

# Hidrodinámica de drenaje ácido en filtraciones de una mina ubicada en el noreste peruano

Jacinto Valencia [jvalencia@ipen.gob.pe](mailto:jvalencia@ipen.gob.pe), Enoc Mamani, José Maguiña, Jorge Condori

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

## Resumen

Se presentan los resultados del estudio isotópico y de la hidrodinámica de aguas superficiales y subterráneas de una mina ubicada en el departamento de Cajamarca, orientado a determinar el movimiento de las aguas ácidas de mina por formaciones geológicas de naturaleza sedimentaria. Los resultados indican un proceso de auto depuración de las aguas al pasar por rocas de naturaleza alcalina calizas y areniscas, los estudios aún en progreso no muestran conexión de las filtraciones con aguas superficiales, manantiales y ríos de la cuenca. Se tiene previsto la aplicación de radiotrazadores para efectos de monitoreo de esta agua y poder obtener información que permita tomar las medidas para el manejo del recurso hídrico.

## 1 Introducción

En la actualidad, la mina se encuentra paralizada y se está efectuando el Plan de Cierre. Los puntos de monitoreo han sido identificados y muestreados a fin de realizar el estudio de la hidrodinámica mediante la aplicación del trazador radiactivo tritio y establecer su movimiento para determinar si existe contribución de aguas de mina a ríos y manantiales aledaños.

La toma de muestras de agua se efectuó tanto al interior de la mina como en superficie y se han aplicado las técnicas isotópicas e hidroquímicas que permitieron obtener información del origen de las filtraciones en el interior de la mina.

El movimiento de las aguas subterráneas se efectúa en un ambiente que corresponde a rocas sedimentarias con interestratificaciones de rocas volcánicas, todas afectadas por plegamiento-fallamiento y fracturas por donde circulan aguas subterráneas, los que han sido expuestos por las labores de explotación de la mina, produciéndose las filtraciones.

## 2 Fundamentos de las Técnicas Utilizadas

### 2.1 Trazadores ambientales

Los átomos de Oxígeno e Hidrógeno que conforman la molécula de agua, 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).

La variación de las concentraciones de estos isótopos estables depende entre otros factores, de la presión atmosférica, temperatura y humedad del ambiente donde se encuentra el agua, así como de los cambios de fase a que están sometidos. Las unidades de medida de las concentraciones de O-18 y H-2 son en o/oo (fracción por mil) relativas a las de una muestra patrón de agua de mar recogidas de diversos puntos de la tierra, denominado "VSMOW" (Vienna Standard Mean Ocean Water) proporcionado por el Laboratorio de Hidrología Isotópica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) a los laboratorios de análisis isotópicos en todo el mundo.

El otro tipo de trazadores aplicados en hidrología son los trazadores radiactivos artificiales. En el presente estudio se ha utilizado al tritio como trazador radiactivo bajo la forma de agua tritiada (THO) que es el único trazador radiactivo isotópico del agua; es decir, se halla incorporado en la propia molécula del agua y no disuelto en ella como ocurre con los demás por esta razón es el trazador que ofrece las mayores garantías en relación con la fidelidad de marcado de volúmenes de agua.

## 2.2 Marco hidrogeológico de la zona de estudio

La geología de la zona, la constituyen principalmente formaciones de rocas sedimentarias interestratificadas y que alternan con rocas volcánicas, las primeras pertenecientes a las formaciones Pariatambo, Chulec, Inca y Goyllarisquisga, formaciones que en la zona están afectadas por plegamiento y fallamiento, siendo la estructura principal un anticlinal cuyo flanco noreste le confieren a las rocas sedimentarias un fuerte buzamiento, adoptando la estratificación una disposición subvertical en rocas como areniscas, calizas, lutitas y rocas volcánicas, esta secuencia se presenta imbricada así como afectada por fallas, conforman el medio por el cual circulan las aguas subterráneas a partir de la zona de recarga por aguas de lluvia; la pendiente hidráulica y permeabilidad variable de acuerdo con el medio rocoso sedimentario siguiendo una dirección más o menos paralela a la superficie del terreno hasta el nivel de base siguiendo el alineamiento de la Quebrada, con orientación norte-sur hacia el curso principal, el río.

## 2.3 Movimiento de Aguas Subterráneas en Medios Fisurados

El interés está focalizado en conocer la relación entre aguas ácidas de pH 2 que se infiltran en interior mina, las surgencias y manantiales que se ubican en el fondo del valle con un pH mayor 4,5 a 6,5, existiendo una distancia de 1500 m desde la infiltración hasta los lugares de surgencia. Para el presente estudio se han determinado puntos de control y monitoreo.

La finalidad del estudio es determinar si estas aguas que se infiltran después de discurrir por varias formaciones sedimentarias, areniscas, calizas y volcánicas, afloran de mejor calidad en superficie a través de manantiales y en el curso del río, en los puntos de drenaje de la vertiente.

En la parte inferior de la vertiente se observan manantiales tanto en media ladera como en el curso del río como manantiales subfluviales, durante el estudio de campo se identificó uno próximo al punto de monitoreo de “pescadito” que aporta su agua directamente al curso del río.

## 3 Metodología

La metodología del trabajo utilizada consiste en identificar puntos de aguas de filtraciones y puntos de afloramiento de manantiales, surgencias de agua, muestreo de agua de filtraciones y manantiales. Aplicación de la técnica de isótopos ambientales Oxígeno-18, Deuterio y Tritio apoyada por la hidrogeoquímica. Igualmente, el empleo de la técnica de trazadores radiactivos (Tritio).

Con este propósito, inicialmente se ha determinado los puntos de muestreo para los análisis isotópicos y químicos y la recolección de muestras de agua. Al mismo tiempo, se seleccionó los puntos para el monitoreo del trazador a inyectar, incluida la toma de muestras de “blancos” de agua en los diferentes puntos establecidos para el monitoreo del trazador, todas estas acciones fueron realizadas previo a la inyección del trazador y comprende la zona de influencia del estudio, la vertiente derecha del río entre los puntos de monitoreo 01 denominado Manantial y el punto de monitoreo 05 ubicado en las inmediaciones del Caserío A. García

## 4 Discusión de los Resultados

### 4.1 Hidrogeoquímica

El tipo de agua corresponde a la sulfatada-cálcica. El agua del manantial y el río aledaño a la mina, presentan una ligera composición bicarbonatada debido a una mayor interacción con rocas de naturaleza calcárea, a pesar de presentar diferente grado de acidez (pH 7,8) para el manantial y pH 2,8 para aguas del río en el área de estudio. Las muestras de filtraciones presentan un predominio de Ca-Mg.

En el diagrama de Schoeller (Figura 1) se presentan las concentraciones absolutas en meq/l que permite mostrar la diferencia hidrogeoquímica con mayor detalle entre aniones y cationes. Así se puede discriminar por su contenido los tipos de aguas: agua de río pobre en sulfato y Calcio-Magnesio, parte alta del río, aguas de los manantiales y, en la parte baja del río menor contenido en sulfato-bicarbonato y el agua de filtraciones con alto contenido de sulfato y calcio. Estas

últimas guardan alguna relación con la composición del agua de lluvia.

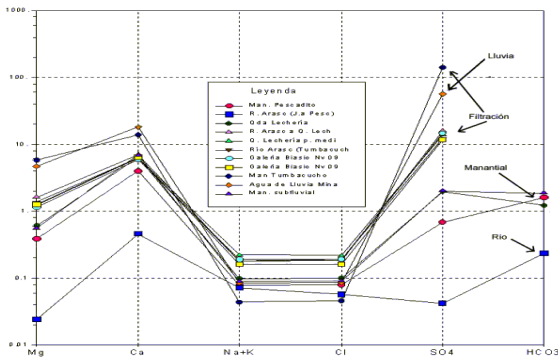


Figura 1. Diagrama de Schoeller.

En el diagrama Fe-Cu-Mn (Figura 2) las muestras del manantial y quebrada Leche, presentan cierta proporcionalidad en cuanto a su contenido químico de estos tres elementos, las demás muestras indican una concentración en los elementos Fe-Mn por su fácil lixiviación y movilización de estos elementos en el medio.

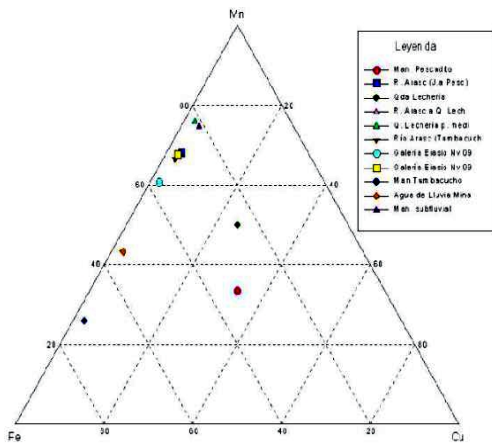


Figura 2. Diagrama Fe-Cu-Mn.

#### 4.2 Isótopos ambientales

En consecuencia, el movimiento de las aguas en el subsuelo esta relacionado con el relieve superficial y el aspecto lito-estructural. La identificación en el río de manantiales subfluviales con agua de buena calidad como el de la margen derecha del río, es indicativo que estos aportes de agua, mejoran la calidad del agua de río.

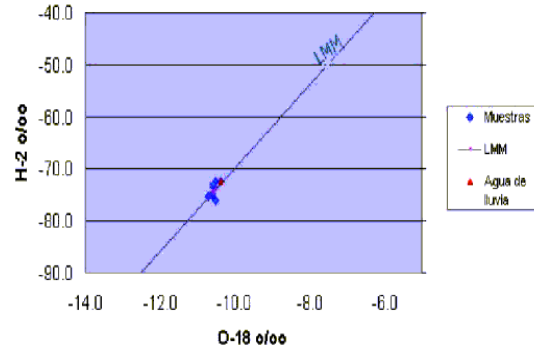


Figura 3. Diagrama Oxígeno-18, Deuterio.

En el diagrama las muestras se agrupan en un sólo campo; esto lleva a interpretarse que las aguas involucradas en el presente estudio corresponden a aguas del mismo origen, aguas de lluvias recientes y al parecer con un tiempo de renovación corto, esto debido a las concentraciones isotópicas que son más o menos similares a la concentración isotópica del agua de lluvia de la LMM (Figura 3), vale decir, con un valor promedio de  $\delta\text{O-18}$  de  $-10,54$  y  $\delta\text{H-2}$  de  $-74,08$ .

Este comportamiento isotópico de las aguas del sistema en estudio es comparable y propio de regiones húmedas con una tasa de precipitación alta y cuencas de alto rendimiento hídrico.

## 5 Conclusiones

Por los estudios isotópicos y química del agua ya efectuados de las filtraciones de la mina indican, que las aguas de lluvia generan por su infiltración en zonas mineralizadas aguas ácidas, que son detectadas en las galerías, estas aguas ácidas a su vez se infiltran al interior de las formaciones geológicas manteniendo su composición isotópica, diferenciándose de aguas con tiempo de residencia mayor en el sistema. Las aguas ácidas de infiltración son atenuadas en la carga de metales y acidez por el tipo de roca, el agua de los manantiales es de buena calidad.

Es un estudio aun en proceso. Los resultados hasta ahora obtenidos, indican que el sistema hídrico de aguas subterráneas en esta cuenca, por lo menos en el área de estudio, tiene una

recarga a partir de aguas de lluvia con valores isotópicos empobrecidos de O-18 y Deuterio, sugiriendo varios ciclos de evaporación y condensación hasta el punto de precipitación muy similar a la composición de los manantiales; descartándose participación de aguas fósiles

Los valores obtenidos de tritio ligeramente altos, son valores de regiones húmedas y de aguas subterráneas que tienen un tiempo de renovación rápido, es decir un tiempo corto de residencia en el subsuelo, esto es indicativo del tiempo que se puede esperar en la aplicación y detección de radiotrazadores artificiales.

## **6 Referencias**

- [1] Clark I, Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology. New York: Lewis Publishers; 1997.
- [2] International Atomic Energy Agency. Isotope and Geochemical Techniques Applied to Geothermal Investigations. TECDOC Series No. 788. Vienna: Austria; 1995.