



## Delimitación de perímetros de protección de acuíferos volcánicos en la zona oriental de la ciudad de Arequipa

Fluquer Peña Laureano<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET.

<sup>2</sup>FyG Consultores S.A.C.

### RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló en la zona oriental de la ciudad de Arequipa a solicitud de la comisión de usuarios de agua para riego de Sabandía, con el objetivo generar información hidrogeológica que se puede utilizar en los procesos de planificación y acondicionamiento territorial. En la zona oriental de Arequipa existe dos acuíferos bien identificados, el acuífero fisurado en rocas volcánicas y el acuífero poroso no consolidados en rocas detríticas, cuya producción de aguas subterráneas en forma natural supera los 618 L/s (aforo marzo 2016), estas aguas se usan en consumo humano y sobre todo en el riego de zonas agrícolas de Yumina y Characato. El trabajo consistió en identificar y cartografiar la zona de alimentación de estos acuíferos, medir sus parámetros hidrogeológicos y a través de la hidrodinámica e hidroquímica determinar su procedencia. Etapas de evaluación esenciales para la zonificación de perímetros de protección en el área de estudio.

**Palabras Clave:** acuífero, detrítico, aforo, hidrodinámica, parámetros hidrogeológicos.

### ABSTRACT

The current work was developed in the eastern part of Arequipa city at the request of the water users commission of Sabandía's irrigation, with the objective of generating hydrogeological information that can be used in the planning and territorial conditioning processes. Eastern Arequipa

have two well-identified aquifers, the aquifer fissured in volcanic rocks and the porous aquifer not consolidated in detrital rocks, whose groundwater natural production exceeds 618 L/s (March 2016 gauge), these waters are used in human consumption and especially in agricultural irrigation areas of Yumina and Characato. The methodology consisted on identifying and mapping the feeding area of these aquifers, measuring their hydrogeological parameters and determinate them aquifer origins through hydrodynamics and hydrochemistry studies. This evaluation stages are essential for zoning the protection perimeters in the study area.

**Keywords:** aquifer, detrital, gauging, hydrodynamic, hydrogeological parameters.

### METODOLOGÍA

La hidrogeología de la zona oriental de Arequipa se sustenta con información de campo, tomando como base el mapa geológico del volcán Misti (Mariño et al, 2016), se ha diferenciado la composición litológica de las rocas volcánicas desde el punto de vista de su permeabilidad, se realizaron ensayos *in situ* (adquiriendo valores de velocidad de infiltración del agua en las fracturas y poros de las rocas) desarrollando así un cartografiado hidrogeológico diferenciando las rocas volcánicas con capacidad para almacenar y transmitir aguas subterráneas de las rocas impermeables.

Los trabajos de campo sirvieron para registrar las evidencias de la presencia del agua subterránea en

superficie, a través de un registro de manantiales, fuentes termales y pozos. Una de las actividades principales para este trabajo fue, el muestreo de fuentes de aguas subterráneas y las medidas *in situ* de los parámetros físico-químicos, teniendo en cuenta que las aguas subterráneas adquieren la composición química de la roca por donde circulan y llega al manantial o pozo con una determinada composición química. Las muestras obtenidas fueron analizadas en el laboratorio de Ingemmet por el método Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES) y Espectrometría de Masa por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) que dio como resultado la composición química y la calidad de las aguas. Para el análisis e interpretación final de datos hidroquímicos se han utilizado los diagramas de Piper y evolución de flujos de Mifflin, con la finalidad interpretar su origen o procedencia del agua subterránea (interacción agua roca), así como su calidad para los distintos usos. El análisis de estos datos nos permitió delimitar los perímetros de protección de los acuíferos y manantiales (Figura 2).

## RESULTADOS

Durante el trabajo de campo se logró inventariar 63 fuentes; de los cuales 37 son manantiales, 15 pozos, 2 galerías filtrantes, 4 fuentes termales y 5 puntos de registro. Los manantiales de mayor interés tienen caudales elevados: La Bedoya (200 L/s), Yumina (206 L/s) (Fotografía 1), Ojo del Milagro 2 (114 L/s) (Fotografía 2), Ojo del Milagro 3 (98 L/s) (Fotografía 3), aforados en mayo 2016. Estos manantiales mantienen la cantidad de descarga a lo largo del año hidrológico, evidenciando que provienen de acuíferos importantes para los cuales es imprescindible su protección.



M. Yumina  $Q = 206 \text{ L/s}$



M. Ojo del Milagro 2  $Q = 114 \text{ L/s}$

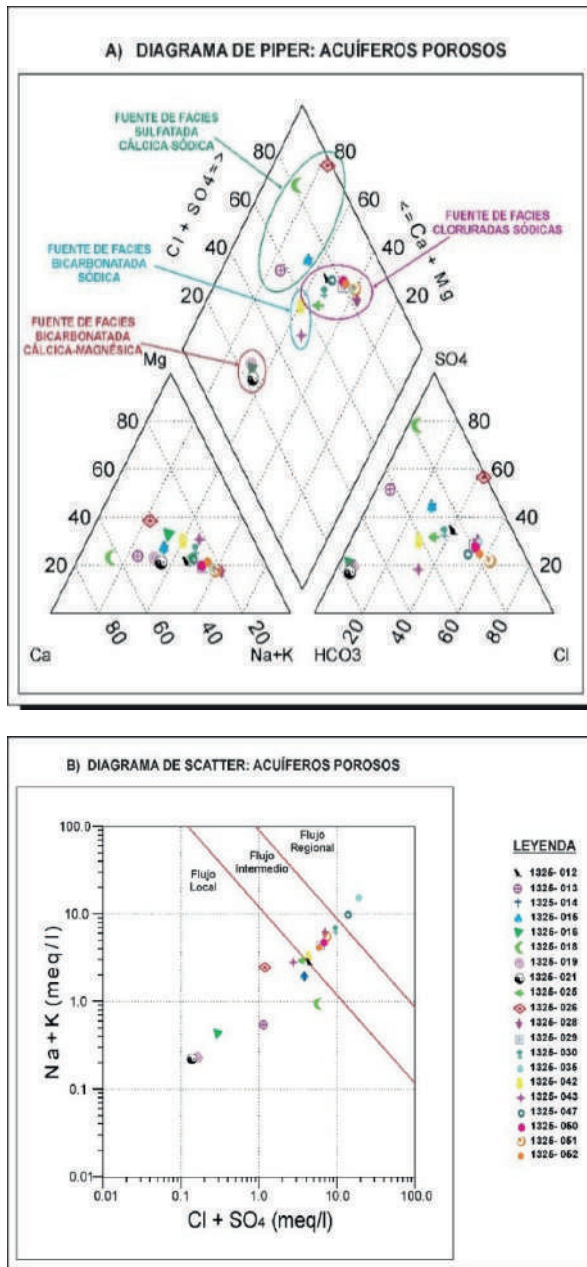


M. Ojo del Milagro 3  $Q = 98 \text{ L/s}$

Para calcular los valores de conductividad hidráulica se realizaron dos (02) ensayos en roca y once (11) ensayos en materiales vulcanoclásticos. El ensayo EI-01, se realizó sobre rocas volcánica del Grupo Barroso, lavas andesíticas fracturadas, cuyo valor calculado es de  $0.18 \times 10^{-1} \text{ m/día}$ , el ensayo EI-02 y EI-03, se realizaron en rocas volcánicas con caída de tefras cuyo valor calculado es de  $0.22 \times 10^{-1} \text{ m/día}$  y  $0.15 \times 10^{-1}$ , el ensayo EI-05, se realizó sobre Lapilli con ceniza y fragmentos líticos, cuyo valor calculado es de  $0.37 \times 10^{-1} \text{ m/día}$ , clasificando como rocas algo permeables y asignándole una calificación hidrogeológica de acuífero pobre. En general los valores de permeabilidad corresponden a acuíferos pobres, pero tienen valores distintos, por lo tanto, diferentes velocidades de infiltración, pero importante para la zona de alimentación y recarga.

Desde el punto de vista hidroquímico, en la zona de estudio se ha muestreado 20 fuentes de aguas subterráneas, que corresponden a manantiales, fuentes termales y pozos (Figura 1). El año 2016, se analizaron los manantiales Yumina, Ojo

el Milagro 2 y Ojo del Milagro 3, y las fuentes aledañas, entre pozos y fuentes termales (Agua de Jesús), donde se ha evaluado concentraciones de los componentes iónicos mayoritarios, como los cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) y aniones ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ ).



**Figura 1.** Diagramas de Piper y Scatter para fuentes procedentes de acuíferos fisurados volcánicos

La predominancia hidroquímica de las fuentes de aguas subterránea más importantes para el presente reporte son el manantial Yumina (1325-012) Clorurada Sódica (Cl-Na), Ojo del Milagro 2 (1325-014) y Ojo del Milagro 3 (1325-015) Sulfatada Cálcica ( $\text{SO}_4$ -Ca), La Bedoya (1325-028),

Clorurada Sódica (Cl-Na), cuyos valores se deben al contacto con rocas volcánicas durante de su recorrido (Grafico 1).

## DISCUSIÓN

Los manantiales y pozos de predominancia bicarbonatada cálcica, proviene de la zona edáfica, donde hay una alta concentración de  $\text{CO}_2$  debido a la respiración de organismos y la descomposición de la materia orgánica, las aguas que tiene contacto con materia orgánica y su recorrido es local a intermedio adquieren la predominancia bicarbonatada.

La predominancia sulfatada cálcica ( $\text{SO}_4$ -Ca) coincide con fuentes de recorrido local a intermedio, (Figura 1). Estas fuentes son aguas con mayor tiempo de retención en el subsuelo y con mayor distancia de recorrido; sin embargo, es posible analizar con parámetros como el caudal y temperatura, que nos ayudará a determinar si las fuentes de predominancia sulfatada, son de recorrido intermedio o tienen un enriquecimiento adicional de sulfato y calcio.

Las fuentes de Yumina (1325-012) y La Bedoya (1325-012) tienen recorrido intermedio a regional (Figura 1), las aguas subterráneas que llegan a estos manantiales adquieren cloruros de la lluvia y de rocas volcánicas, la precipitación sobre rocas volcánicas fracturadas otorga un fuerte componente del ion cloruro. Este analito no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, tampoco es adsorbido, ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que se le considera un buen trazador, manteniendo su predominancia química (clorurada) hasta los manantiales. Las aguas de los manantiales Yumina (1325-012) y La Bedoya (1325-012) inician su infiltración en la parte más elevada del estrato volcán Pichupichu.

Las aguas de los manantiales Ojo del Milagro 2 (1325-014) y Ojo del Milagro 3 (1325-015), se recargan en el estrato volcán y en la altiplanicie aledaña, por lo tanto su composición sulfatada cálcica ( $\text{SO}_4$ -Ca) lo adquiere del lavado de materiales salinos, de la oxidación de sulfuros y/o de la descomposición de sustancias orgánicas que tuvieron contacto con el agua. Según el grafico de Scatter se interpreta que estas aguas tienen recorrido local e intermedio los mismos que interpretamos que existe mezcla de aguas en profundidad.

Las características hidrogeológicas de rocas fracturadas están relacionados a la conexión entre fracturas es un factor determinante para medir el grado de permeabilidad, en sectores las fracturas predominantes se encuentran siguiendo los sistemas de cristalización de la roca y en otros se encuentran alineado a estructuras como fallas y fracturas (permeabilidad medida entre  $0.15 \text{ m}^2/\text{día}$  y  $0.43 \text{ m}^2/\text{día}$ ), en la parte nor oriental de este complejo se ubica la laguna Salinas, que viene a ser una cuenca endorreica y concentra todas las aguas superficiales y subterráneas en la laguna, la naturaleza del basamento de la laguna es semi-permeable. Según esta evaluación hidrogeológica, estos sectores constituyen la zona de alimentación y recarga de acuíferos.

## CONCLUSIONES

Los perímetros de protección de la zona de recarga, desde el punto de vista hidrogeológico se considera a la zona de alimentación y recarga como áreas de restricciones moderadas. Actualmente el área delimitada (Figura 2) cubre gran parte del volcánico Barroso, que incluye el estrato volcán Pichupichu y parte de la cuenca endorreica de la

laguna Salinas. El perímetro calculado para la protección de la zona de recarga es de  $2460 \text{ km}^2$  y que comprende un área total de  $690.17 \text{ km}^2$ .

Loa perímetros de protección de manantiales se considera la parte inmediata inferior de la zona delimitada como zona de protección de manantiales (Figura 2). Si bien, las pruebas de campo nos permitieron medir permeabilidades heterogéneas (13 ensayos con valores entre  $0.15 \times 10^{-1} \text{ m/día}$  y  $0.43 \times 10^{-1} \text{ m/día}$ ) El perímetro calculado para la protección de la zona de protección de manantiales es de  $142.08 \text{ km}^2$  y que comprende un área total de  $290.98 \text{ km}^2$ .

## BIBLIOGRAFÍA

Sulca, P. & Peña F. (2010) – Determinación de flujos regionales y locales de los acuíferos orientales de la ciudad de Arequipa en base a datos hidroquímicos e isotópicos. En: Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco, 2010.

Mariño, J. et al. (2016)- Geología y mapa de peligros del volcán Misti, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 60, 170 p., 2 mapas.

