

COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO QUILCA-VITOR-CHILI

HIDROGEOLOGICAL BEHAVIOR OF VOLCANIC ROCKS IN THE UPPER PART OF THE QUILCA RIVER BASIN - VITOR - CHILI

PEÑA L. F. & SULCA O. P.

RESUMEN

La exploración de aguas subterráneas en rocas volcánicas, en el Perú y el mundo es poco conocida. Los estudios existentes se basan en la ubicación de centros volcánicos y su relación con los yacimientos minerales. Sin embargo, esta cartografía geológica nos ha permitido identificar rocas volcánicas de diferente litología, las cuales dependen mucho del tipo de erupción de donde proviene, de la edad del emplazamiento, y de las modificaciones que han sufrido desde su emplazamiento, etc. Para los propósitos hidrogeológicos, las rocas volcánicas tienen características muy diferentes, algunas son permeables y otras son impermeables. Los depósitos volcánicos permeables obedecen a erupciones efusivas (lavas) que por enfriamiento del depósito generan fracturas y actualmente constituyen rocas fracturadas donde se puede almacenar el agua subterránea. Las rocas volcánicas impermeables provienen de depósitos explosivos, donde la erupción que tuvo ese volcán estuvo cargada de productos como cenizas, piroclastos, tobas, etcétera, los cuales actualmente constituyen rocas impermeables y donde no es posible encontrar aguas subterráneas, pero si se caracterizan por ser la base o piso de los acuíferos.

En el presente artículo se identificaron las rocas volcánicas que tienen características para el almacenamiento y transmisibilidad de aguas subterráneas, las mismas que tienen condiciones para formar reservorios de aguas subterráneas o acuíferos. Para ello se han realizado modelos conceptuales para el funcionamiento del sistema hidrogeológico, considerando datos esenciales como la geología del terreno, producción de aguas subterráneas, permeabilidad y parámetros hidráulicos de las rocas volcánicas, medidas *in situ*.

Palabras claves: litología, rocas volcánicas, erupciones efusivas, explosivas, acuíferos volcánicos.

ABSTRACT

The explorations of groundwater in volcanic rocks, in Peru and around the world are few known. The existent studies are based in the localization of volcanic centers and its relationship with the mineral deposits. Nevertheless, this geologic cartography has allowed to identify volcanic rocks with different lithology, which depend of the origin of the type of eruption, time of emplacement, and of the modifications that have been suffered since its emplacement, etc.

To the hydrogeology purposes, the volcanic rocks have very different characteristics, some of them are permeable and other impermeable. The volcanic permeable deposits obey to the effusive eruptions (lava) that for cooling generated failures and constitute the fractured rocks where is deposited groundwater. The volcanic impermeable rocks proceed of explosive deposits, where the eruption was charged of products like ash, pyroclastic, tuffs, etc., constituting impermeable rocks and where is not possible to find groundwater, but they are characterized for be the base or impermeable floor of the aquifers.

In the present paper were identified volcanic rocks with characteristics to storage and transmissibility groundwater, consequently with conditions to form water reservoirs or aquifers. Considering it were developed conceptual models to the working of the hydrogeology system, as essential data: the geology of the land, production of the groundwater, permeability, hydraulic parameters of volcanic rocks and measures *in situ*.

Keywords: Lithology, volcanic rocks, effusive eruption, explosive, volcanic aquifers



Figura 1. Mapa de ubicación.

Introducción

La cuenca del río Quilca-Vitor-Chili se ubica al sur del Perú, en la región Arequipa. La zona explorada tiene una superficie de 7,875.8 km² y se sitúa dentro de la Cordillera Occidental de los Andes peruanos. Se encuentra entre la latitud 16° 10' y 16° 30' S y las longitudes 71° 10' y 71°40' E. Del sector sur al oeste resalta un alineamiento marcado de conos volcánicos que por acumulación sucesiva de sus productos han formado una cadena de montañas que incluye volcanes activos como Pichupichu, Misti y Chachani, etc.. En el sector oeste comprende la altiplanicie hasta la divisoria de la cuenca del río Chili.

Dentro de la cuenca se ubica Arequipa, la segunda ciudad más grande del Perú, con una población cercana al millón de habitantes y extensas campiñas agrícolas que tienen un régimen constante de consumo de agua. El servicio de agua potable llega a cerca de 650,000 habitantes y es suministrada por la EPS, SEDAPAR. Para el riego se utiliza las aguas del río Chili que pasa por medio de la ciudad y registra un aforo de 70 m³/s como caudal máximo mensual y 15.60 m³/s como caudal medio anual (ANA, 2010, Estación Charcani), las cuales solamente cubren parte del abastecimiento de las campiñas agrícolas.

Con el objetivo de generar nuevas fuentes de prospección y exploración de aguas subterráneas se han evaluado el comportamiento hidrogeológico de las rocas volcánicas que se ubican en la parte alta de la cuenca, la cual constituye un sistema hidrogeológico muy complejo por su origen y emplazamiento.

Metodología

Para el desarrollo del presente artículo, se realizaron tres campañas de campo comenzando con la cartografía hidrogeológica, en base del mapa geológico del INGEMMET, seguido de registro e inventario detallado de fuentes de aguas subterráneas: manantiales, fuentes termales y bofedales, así como el análisis físicoquímico de muestras seleccionadas; además se realizaron ensayos de infiltración en afloramientos rocosos que nos permitió medir la permeabilidad en puntos estratégicos. La descarga de aguas subterráneas en forma de manantiales se producen en zonas donde existen cambios de litología o están relacionados con una estructura geológica, por lo tanto, cuando medimos la surgencia de aguas subterráneas en los manantiales, el caudal de descarga nos indicará las dimensiones del acuífero o reservorio. Para entender este proceso hidrogeológico se han elaborado modelos hidrogeológicos conceptuales que nos permitan zonificar las principales rocas reservorio en zonas volcánicas.

El paisaje es desolado pero impresiona por la grandiosidad de las formaciones rocosas de gran espectacularidad, así como una flora y una fauna muy importante, que tiene relación directa con la presencia de las aguas subterráneas.

Morfológicamente forma una altiplanicie junto a la depresión intermedia, en forma de un gran plano inclinado hacia el suroeste y alcanza alturas que llegan a más de 5,000 msnm.

Resultados

Los aspectos relevantes dentro de la investigación son los siguientes:

Aspectos geológicos

Las diferentes erupciones han dejado la acumulación de material volcánico desde el mesozoico al cenozoico. Las rocas más antiguas corresponden al mesozoico, representadas por areniscas y lutitas del Grupo Yura que afloran muy cerca de la altiplanicie de pampa Cañahuas (desvío de la carretera a Chivay). El cenozoico cubre la mayor parte de la zona de estudio, formando una extensa altiplanicie representada por una serie de pequeños cerros y llanuras aisladas, recortada por valles y quebradas de cauces anchos y poco profundos. La mayoría de estos cerros corresponden a conos volcánicos muy antiguos fuertemente erosionados por las quebradas y por la acción glaciaria pleistocénica.

En la parte central y norte se observa el Grupo Tacaza, compuesta de ignimbritas, tobas y en su parte superior lavas andesíticas. Sobre el Grupo Tacaza se encuentran rocas pertenecientes a la formación Maure y Sencca, constituidas por piroclastos de naturaleza andesítica, dacítica y riolítica, seguida de la Formación Capillune constituida por una intercalación de arenas, areniscas, arcillas, conglomerados y piroclastos que se presentan en capas delgadas y con coloraciones grises, blanquecinas y anaranjadas. Por encima de las formaciones Maure Senca y Capillune se encuentra en discordancia el Grupo Barroso de edad plioceno pleistoceno, conformado por alternancia de derrames lávicos y piroclastos de composición andesíticas y dacítica. Todos estos materiales se encuentran parcialmente cubiertos de depósitos glaciares y fluvio-glaciares formados por bloques de gravas, gravillas y arenas mezclados con piroclastos. En esta zona se distinguen también numerosos complejos volcánicos.

Características hidrogeológicas de los materiales volcánicos

El estudio hidrogeológico en rocas volcánicas constituye un caso muy específico ya que no forman parte de los típicos acuíferos fisurados o porosos. Los materiales volcánicos recientes engloban rocas de diferente naturaleza alrededor del edificio volcánico; las rocas volcánicas más antiguas, procedentes de un arco volcánico o de volcanes extintos, también tienen naturaleza distinta; las lavas, piroclastos, tobas y otros elementos forman los depósitos volcánicos condicionados por factores diversos como la edad, la distancia al centro de emisión, la tectónica posterior, la erosión e intemperización, etc. Por consiguiente la localización de acuíferos requerirá la reconstrucción de la historia geológica, para conocer su geomorfología y su relación con materiales de contacto. La estructura general de las formaciones volcánicas consiste principalmente en un apilamiento de materiales. Pueden ser desde acuífugos

perfectos (impermeables) hasta acuíferos de muy alta productividad, piroclastos con porosidad efectiva del 50%. Estas características hacen que sus propiedades hidrogeológicas sean muy variables; en base a su orientación y espesor los materiales volcánicos pueden tener alta heterogeneidad y anisotropía (Custodio y Llamas 1996). (véase Cuadro 1).

Acuitardo Tacaza

Los materiales del Grupo Tacaza son muy variados. La parte inferior destaca por su litología, compuesta por tobas de composición dacítica y riolítica desvitrificadas que tienen naturaleza impermeable, la cual favorece al almacenamiento y surgencia de aguas subterráneas a través de manantiales y bofedales. En la parte superior contiene ignimbritas, lavas y brechas andesítica a basáltica con fenocristales de horblenda, intercalados con vulcanitas y aglomerados de coloración gris rojiza. Una parte de estos materiales tienen permeabilidad vertical y las direcciones de flujo se concentran a través de las fracturas constituyéndose en acuitardos volcánicos, sin descartar que la parte superior pueda albergar acuíferos pobres de moderada a baja productividad.

Acuífero Maure

Su litología la compone una secuencia volcano sedimentaria interestratificada con conglomerados, areniscas cuarzosas parcialmente compactas, limolitas de color verde oscuro, horizontes de material volcánico redepositado y tufos volcánicos. Estos materiales parecen haber sido alterados por procesos exógenos y se presentan en diferentes formas y tamaños. La permeabilidad de estos materiales es muy variable, como la porosidad, aunque no necesariamente se encuentre relacionada. Estas variaciones litológicas generan que el Grupo Maure tenga características de comportarse como un acuífero semi-confinado. En muchos sectores del altiplano especialmente en el Ayro, parte alta de la Región Tacna, han mostrado evidencias de ser un acuífero potencial (INADE 1993, PET, 2008).

Acuífero Capillune

Los estratos de la formación Capillune, son horizontales y subhorizontales, cerca de su contacto con rocas más antiguas, presentan buzamientos entre 20 y 25°. Su litología lo compone una intercalación de areniscas, arcillas, conglomerados y piroclásticos que se presentan en capas delgadas y con coloraciones grises, blanquecinas y anaranjadas. La configuración de los estratos y el componente litológico genera heterogeneidad acentuada, principalmente por que las capas subhorizontales, tienen variada composición litológica, por lo tanto, el comportamiento hidráulico también es variable y se manifiesta a través de su permeabilidad horizontal. Este componente litológico nos permite clasificar a los horizontes de areniscas tobaceas, piroclastos y lapillis en acuíferos

CUADRO 1
CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ROCAS VOLCÁNICAS

UNIDAD VOLCANICA	LITOLOGIA	M (%)	K (m/día)	ESPESOR	CLASIFICACIÓN
Grupo Tacaza	Brechas y tobas	De 1 a 20	De 0.20 a 8.64	± 1800	Acuitardo volcánico
	Areniscas	De 4 a 25	De 0.076 a 0.36		
	Flujos de lava	De 1 a 10	De 1.5 a 19.87		
Grupo Maure	Conglomerados	De 1 a 40	De 0.2 a 8.64	± 1200	Acuífero volcánico sedimentario
	Areniscas	De 4 a 25	De 0.076 a 0.36		
	Volcánicos	De 1 a 10	De 1.5 a 19.87		
	Arenas, areniscas	De 4 a 25	De 0.076 a 0.36		
Formación Capillune	Piroclastos	De 1 a 50	De 10X10 ⁻⁵ a 1	± 210	Acuífero volcánico sedimentario
Grupo Barroso	Cenizas y arcillas	De 4 a 60	De 8.3 X10 ⁻⁷ a 1	± 150	Acuífero volcánico
	Lavas Andesíticas	De 1 a 10	De 1.5 a 19.87		

Fuente: Peña y Sulca (2009), Custodio (1996), Sanders y Smith (1998), Morris y Johnson (1982), Davis (1969).

(Foto 1) y a los horizontes de arcillas, cenizas y limos como acuitardos, por lo tanto esta formación es típica de acuíferos multicapa y que en sectores se encuentran confinados. En el sector de Pati, se observa que gran parte de estas surgencias originan numerosos manantiales que forman varias hectáreas de bofedales (foto 2). La parte superior de esta formación donde coincide con estratos impermeables se comporta también como condicionante de la surgencia de manantiales que proviene de acuíferos ubicados por encima de la Formación Capillune, ejemplo: lavas andesíticas totalmente fisuradas del Grupo Barroso.

Acuífero Barroso

El Grupo Barroso agrupa a varios estratos volcánicos del plioceno reciente, formados principalmente por lavas andesíticas gris oscuras. En varios sectores se encuentran coronando la parte superior y los flancos de las estructu-

ras volcánicas, en muchos sectores sobreyace a las tobas blancas del Grupo Maure. Estas lavas andesíticas tienen predominancia de fracturas verticales posiblemente formadas por enfriamiento y que coinciden con la dirección de emplazamiento de las lavas, estas fracturas son las que albergan las aguas subterráneas y condicionan la dirección de flujo de las aguas subterráneas. El modelo hidrogeológico conceptual del acuífero Barroso se inicia con la alimentación que recibe de la precipitación pluvial, infiltra en sus fracturas, circula en dirección vertical y surgen a la superficie en contacto con tobas o materiales impermeables del Acuífero Capillune.

Modelos hidrogeológicos esquemáticos

Considerando el esquema permeable e impermeable de las rocas volcánicas se tiene los siguientes modelos hidrogeológicos conceptuales (véase Gráficos 1 y 2).

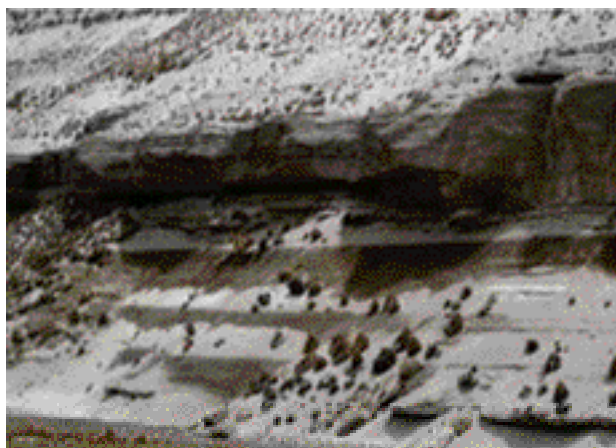


Foto 1. Estratos horizontales a subhorizontales de la formación Capillune, evidenciando los niveles saturados de aguas subterráneas y los niveles impermeables.

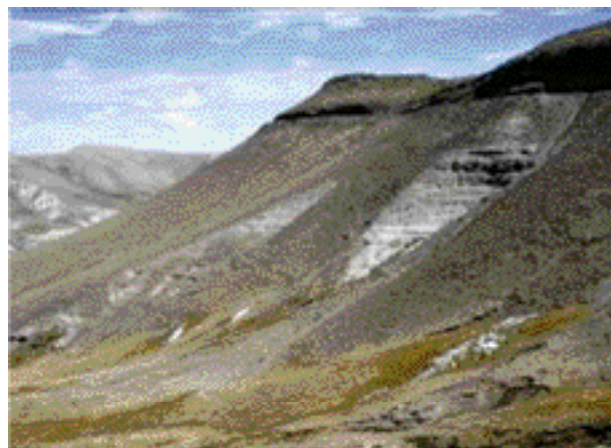


Foto 2. Surgencias o manantiales en el acuífero multicapa de la formación Capillune originando bofedales, sector Pati.

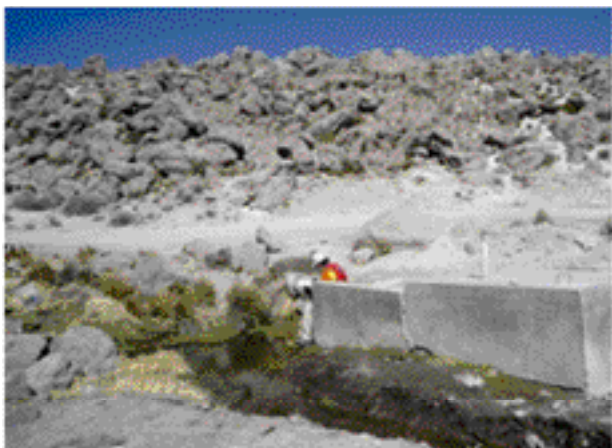
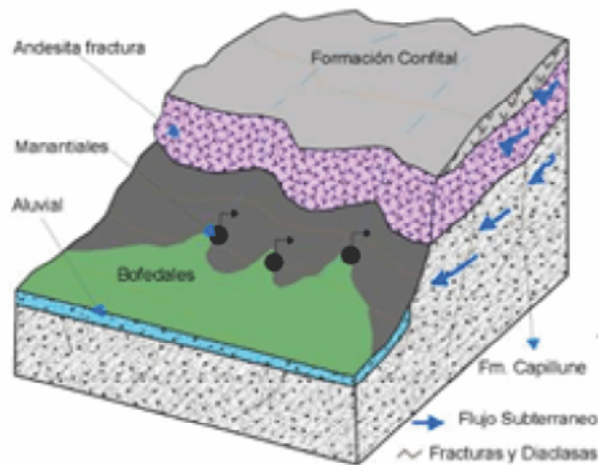
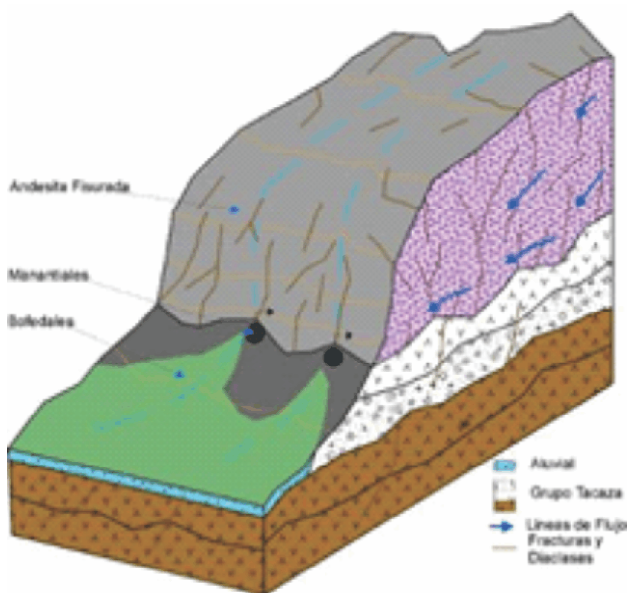


Foto 3. Manantiales que surgen entre el contacto de las lavas andesíticas del Grupo Barroso en contacto con cenizas impermeables.

Hidroquímica de los acuíferos

Según el diagrama de Piper (Gráfico 3), las aguas subterráneas procedentes de las rocas volcánicas son bicarbonatadas sódicas y bicarbonatadas cálcicas, que representan a aguas dulces de poca profundidad y corto periodos de circulación. Según las evolución hidroquímica (Cl+SO₄ vs Na+K (meq/l) de flujos (Mifflin, 1988 en Ángeles *et al.* 2004), muestran aguas de recorridos locales y algunos manantiales de flujos intermedios, considerando que la mayoría de las surgencias están por encima de los 3 500 msnm, se tiene una zona de recarga entre los 3,500 y más de 5,000 msnm.



Gráficos 1 y 2. Modelos hidrogeológicos esquemáticos.

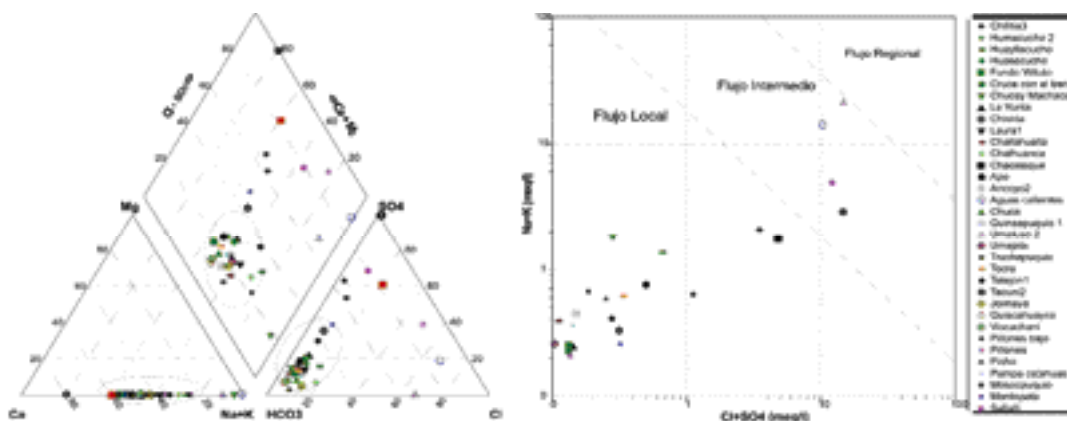


Gráfico 3. Manantiales que surgen entre el contacto de las lavas andesíticas del Grupo Barroso en contacto con cenizas impermeables.

Conclusiones

- ◆ Los acuíferos Maure y Capillune son del tipo confinado, el acuífero Barroso es del tipo libre. Estos acuíferos, por su extensión, tienen condiciones para albergar acuíferos regionales, los cuales pueden ser una gran alternativa para la solución de la falta de recursos de aguas subterráneas en la ciudad de Arequipa.
- ◆ La interacción volcánico fisurado-volcánico tobaceos ignimbriticos, condiciona la circulación del agua subterránea; esto, por las estructuras internas de la roca, ya sea por las fracturas y/o diaclasas o porosas. Los materiales finos, como las tobas del Taca o cenizas del Capillune constituyen substratos impermeables que permiten la surgencia de aguas subterráneas a través de manantiales de gran caudal.
- ◆ Se recomienda estudios más detallados (geofísica) para determinar las reservas probables de aguas subterráneas en las rocas volcánicas, además de la elaboración de modelos matemáticos en base a los cálculos de parámetros hidrogeológicos.

Referencias

- ÁNGELES S.; ROSALES L. y RAMOS J. (2004). *Características de flujos regionales y su manifestación: tres casos en México*. México: Instituto de Geografía de México.
- BERNEX N., et al. (2004). *Amanecer en el bajo Huatanay: diagnóstico de recursos naturales del valle de Cusco*, 551 pp. Lima: C. E. C. Guamán Poma de Ayala.
- CUSTODIO E. y LLAMAS M. (1996). *Hidrología subterránea*. 2a. ed., 2 t. Barcelona: Omega.
- DALMAYRAC B., LAUBACHER G. y MAROCCO R. (1988). *Características generales de la evolución geológica de los Andes peruanos*. . Boletín N.º 12, serie D. 313 pp. Lima, Perú. INGEMMET.
- PEÑA F., Cotrina G. y ACOSTA H. (2009). *Hidrogeología de la cuenca del río Caplina: Región Tacna*. Boletín N° 1, serie H: Hidrogeología, Lima Perú, 141 p. En: INGEMMET,
- PEÑA, F.; SÁNCHEZ, M. y PARI, W. (2010) *Hidrogeología de la cuenca del río Ica*. En: INGEMMET, Boletín N.º 3, serie H: Hidrogeología, 338 pp. Lima Perú: En: INGEMMET.