Análisis Químico**

Los análisis se llevaron a cabo en los laboratorios del INGEMMET y del IPEN.

#### **Análisis Isotópicos**

Los análisis isotópicos por Deuterio y Oxígeno-18 se realizaron en los laboratorios de la Comisión Chilena de Energía Nuclear - Chile; en tanto que, los análisis por Tritio, fueron efectuados en el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica de Argentina.

### **5. Discusión de los Resultados**

#### **Hidrogeoquímica**

La hidrogeología en medios fracturados como el de la mina estudiada nos indica un

movimiento de aguas subterráneas en rocas cuya porosidad efectiva se debe sólo a fracturas y fallas. Las rocas por lo general no pueden formar acuíferos en el sentido estricto de la palabra, sus estructuras cumplen un doble rol: el de concentrar agua de infiltración proveniente de las lluvias y transportarla según la gradiente hidráulica.

El desarrollo de las labores de explotación que han cortado las estructuras, originan las filtraciones al interior de la mina, alteran la hidrodinámica e inducen el descenso del nivel freático (cono de depresión), también existen filtraciones de agua en un flujo importante que surgen a partir de perforaciones horizontales, que fueron selladas por la minera a fin de evitar el incremento del caudal de aguas de filtración en el frente de galerías en los Niveles 4200 y 3950-Sur. La dinámica del flujo de aguas en el sistema fisurado esta controlado por el diseño de la tectónica local y la gradiente hidráulica confinando el movimiento a las estructuras favorables a este, encontrándose a una profundidad y confinamiento de mas o menos 400 metros de la superficie, confiriéndole una alta presión de infiltración y coincidiendo espacialmente con los casquetes de nieve de los glaciares adyacentes, cuyos deshielos aportan agua a las lagunas de la zona.

Los parámetros físicos de campo registrados durante la toma de muestras han permitido evidenciar que todas las filtraciones de aguas en interior mina, en los frentes de galerías muestreadas, los Niveles 4200; 3950 y 3800, presentan diversos grados de termalismo.

#### **Termalismo en las aguas de filtraciones**

Los diferentes grados de temperatura observados en las filtraciones son originados por los mecanismos que actúan en profundidad sobre los cuerpos de agua y por los valores del grado geotérmico local. Así, la temperatura del agua de las filtraciones es más alta que el promedio anual de la temperatura local, lo que indica que el agua de filtraciones son de circulación mas o menos profunda y largo tiempo de residencia en un contexto de fuerte tectónica donde el calor es aportado por el intrusivo en profundidad, y tomando en consideración la clasificación de aguas termales según Schoeller, están clasificadas por su temperatura como aguas medianamente termales. Los elementos Na-K-Mg, utilizados para caracterizar aguas termales, indican aguas meteóricas recalentadas y de

composición diferente de las aguas geotérmicas o volcánicas.

Como característica hidrogeológica de las aguas subterráneas de las filtraciones en la mina, son en general del tipo sulfatada-cálcico-sódicas, y como resultado del enriquecimiento a partir de aguas de lluvias que se infiltran; mientras que las aguas superficiales de escorrentía (ríos) presentan valores ligeramente más altos en calcio que las de filtraciones, debido a su relación con el substrato por el que discurren las aguas de ríos.

En cuanto al origen del termalismo de las muestras de agua en las filtraciones del nivel 3800 especialmente las muestras (G-4 y G-5), el diagrama Sílice/temperatura (Fig. 1) nos indica un ligero incremento en el contenido de sílice con la temperatura, a partir de aguas meteóricas que se infiltran y, que al calentarse en profundidad por el gradiente geotérmico del agua confinada en las estructuras del propio intrusivo, se relacionan genéticamente con la mineralización estannífera.

Diagrama Sílice-Temperatura Filtraciones Mina San Rafael

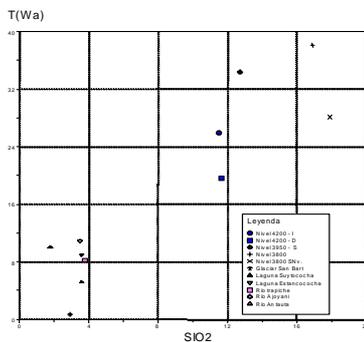


Figura 1. Diagrama Sílice/ Temperatura.

## 6. Interpretación

Las aguas de filtraciones en el interior de la mina son aguas subterráneas asociadas a sistemas fisurados. Su clasificación química corresponde al tipo sulfatadas-cálcico-sódicas, lo cual revela fenómenos de mezcla, tanto binaria como ternaria, de acuerdo al comportamiento de los cationes que evolucionan a partir de aguas de lluvias que se han infiltrado y se mueven a través de fallas y fracturas con largo tiempo de

residencia. La interacción agua-roca, favorecida por la termalidad y el pH, incrementan su carga química.

Los resultados de análisis de concentraciones de los isótopos Oxígeno 18 y Deuterio de las muestras de aguas superficiales y subterráneas de la mina, se encuentran ploteados en la Fig. 2

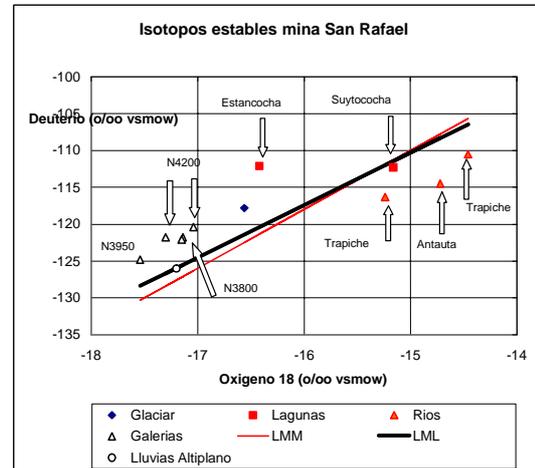


Figura 2. Diagrama Oxígeno18-Deuterio.

La termalidad (hasta 36°C), registrada en las filtraciones, es originada por el descenso de las aguas a profundidad a través de estructuras del stock de Monzo-granito que al ser recalentadas por este, incrementa su presión y vuelven a la superficie. Su composición química guarda relación con aguas de baja a mediana termalidad, y no se parecen a las aguas de filiación geotérmica o volcánica.

## Tritio

Los valores de Tritio de las aguas de los niveles 4200 y 3950 de las galerías ( $0.2 \pm 0.5$  UT y  $0.5 \pm 0.5$  UT respectivamente) son bastante bajos comparadas con los valores de Tritio de lluvias actuales que se puede estimar sea del orden de  $2.3 \pm 0.6$  UT (en base datos de lluvias de años 1995 a 1996 de mas de 20 estaciones de la sierra central del Perú). Se evidencia que estas aguas de filtraciones tienen tiempos de residencia muy largos que se pueden estimar en el orden de cientos de años, descartando se trate de aguas fósiles (que se podría verificar por análisis de Carbono 14) y se estima que la cuenca de recarga de estas filtraciones sea bastante extensa.

Los valores de Tritio del nivel 3800 ( $2.0 \pm 0.6$  UT) revela que estas aguas tienen tiempos de

residencia más cortos y están más próximos a los valores de Tritio de aguas de lluvias recientes. Consecuentemente son aguas de carácter permanente mientras el régimen de lluvias de la zona no cambie.

Las aguas del río cercano a la mina que tiene un valor de Tritio de  $1.7 \pm 0.6$  UT un poco menor a las aguas de lluvias actuales, lo cual nos indica un tiempo de residencia aun mayor que las aguas del nivel 3800. Esto se puede explicar porque en esta época del año, caracterizado por la ausencia de lluvias, las aguas de los ríos provienen del drenaje de aguas subterráneas y constituyen el flujo base de los ríos de la sierra.

Las aguas del glaciar y de la laguna cercana tienen concentraciones de Tritio de  $5.2 \pm 0.6$  UT y  $3.7 \pm 0.6$  UT, lo cual nos indica, tiempos de residencia menores y revela que provienen lluvias posteriores a la de los años 60 (década pico de altas concentraciones de Tritio como consecuencia de las numerosas pruebas nucleares atmosféricas llevadas a cabo durante aquel período). La mayor concentración de Tritio en la laguna comparado con el del glaciar se explica por la propiedad de los isótopos denominado fraccionamiento isotópico mediante el cual, las aguas sometidas a evaporación, concentran los isótopos mas pesados como el Tritio en la fase líquida.

## 7. Conclusiones

Las evidencias isotópicas y químicas revelan que aguas de las filtraciones de los niveles 4200 y 3800 provienen de la infiltración de lluvias producidas en las cuencas altas de los ríos aledaños a la mina. Estas aguas son transportadas a través del sistema de fallas existentes en la zona.

Las altas temperaturas de las aguas de filtraciones indican que la trayectoria del flujo de estas aguas llega a niveles suficientemente profundos donde se encuentran las rocas sometidas a altas temperatura, debido al geotermalismo relativamente superficial que caracteriza esta zona del Altiplano.

Las aguas del nivel 3950 también provienen de la infiltración de lluvias, pero tienen un menor tiempo de residencia comparado con las de los niveles 4200 y 3800.

## Referencia

- 1) IAEA; Isotope Techniques in the Study of Fractured and Fissured Rocks. Vienna (1989).