

# Estudio de la hidrodinámica de aguas subterráneas en una mina de cobre y oro

Jacinto Valencia\*, Enoc Mamani, Jorge Condori

Dirección de Aplicaciones, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

## Resumen

El presente estudio tiene por objetivo determinar la hidrodinámica de las aguas subterráneas de una mina de oro y cobre ubicada en Cajamarca (Perú), mediante la aplicación de técnicas isotópicas. Se ha efectuado toma de muestras de agua tanto de manantiales de la vertiente izquierda del río aledaño a la mina, así como de piezómetros y de agua superficial del río aguas abajo. Las muestras se analizaron por isótopos ambientales en un espectrómetro de masas, incluidos análisis de tritio; de aniones, cationes y metales pesados por técnicas convencionales. La influencia del área de estudio está comprendida en una distancia de 3 km, comprende el área de recarga y descarga a la cuenca del río a través de diversos manantiales.

## Abstract

This study aims to determine the hydrodynamics of groundwater from a gold and copper mine located in Cajamarca (Perú), through the application of isotopic techniques. There has been sampling water from springs from the left side of the river adjacent to the mine, as well as piezometers and surface water of the river downstream. The samples were analyzed by environmental isotopes in a mass spectrometer, including analysis of tritium; anions, cations and heavy metals by conventional techniques. The influence of the study area falls within a distance of 3 km. regarding the recharge area and discharge to the river basin through various ground water sources.

## 1. Introducción

El estudio de aguas subterráneas se está incrementando cada vez más por la necesidad, tanto como fuente de suministro para consumo, así como para el abastecimiento para distintos procesos, siendo necesario su gestión adecuada sobre todo cuando sirve de abastecimiento para uso poblacional, donde se ve afectada sobre todo su calidad.

El estudio se ha efectuado en una mina polimetálica, tipo pórfido que está en construcción y va a beneficiar minerales de Cu y Au, en el Departamento de Cajamarca, a una altitud aprox. de 3800 m.s.n.m., en la que se ha encomendado al IPEN efectuar un estudio con aplicación de las técnicas isotópicas para conocer la hidrodinámica de las aguas subterráneas en la mina y su área de influencia, en relación con afloramientos de éstas en la vertiente izquierda del río aledaño a la mina.

Para abordar el estudio en referencia se ha efectuado un inventario y luego un muestreo de agua de manantiales, piezómetros ubicados en la mina y muestras de aguas del río colindante. El indicado estudio ha

permitido establecer la influencia relación entre aguas de lluvia y aguas subterráneas, tanto en las inmediaciones de la mina como con las aguas de manantiales que afloran en la vertiente izquierda del río principal de la cuenca, existiendo una distancia de 1500 m de la mina al punto de afloramiento. El estudio incluye igualmente, la hidroquímica, a fin de caracterizar el tipo y composición del agua subterránea.

Previo al estudio se efectuó un reconocimiento de la zona, en la que se determinaron el número de puntos de muestreo tanto de los pozos de observación (piezómetros) construidos en la mina, como de los diferentes afloramientos de agua en manantiales. Esto permitió elaborar el modelo conceptual del posible sistema de agua subterránea en la zona bajo estudio.

### Objetivo

Estudio de las aguas subterráneas de la zona de la mina, con aplicación de técnicas isotópicas, Oxígeno-18, Deuterio y Tritio, orientado a determinar su hidrodinámica.

\* Correspondencia autor: jvalencia@ipen.gob.pe

## 2. Principios teóricos

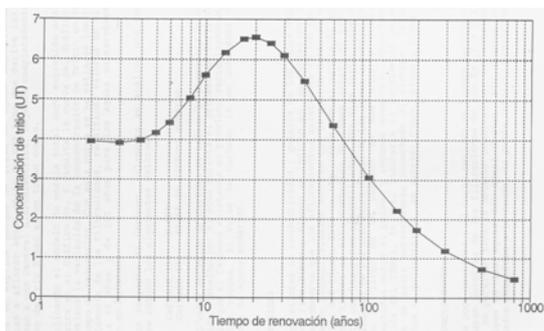
### *Trazadores Ambientales*

Los átomos de Oxígeno e Hidrógeno que conforman la molécula de agua, contienen isótopos de estos elementos, los que están presentes en forma natural en la molécula

de agua, siendo los más abundantes los isótopos no radioactivos o también denominados isótopos estables: Oxígeno-18 y el Hidrógeno-2 (denominado también Deuterio), y el isótopo radioactivo Hidrógeno-3 (denominado también Tritio).

El isótopo 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 generan un intercambio isotópico con las moléculas del agua y llegan a la superficie de la tierra formando parte del agua de lluvia. Teniendo en cuenta que el Tritio, es un isótopo radioactivo (vida media de 12.3 años), las concentraciones de este isótopo decaen con el tiempo, característica que permite estimar la edad o el tiempo de residencia de las aguas subterráneas en el subsuelo. El tiempo de residencia, es el tiempo que las aguas subterráneas permanecen aisladas de la atmósfera desde el momento que se infiltran a subsuelo, hasta que salen a superficie. Los valores de concentraciones de Tritio en lluvias recientes en el Perú, se pueden estimar basándose en los últimos valores disponibles que corresponden a los años 1996-1998, indicándose valores del orden de 2-3 UT.

En el diagrama de la Figura 1, se muestra la representación gráfica de un modelo matemático exponencial de mezcla total que relaciona el decaimiento de las concentraciones de Tritio con los tiempos de residencia o renovación de aguas subte-



**Figura 1:** Concentraciones de Tritio y tiempo de renovación de aguas subterráneas.

rráneas, sobre la base de concentraciones de Tritio de aguas de lluvia de la estación del OIEA de Riobamba (Ecuador), la más cercana referencia que tenemos para el Perú, complementado con análisis puntuales efectuados en el Perú durante los últimos ocho años.

## 3. Marco hidrogeológico de la zona de estudio

La mina está emplazada tanto en roca intrusiva como en rocas sedimentarias de edad cretácica. La mina se ubica entre dos cuencas; una al sureste y la otra al noroeste, siendo este último el de mayor relación con la zona de operación de la mina, por corresponder al área de recarga de la cuenca, y la presencia de manantiales de descarga, los que han sido objeto de muestreo para su estudio isotópico e hidroquímico; las aguas de estos manantiales drenan al río aldeaño, cuenca que pertenece a la vertiente del Atlántico.

Como consecuencia de procesos orogénicos e intrusivos, se han producido fallas y fracturamientos; los más importantes con rumbo N-S y otros subsidiarios que han originado fracturas de tensión y cizalla; habiéndose reconocido por parte de estudios anteriores hechos por la mina, hasta tres períodos de fracturamiento-plegamiento. Si bien las rocas del entorno son pobres en su porosidad y permeabilidad primaria, las estructuras (fracturas y fallas) conforman medios de movimiento de los fluidos, incluidas las estructuras de disolución (karst), las que deben controlar hidráulicamente la hidrodinámica de las aguas subterráneas y los afloramientos de agua en los manantiales.

Basándose en la información hidrogeológica disponible de estudios anteriores de la mina, el modelo conceptual plantea la hipótesis conservadora de que la roca intrusiva de la mina y las rocas de caja como calizas circundantes, tienen relación hidráulica, y está controlada posiblemente por las fallas principales, que afectan tanto a la intrusión como a las rocas de caja.

Se debe indicar que la toma de muestras en el presente estudio corresponde a una condición puntual estacional del año hidrológico con relación a la respuesta de los isótopos ambientales (mediados 2007). Los resultados que se muestran corresponden a esa condición, y muestran un carácter bastante uniforme. Debe igualmente señalarse que los

estudios anteriores indican que estos flujos de manantiales muestran una alta variación, directamente relacionada con los cambios estacionales de la precipitación, pudiéndose interpretar la existencia de manantiales con una menor variación estacional del caudal al estar siendo alimentados por la contribución de aguas subterráneas de circulación más profunda, como del basamento rocoso.

En este contexto hidrogeológico, el movimiento de las aguas subterráneas en cuanto a su origen puede ser determinado por su contenido isotópico, mientras que por los elementos químicos contenidos en ella, determinar el tipo de agua, en este último caso, proporcionan información con respecto al tiempo de residencia, interacción con el medio y mezcla entre masas de agua en el subsuelo.

#### **4. Metodología**

La metodología empleada ha consistido en la aplicación de la técnica de los isótopos ambientales y dentro de ellos los isótopos estables O-18, Deuterio y el isótopo radiactivo Tritio, como técnica de trazadores naturales, integrantes de la molécula de agua, complementada con la técnica de la hidrogeoquímica para la caracterización del tipo de agua y su relación de las filtraciones con las rocas en el interior de la mina.

La metodología del estudio ha consistido en:

- Recopilación de información geológica e hidrogeológica de la zona del estudio.
- Reconocimiento de la zona de estudio y definición del número de muestras de los puntos de afloramiento de agua superficiales (ríos, manantiales) y subterráneas, a partir de pozos de observación y agua emplazados en las inmediaciones de la futura zona de explotación de mina.
- Toma de muestras de aguas superficiales (incluidos manantiales) y subterráneas (piezómetros) y el registro de parámetros físico-químicos: 50 ml. para análisis isotópicos, 01 litro para aniones, 0.5 litro para cationes y metales pesados, 0.5 litro para tritio.

#### **Análisis químicos e isotópicos**

Los resultados de los análisis de las muestras de aguas subterráneas de mina, han servido para efectuar el estudio de las aguas de los manantiales. Utilizando los resultados de los isótopos estables, tritio y la hidrogeoquímica, se ha efectuado la interpretación de los

isótopos estables, con referencia a la Línea Meteorica Mundial (LMM) y Línea Meteorica Local.

#### **Trabajo de campo**

A mediados del 2007, se llevaron a cabo los trabajos de campo efectuados por personal de IPEN y apoyo de personal técnico de la mina; previamente se efectuó la revisión de la información planimétrica y geológica de la misma. El trabajo de campo ha consistido en la toma de muestras y mediciones de los parámetros físico-químicos, de acuerdo con el protocolo establecido tanto en las muestras de agua para el análisis isotópico como para los análisis químicos, apoyados por la carta nacional y planos suministrados por la empresa minera; se ha utilizado GPS para georeferenciar la ubicación de muestras de superficie; finalmente, el etiquetado y su acondicionamiento para ser trasladadas a los laboratorios del IPEN en Lima para su análisis correspondiente.

#### **5. Análisis y discusión de resultados**

##### *Hidrogeoquímica*

La hidrogeología en medios fracturados como es el caso del presente estudio, indica un movimiento de aguas subterráneas en un medio de rocas intrusivas y sedimentarias, cuya porosidad efectiva esta dada por fallas, fracturas, fisuras y planos de estratificación. La presencia de rocas calizas presentan estructuras tipo karst que en profundidad pueden estar controlando el movimiento de las aguas subterráneas, comportándose como zonas de circulación preferencial o formando cuerpos de agua (seudos acuíferos). Las estructuras en estos casos, pueden hacer más rápido el movimiento de las aguas en profundidad y en consecuencia determinar un tiempo de tránsito corto.

En la vertiente izquierda de la cuenca del río aledaño, antes de un poblado, afloran en media ladera una serie de manantiales casi alineados a altitud promedio de 3600 m.s.n.m, y presentan un alineamiento propio de acuíferos libres cuando éstos quedan expuestos en superficie. Se ha observado, sin embargo, que los caudales de los manantiales son variables en función de la estación del año; así como también la variación de estos por las precipitaciones de la zona; de esta manera podemos hacer referencia al ejemplo del manantial aguas abajo, que en la fecha del reconocimiento tenía un caudal de más de 3 l/s y cuando se efectuó la toma de muestras

ya no afloraba agua, cambiándose el punto, de muestreo a otro con agua, pero con menor caudal. En el área de la mina existen afloramientos de agua, habiéndose muestreado un manantial de fisura.

Los parámetros fisicoquímicos registrados en campo, conjuntamente con los resultados analíticos de laboratorio obtenidos del muestreo, han servido para efectuar los diagramas que ilustran las características hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas, las que se presentan a continuación.

### Diagrama de Piper

El diagrama de Piper, clasifica los tipos de aguas por su composición química considerando aniones y cationes; permite mostrar en términos generales la composición química de las aguas bajo estudio, que en este caso corresponden al tipo sulfatado-bicarbonatado - cálcicas (Figura 2); los extremos sulfato y bicarbonato en el campo del triángulo de aniones, indican en general aguas de lluvia afectadas por disolución y pobre mezcla; las primeras, efecto de infiltración por zonas mineralizadas (con presencia de sulfatos) o con aportes de aguas ácidas y las segundas, aguas de infiltración de lluvias que son predominantemente del tipo bicarbonatadas cálcicas y con pH ligeramente neutro, debido a que circulan principalmente por terrenos de rocas de composición calcárea.

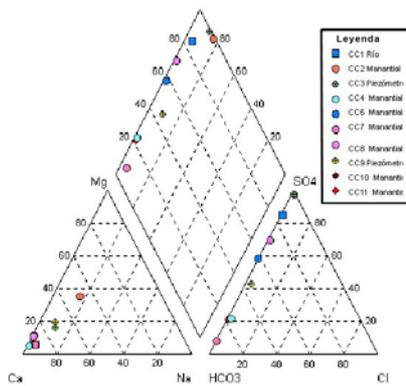


Figura 2: Diagrama de Piper.

### Diagrama de Schoeller

El diagrama de Schoeller (Figura 3) muestra con mayor detalle la clasificación de los distintos tipos de agua de filtraciones bajo estudio; Los análisis de aniones y cationes, indican que en las aguas de manantiales, predomina la composición del tipo sulfatado-bicarbonatado-cálcicas, aunque con muy

bajos valores de Na, debido a que la principal característica que domina la química del agua en los manantiales en la vertiente del río es la presencia de calcio por efecto de la infiltración del agua de lluvia, ayudado por el tiempo de residencia en el subsuelo y la interacción agua-roca.

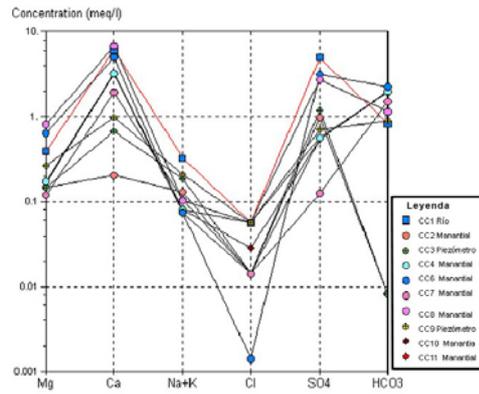


Figura 3: Diagrama de Schoeller.

### Diagrama Ternario Cu-Mn-Zn

En este diagrama se representan tres elementos Cu-Mn-Zn (Figura 4) presentes en solución en el agua de manantiales, orienta en cuanto a su posible origen y presenta correlación entre Zn-Mn debido a la interacción agua-roca y su labilidad en el proceso geoquímico; en este caso, puede considerarse que la presencia de H<sub>2</sub>S como el generador de la disolución, según la intensidad de la alteración hidrotermal y los elementos componentes de la roca huésped. La presencia de bicarbonato-de calcio en el sistema, establece desde el punto de vista de la hidrodinámica, que el o los flujos subterráneos en la mina discurren, a través de rocas carbonatadas con pobre participación de aguas superficiales de (ríos, lagunas, etc.), por los contenidos de sulfatos y bicarbonatos.

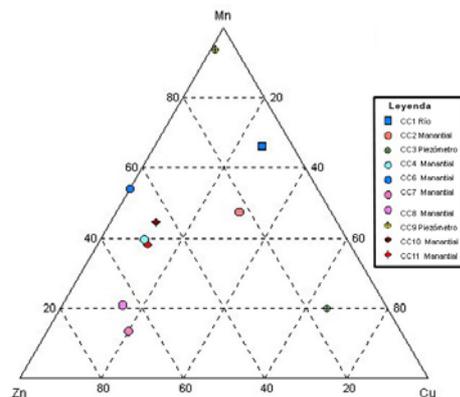


Figura 4: Diagrama ternario Cu-Mn-Zn.

Por los resultados del estudio, se deduce que las aguas subterráneas de la zona, muestras de agua de piezómetros y manantiales de la mina, se ubican todas muy próximas y en mas o menos en una unidad de diferencia entre sus valores isotópicos, y configuran una línea de tendencia, que resulta cercana tanto a la Línea Meteorica Mundial como la Línea Meteorica Local. Mientras que los valores isotópicos de la muestra de agua superficial del río están fuera de esta tendencia, lo cual revela que la contribución de aguas de este río en la recarga de las aguas subterráneas de la mina y los manantiales de la vertiente izquierda del río aledaño es marginal. En consecuencia, las aguas subterráneas bajo estudio tienen su origen principalmente en la precipitación de aguas de lluvia que se infiltran en la parte alta de la cuenca.

Finalmente, la composición isotópica de la descarga de las aguas subterráneas en la mina, representan la composición isotópica media de la precipitación de la zona. La uniformidad en la composición isotópica, es la más notable conclusión en relación con la zona geográfica; el *efecto de altitud*, es el factor de mayor influencia sobre la composición isotópica del agua de precipitación.

#### *Tritio*

La concentración de 1.9 U.T. del río aguas abajo, menor que el promedio de aguas subterráneas indica que además de su origen a partir del drenaje superficial de aguas de lluvia, tiene un aporte o componente importante de aguas subterráneas con mayor tiempo de residencia cuyo origen debe estar en las formaciones calcáreas de la cuenca.

## **6. Resultados**

Por las características del contexto hidrogeológico de la mina presenta un nivel de infiltración de aguas de lluvias de modo que su régimen se relaciona estrechamente con los volúmenes pluviométricos anuales de la zona. Desde el punto de vista hidrogeoquímico, las aguas subterráneas en las inmediaciones de la mina, están asociadas a la dinámica del sistema fisurado que atraviesan formaciones rocosas de tipo sedimentario y de composición arenocalcárea. El diagrama de Piper, muestra la clasificación química del tipo de agua

sulfatado-bicarbonatado-cálcicas, con pobre nivel de mezcla y que evolucionan a partir de aguas de lluvias que se infiltran en el subsuelo debajo del nivel no saturado, desplazándose a través de fallas y fracturas con poco tiempo de residencia. En consecuencia, de acuerdo con los valores isotópicos reportados, tanto de piezómetros y manantiales de la mina; así como de los manantiales de la vertiente, el agua subterránea de la zona de estudio, tiene un origen a partir de recarga local de precipitaciones de aguas de lluvias y que están normalmente empobrecidas en isótopos estables (O-18 y H-2).

En relación con los valores de Tritio de las aguas subterráneas, varían entre 1.8 a 3.3 U.T, contenido que se estima está dentro del actual rango de valores de aguas de lluvias para el Perú; revelan que su tiempo de residencia en la zona es corto tal como ocurre en terrenos fisurados, pero con una trayectoria de flujo difusa, reflejada en la variación del contenido de Tritio.

## **7. Conclusiones**

Los resultados isotópicos y de la química del agua de la zona de estudio, indican que las aguas subterráneas en la mina y la vertiente izquierda del río aledaño, se originan a partir de precipitaciones de aguas de lluvias de recarga local y se infiltran por el sistema de fracturas y fisuras del contexto estructural de la mina, la infiltración por lo general tiene un tiempo de transito rápido en el subsuelo.

La estrecha diferencia de los valores isotópicos de agua de manantiales y piezómetros, de la zona de estudio indican igualmente, aguas de lluvia de rápida infiltración y un pobre grado de mezcla con otras masas de agua más profundas en su movimiento en el subsuelo, características propias de condiciones climatológicas estables.

## **8. Bibliografía**

- [1]. International Atomic Energy Agency. Guidebook on Nuclear Technologies in Hydrology. Technical Reports N° 91. Vienna; Austria, 1968.
- [2]. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Edited Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1980.