



Estudio geoquímico de las fuentes termales en la zona geotermal de Pinaya, Santa Lucía, Puno

Vicentina Cruz¹ y Koji Matsuda²

¹ INGEMMET, Av. Canadá 1470, Apartado 889, San Borja, Lima 41, Perú (vcruz@ingemmet.gob.pe, vcruz24@hotmail.com)

² West Japan Engineering Consultants, INC, Space Cube Bldg. 2F, 7-11,1 Chome, Haruyoshi Chuo-ku, Fukuoka, Japón (mazda@wjec.co.jp)

1. Introducción

La zona geotermal de Pinaya (ZGP) está ubicada en el Altiplano, a 3.5 km del centro poblado menor de Pinaya, distrito de Santa Lucía, provincia de Lampa, en el Departamento de Puno, a una altitud de 4400 m.s.n.m. Se extiende sobre una amplia explanada y en las laderas de la cordillera de Sillapaca, en la margen oriental del valle al norte de la Laguna Lagunillas (Fig. 1). Se puede acceder a la ZGP desde la carretera asfaltada Puno-Arequipa.

La ZGP se caracteriza por un relieve moderado a suave, con altitudes que oscilan entre los 4300 y 4700 msnm, adyacentes a montañas volcánicas. La superficie total donde emergen las aguas geotermales es aproximadamente de 3 a 4 hectáreas, con presencia de material sinterizado y alteración hidrotermal. El clima en verano es lluvioso y semifrío, y seco en invierno y primavera. La frecuencia de heladas supera los 150 días anuales. La temperatura máxima media mensual es poco variable en el año, fluctuando alrededor de 13.4 °C. La precipitación varía entre 700 y 1000 mm (www.senamhi.gob.pe). La superficie está cubierta de tierra suave; la mayor parte del área no tiene cultivos y existen zonas de pastizales y bofedales (Fig. 2).

Los objetivos del presente estudio han sido: (a) caracterizar química- e isotópicamente las manifestaciones geotérmicas superficiales de la ZGP; (b) identificar el origen del agua geotermal mediante isótopos estables (¹⁸O y ²H); y (c) estimar la temperatura de su reservorio.

El presente estudio contribuirá a la evaluación del alcance energético y utilización sostenible de los recursos geotérmicos de la zona de Pinaya, y permitirá tomar acciones para la protección de estas aguas termales.

2. Contexto geológico

La ZGP se encuentra en una región de litologías variadas que incluye afloramientos rocosos de origen sedimentario (marino y continental) y volcánico, cuyas edades van del Jurásico al Cuaternario. La sedimentación habría sido controlada por el juego intermitente del sistema de fallas Cusco-Lagunillas, de dirección NO-SE (Fig. 1), durante períodos extensionales (Carlotto, 2013). La sucesión estratigráfica ha sido intruida por dioritas y monzonitas, y posteriormente recubierta por los estratos volcánicos del Grupo Tacaza (McCrea, 2006).

La composición de las rocas alrededor de la ZGP es algo félsica, con cuarzo, micas, y plagioclasas. La abundancia de rocas volcánicas lávicas y piroclásticas en la zona resulta de la actividad eruptiva desarrollada entre ~13 y ~10 Ma en relación con el arco magmático Sillapaca (Aguilar, 2012) de composición mayormente andesítica y dacítica. En el área, el Grupo Sillapaca descansa concordante sobre el Grupo Palca, que descansa en discordancia angular sobre el Grupo Tacaza.

Asimismo, la zona geotermal de Pinaya se encuentra ubicada dentro del cinturón de pórfidos Andahuaylas-Yauri, que se extiende sobre 300 km de largo conformando una extensión del cinturón de pórfidos de cobre del Norte de Chile. En el área existieron procesos de alteración hidrotermal y mineralización, posiblemente asociados a la interacción de fluidos hidrotermales con las rocas originales, a una temperatura, presión y duración conveniente para alcanzar un equilibrio termodinámico entre la roca y el fluido, formando asociaciones de minerales como los que existen en los pórfidos de Cu-Au. Alrededor de la zona se observan afloramientos de rocas intrusivas del Eoceno-Oligoceno con abundante

mineralización, asociados a pórfidos-skarns de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe.

Las fuentes termales emergen en la superficie en depósitos coluviales cuaternarios que incluyen gravas y bloques subangulosos con matriz de arena y limo.

Asimismo, en los alrededores se observa la presencia de depósitos morrénicos, con fragmentos de rocas que son angulosos a subangulosos, con diámetro variable. Existen también depósitos de bofedal con intercalación de limos, arenas, y niveles orgánicos (Fig. 2).

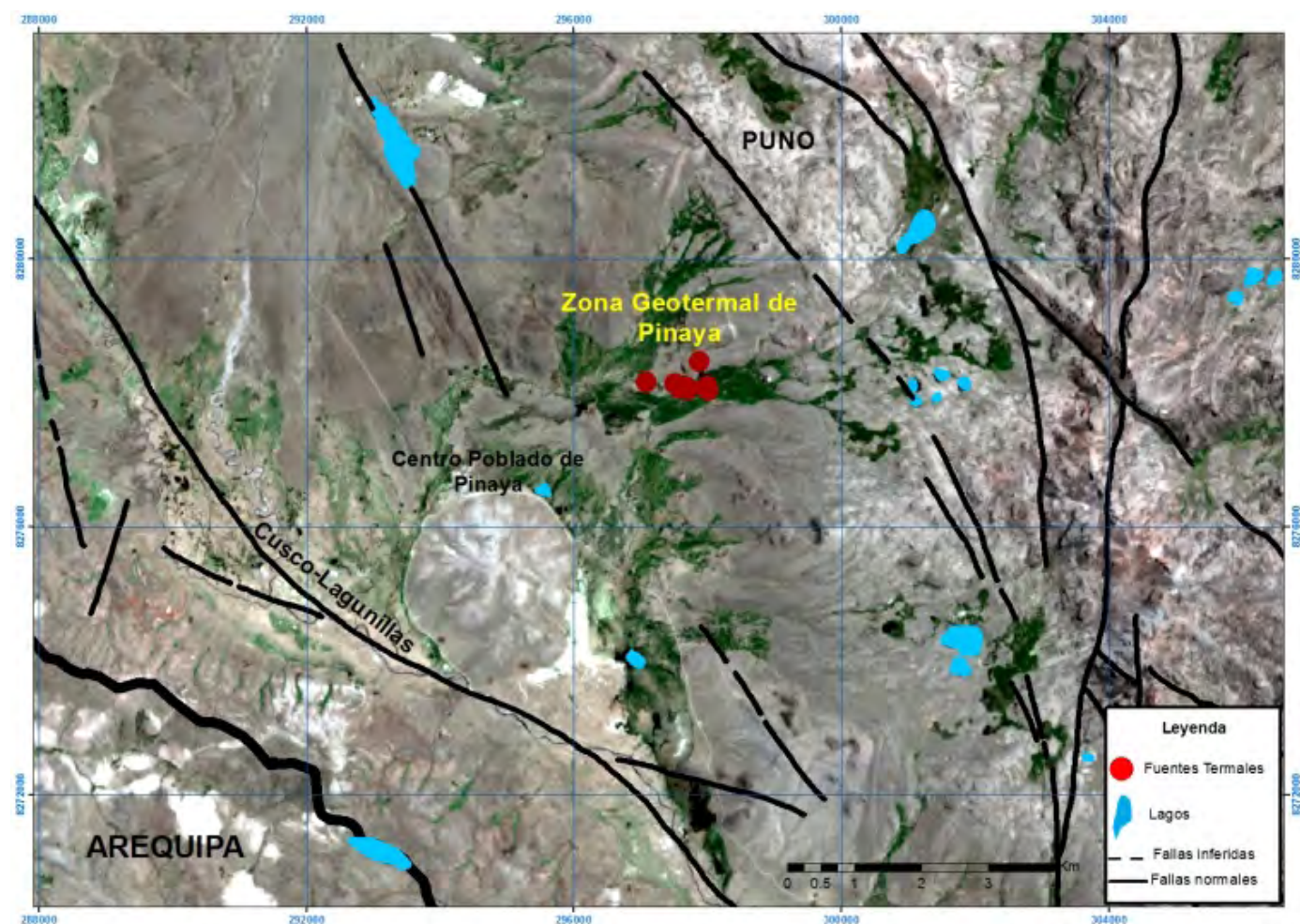


Figura 1. Mapa de localización de fuentes termales de la zona geotermal de Pinaya.

3. Muestreo y técnicas analíticas

El muestreo de las fuentes termales fue llevado a cabo en el año 2010. Un total de 9 fuentes de agua fueron muestreadas en botellas de plástico de alta densidad. Se colectaron 3 muestras: una para el análisis de cationes disueltos (Li, Na, K, Ca, Mg, B, Si), que fue previamente filtrada a través de una membrana de poro 0.45 μm (filtro Millipore), y luego acidificada con HNO_3 ultra puro; una segunda muestra se tomó sin la adición de ácido, para determinar aniones (Cl , F , SO_4 , y HCO_3); y una tercera para determinar la composición isotópica. Estas muestras han permitido establecer una base para explicar la química del agua termal.

Las temperaturas de salida ($\pm 0.1^\circ\text{C}$), pH (± 0.1 unidades), y la conductividad eléctrica se determinaron en el campo usando un instrumento multiparamétrico (WTW 340i). Se analizaron muestras de agua en laboratorios certificados y acreditados de Perú y Japón. Los análisis de

$\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ fueron realizados por espectrometría de masa (IRMS-MAT 252) y espectroscopia láser (*cavity ring spectroscopy*) LWIA-LGR del laboratorio de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN).

Los análisis realizados fueron los siguientes: (1) metales disueltos (Li, Na, K, Ca, Mg, B, As, Si) por ICP-MS; (2) F, Cl, SO_4 , por cromatografía iónica, utilizando un cromatógrafo iónico Dionex ICS-2000; (3) SiO_2 , por el método *molybdosilicate*; (4) HCO_3 se analizó volumétricamente por valoración con HCl 0.1 N.

La exactitud y la precisión de las medidas se calcularon mediante el análisis de materiales de referencia certificados y mediante la realización de varios duplicados y diluciones de las muestras. Consideramos que los errores analíticos en el análisis de las muestras son menores a 5%, siendo aceptables para la interpretación hidroquímica.

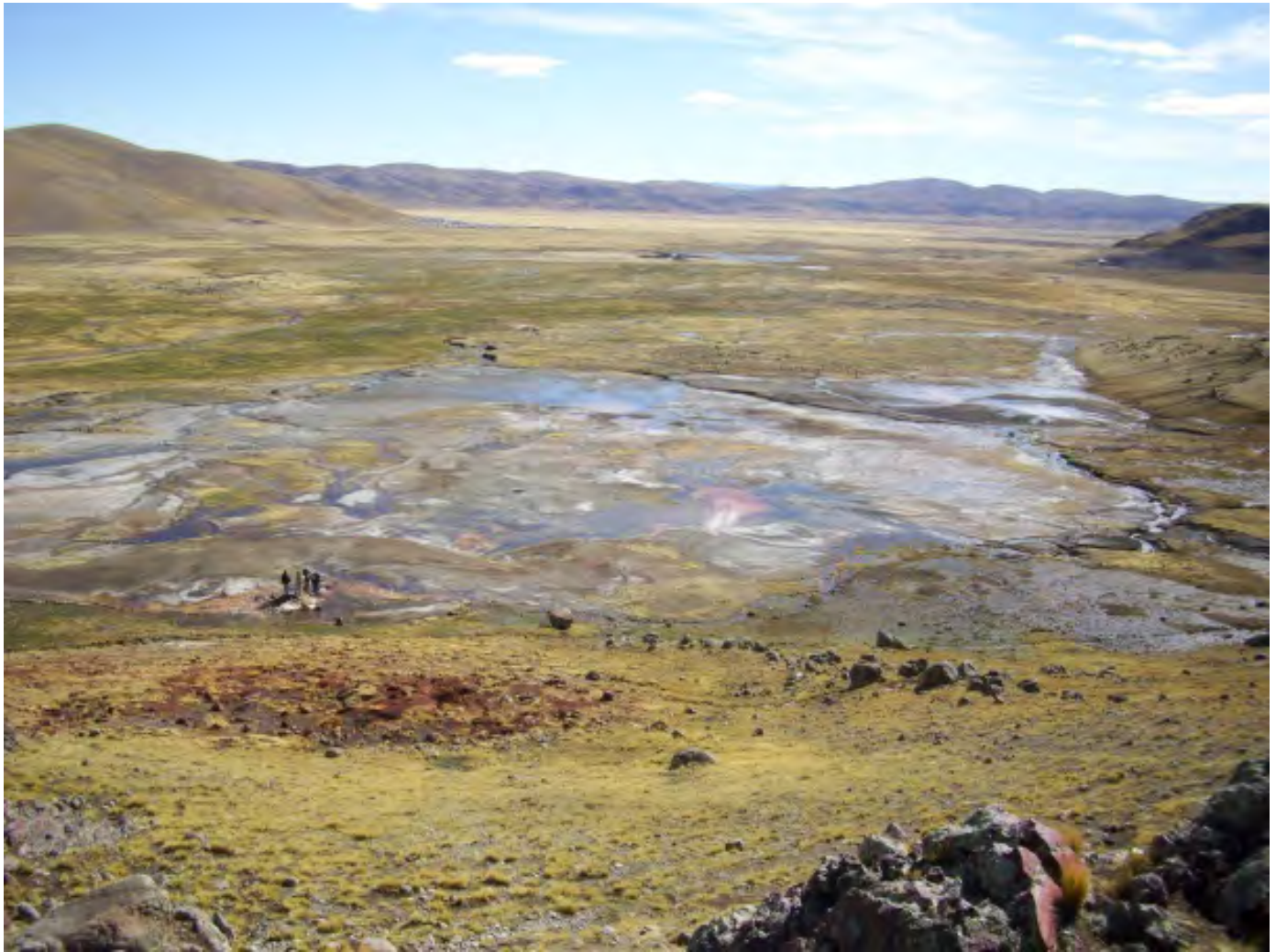


Figura 2. Vista panorámica de la zona geotermal de Pinaya.

4. Resultados y discusión

La temperatura de las fuentes termales varió entre 60 y hasta 83 °C, y el pH entre 6 y 7, con valores de conductividad eléctrica entre 14.8 y 15.98 mS/cm.

Las manifestaciones termales tienen valores de descarga entre 30 y 60 L/mn, haciendo un valor total aproximado de todas las descargas de 300 L/mn (Tabla 1).

La composición química presenta iones mayoritarios de cloruro y sulfato, con valores desde 1610 mg/L a 5508 mg/L, y de 310 mg/L a 1153 mg/L, respectivamente; así como sodio con concentraciones desde 1130 mg/L a 3784 mg/L; y calcio desde 116 mg/L hasta 366 mg/L, respectivamente (Tabla 1).

4.1. Clasificación de las aguas termales

Los resultados analíticos de las aguas provenientes del sistema geotermal de Pinaya han sido graficados en el diagrama de clasificación de Langelier-Ludwig (1942; Fig. 3). En este diagrama se observa que la mayoría de las aguas geotermales corresponden al tipo sulfato-clorurado sódico, considerado como de aguas provenientes de

niveles profundos, que se originan en sistemas de alta entalpía (Nicholson, 1993). Las aguas recolectadas del río y un manantial cerca a la fuentes termales son del tipo bicarbonatado alcalino-terreo.

Según el contenido relativo de Cl, SO₄ y HCO₃ se realizó la clasificación de las aguas geotermales mediante el uso del diagrama ternario propuesto por Giggenbach (1988), agrupando a las aguas de la ZGP dentro de las aguas cloruradas con una ligera tendencia hacia la línea sulfatada (Fig. 4). Esto indicaría que estas aguas son alimentadas desde un reservorio profundo, típico de fluidos asociados a sistemas geotérmicos de alta temperatura. Sin embargo, durante su largo recorrido estos fluidos han interactuado con minerales sulfurados, como la pirita y calcopirita, y con otros minerales sulfatados asociados a procesos de alteración hidrotermal, recargando de azufre a la componente del agua como SO₄.

El agua de manantial y del río Pinaya se ubican en el diagrama ternario en el campo de las aguas bicarbonatadas o periféricas, característico de aguas superficiales.

Tabla 1. Composición química (mg/l) de las manifestaciones geotermales en la ZGP.

Fuente	Código	Temp °C	pH	Cond $\mu\text{S/cm}$	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Cl mg/L	F mg/L	SO ₄ mg/L	HCO ₃ mg/L	B mg/L	SiO ₂ mg/L	As mg/L	Sr mg/L	¹⁸ O ‰	² H ‰
Río Pinaya (rio arriba)	RPA	4.1	7.17	47	-	3	2	3	1	-	-	6	18	-	31	-	-	-	-
Agua manantial	AGM	9.4	7.02	44	-	3	3	3	1	-	-	7	17	-	27	-	-	-	-
Pinaya I	PIN-I	80.3	6.14	15860	7	3784	225	366	35	5247	3	1044	207	18	86	3	14	-	-
Pinaya II	PIN-II	83.8	6.50	15350	8	3780	219	350	34	5328	3	987	228	18	90	4	15	-	-
Pinaya III	PIN-III	75.5	6.42	14800	7	3513	151	298	26	4996	3	999	205	18	72	3	14	-	-
Pinaya IV	PIN-IV	65.1	7.07	15980	8	3783	216	358	37	5508	3	1153	237	18	81	4	16	-	-
Río Pinaya (rio abajo)	RPL	19.4	8.47	5880	2	1130	68	116	12	1610	1	310	84	10	46	1	5	-	-
Pinaya 6	PIN6	83.3	7.02	15650	8	3260	187	322	30	5254	-	888	211	17	79	-	-	-18	-133
Pinaya 8	PIN8	81.0	6.69	15440	7	3133	190	322	31	5147	-	995	156	17	104	-	-	-	-

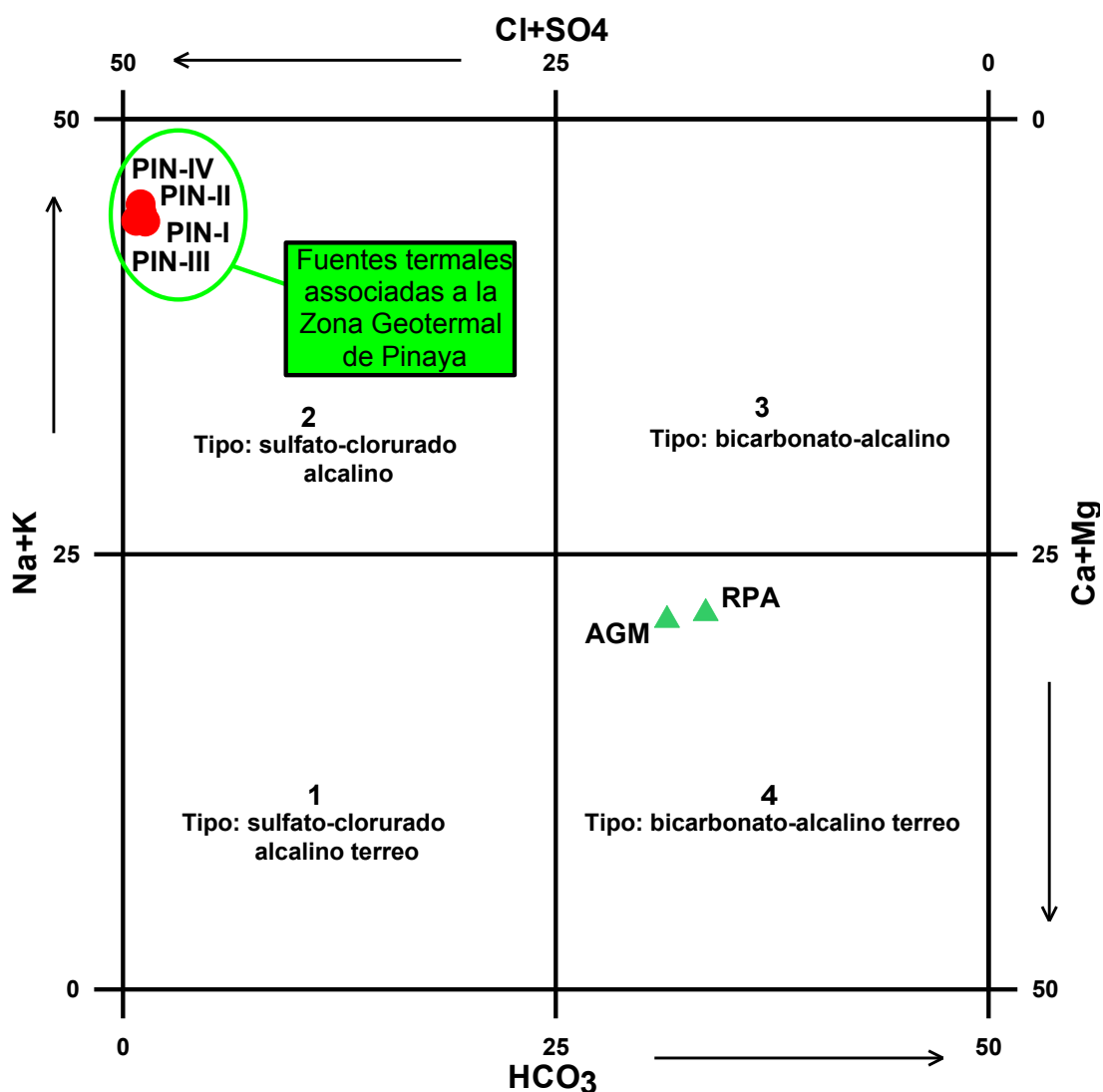


Figura 3. Ploteo de las aguas termales de la ZGP en un diagrama de Langelier-Ludwig (1942).

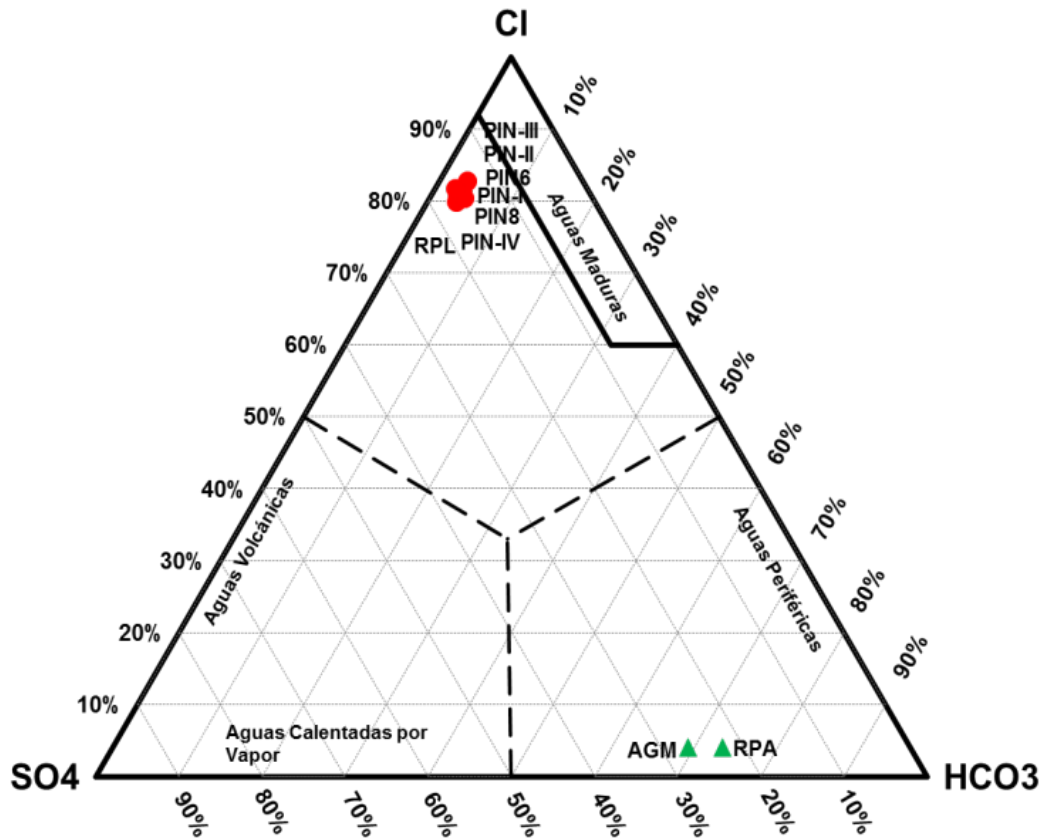


Figura 4. Ploteo de las aguas termales de la ZGP en el diagrama ternario de Giggenbach (1988).

4.2. Trazadores químicos

Cl, B, Li, Rb, y Cs son elementos trazas químicamente inertes, que al ser agregados a la fase líquida no son alterados, por lo que permiten conocer el origen de las aguas en cuya composición contienen estos elementos. El litio es el metal alcalino menos afectado por procesos secundarios. Por lo tanto, se utiliza como marcador para el proceso inicial de la disolución de la roca de profundidad y para evaluar el posible origen de dos importantes componentes conservadores de agua geotérmica. El contenido de boro en los fluidos geotérmicos refleja el grado de madurez del sistema geotérmico.

El diagrama ternario de Cl-Li-B (Fig. 5; Giggenbach, 1991) muestra que las aguas termales del área de estudio tienen predominio de la especie clorurada, seguido de litio y boro, por lo que se ubican cerca al vértice de Cl y a la línea Li-Cl, lo que indicaría que estas aguas están asociadas a sistemas hidrotermales antiguos: posiblemente los fluidos migran desde rocas viejas del basamento. La relación B/Cl es de 0.01 para todas las aguas en estudio, lo que indica que las aguas de la zona geotermal de Pinaya provienen de un mismo reservorio y circulan por las mismas litologías hasta emerger en superficie (Nicholson, 1983).

En el diagrama binario B-Cl (Fig. 6), se observa que la proporción de B/Cl (0.01) es baja, lo que es típico de aguas que están interaccionando con rocas subvolcánicas o graníticas, a nivel profundo. En la ZGP se observa afloramientos de rocas intrusivas del Eoceno-Oligoceno, asociados a la presencia de pórfidos-skarns de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe. Por lo que podemos inferir

que el reservorio geotérmico se estaría desarrollando sobre y alrededor de un cuerpo intrusivo asociado posiblemente al complejo intrusivo Pinaya.

En cuanto a la circulación de fluidos en este entorno, posiblemente se estén mezclando fluidos magmáticos altamente salinos, que tienen un tiempo de residencia considerable, con fluidos de origen meteórico de etapas posteriores, los mismos que emergen en superficie por la zona permeable asociada al sistema de fallas Cusco-Lagunillas de dirección NO-SE.

4.3. Geoindicador de Na-K-Mg

Mediante el diagrama ternario se realizó la evaluación de los datos analíticos de Na, K y Mg (Giggenbach, 1991). La Figura 6 permite observar que las aguas en estudio se ubican en el área de equilibrio químico parcial entre agua y roca, lo que es característico de aguas provenientes de reservorios geotérmicos. Sin embargo, la temperatura de equilibrio Na-K del reservorio se estima por debajo de 200°C (Fig. 7). Este dato sugiere que en el reservorio se produce una mezcla entre fluidos geotérmicos con una mayor proporción de agua meteórica, que ingresa desde los alrededores de las rocas intrusivas aflorando en la zona.

La Figura 8 muestra el gráfico del geoindicador $10Mg/(10Mg+Ca)$ vs. $10K/(10K+Na)$. Se observa una curva que representa el contenido relativo de los cationes de aguas geotérmicas en equilibrio total, donde se observa que las muestras de agua presentan una tendencia hacia la línea de equilibrio agua-roca expuesto a temperaturas por debajo de los 200°C.

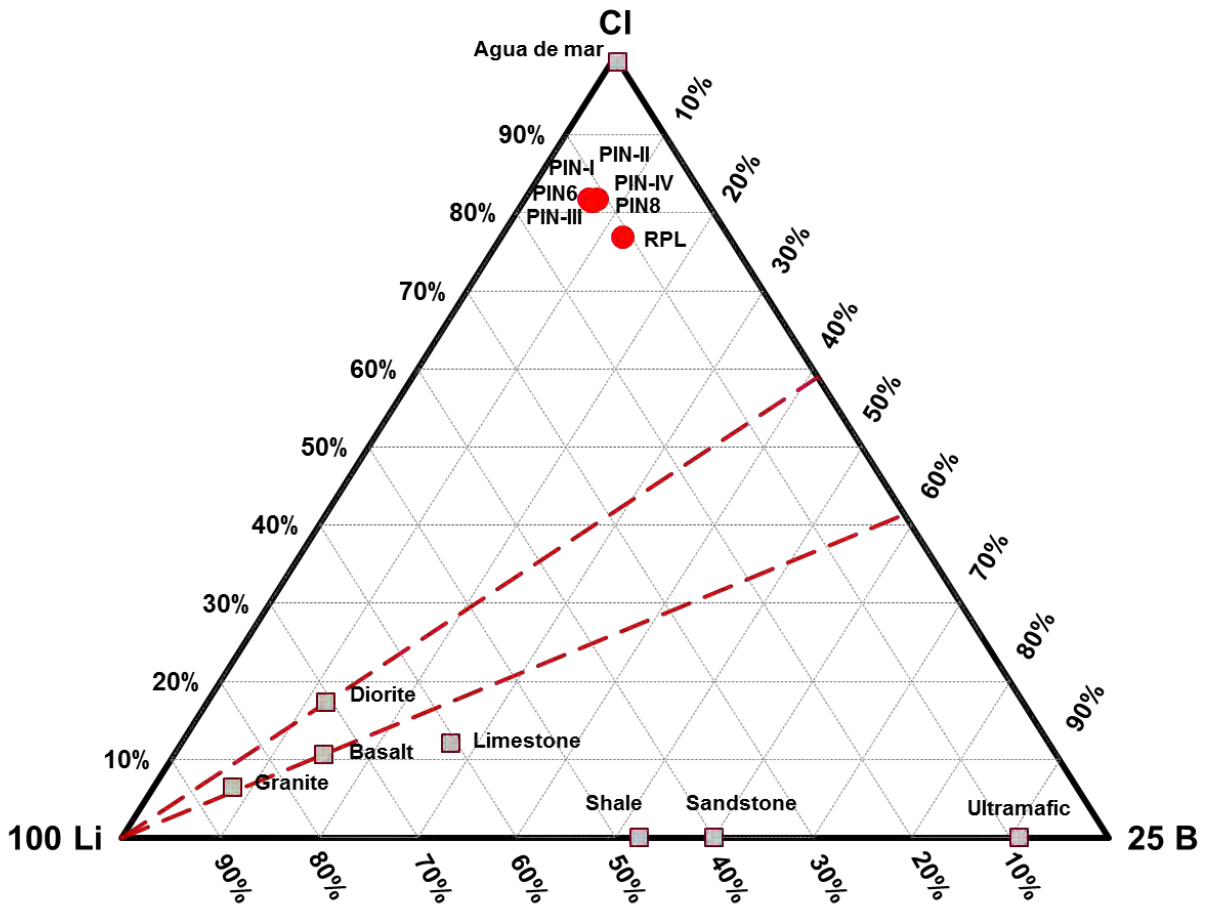


Figura 5. Ploteo de las aguas termales de la ZGP en el diagrama ternario Cl-Li-B.

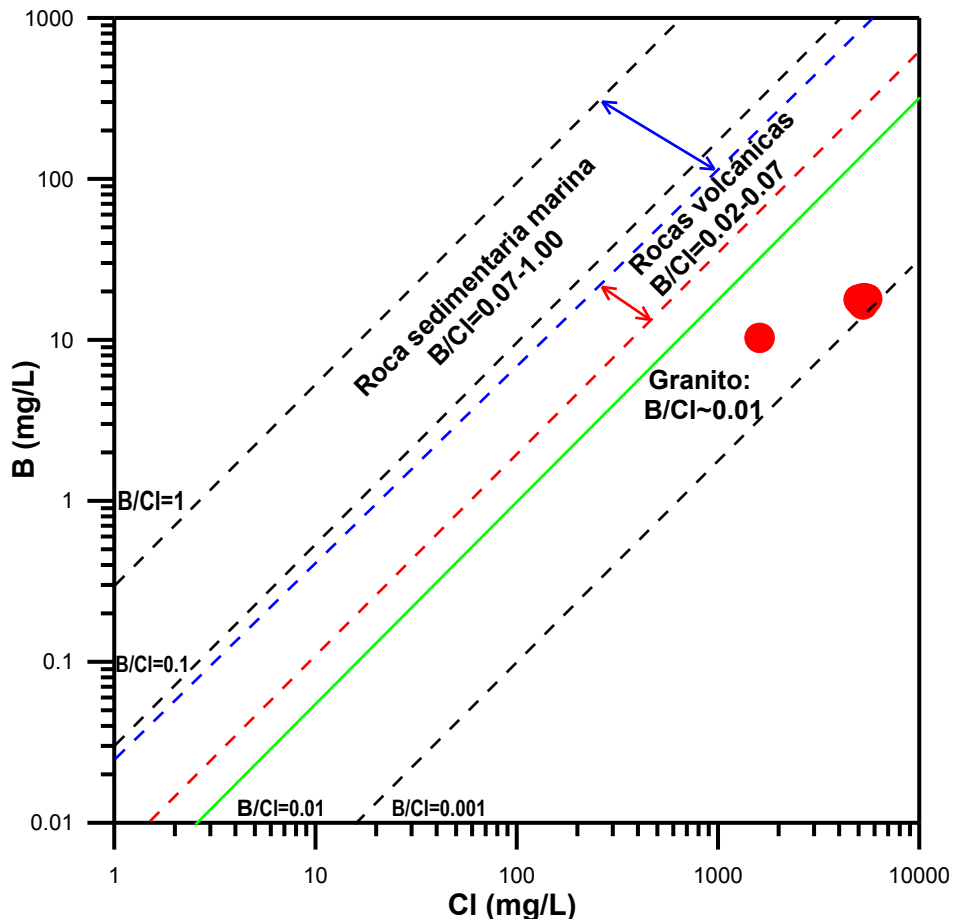


Figura 6. Ploteo de las aguas termales de la ZGP en el diagrama boro vs. cloro de Shigeno & Abe (1983).

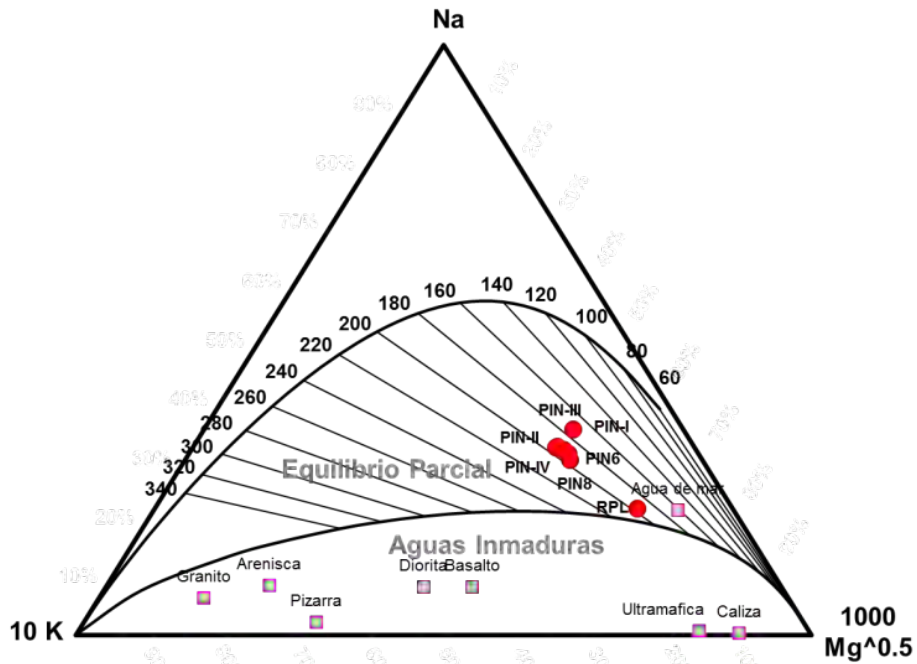


Figura 7. Ploteo de las aguas termales de la ZGP en el diagrama ternario de Giggenbach (1991).

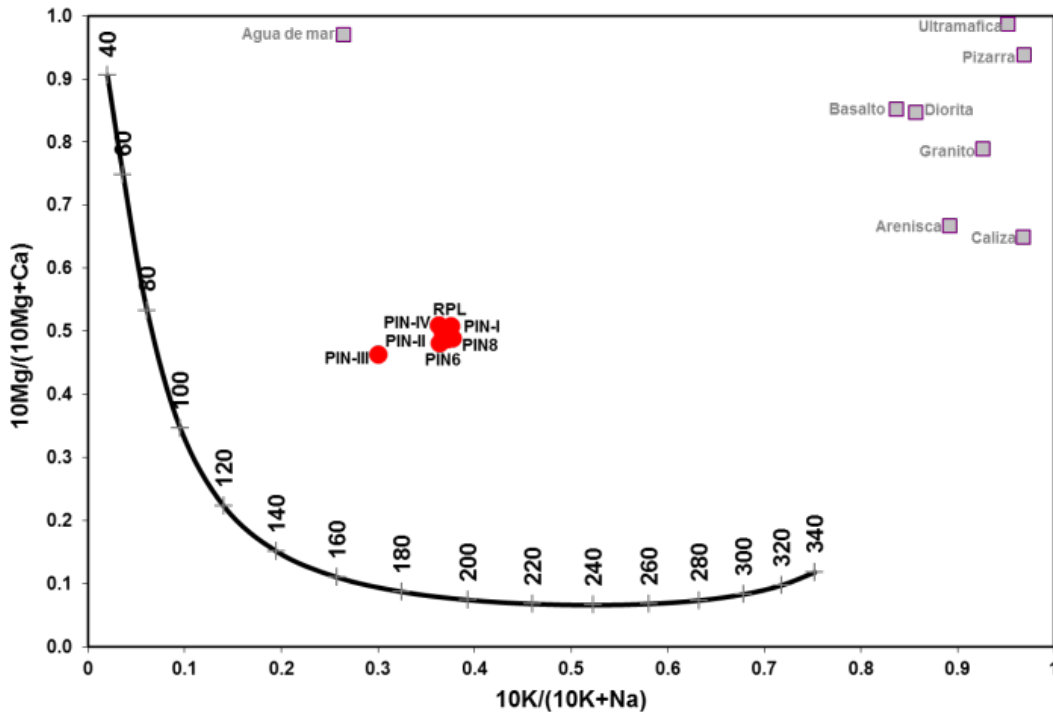


Figura 8. Ploteo de las aguas termales de la ZGP en el diagrama Na-K-Ca-Mg de Giggenbach (1988).

4.4. Modelo de mezcla

La Figura 9 muestra el modelo de mezcla sílice-entalpía. Una línea recta que pasa por los puntos de datos y extrapolada hasta que corte la curva de solubilidad del cuarzo, dando una temperatura de 148°C para la mayoría de las fuentes, siendo esta temperaturas ligeramente superiores a las estimadas por el geotermómetro del cuarzo. Esto indica que la mayoría de las aguas termales probablemente se estén mezclando con aguas más frías en el reservorio, o puede ser debido al enfriamiento conductivo que tuvo lugar durante el flujo ascendente de

las aguas termales.

4.5. Resultado isotópico

La grafica $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 10) muestra que las aguas en la ZGP se localizan muy cerca de la línea meteórica local (Cortecci et al., 2005), lo que indicaría que el agua geotérmica del reservorio en la zona de Pinaya se origina de agua meteórica que se calienta por calor conductivo relacionado a alguna fuente de calor magmático de la zona, posiblemente relacionada con el complejo volcánico Sillapaca.

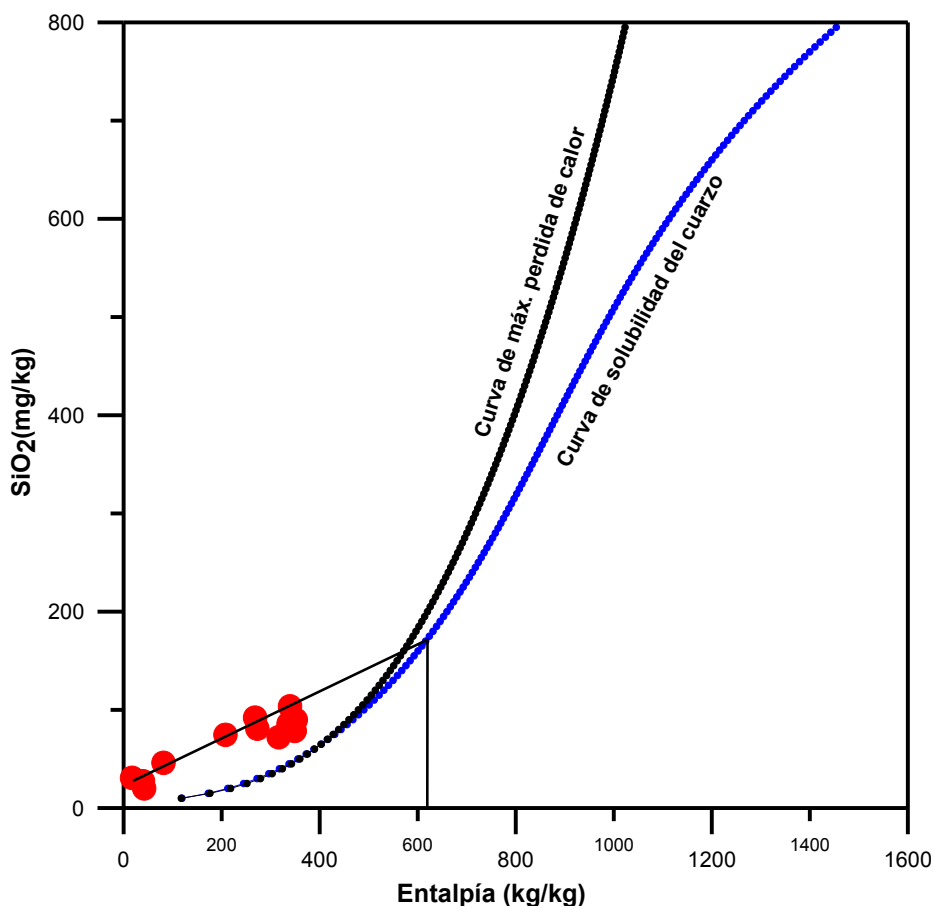


Figura 9. Ploteo de las aguas termales de la ZGP en el diagrama SiO₂ vs. entalpía.

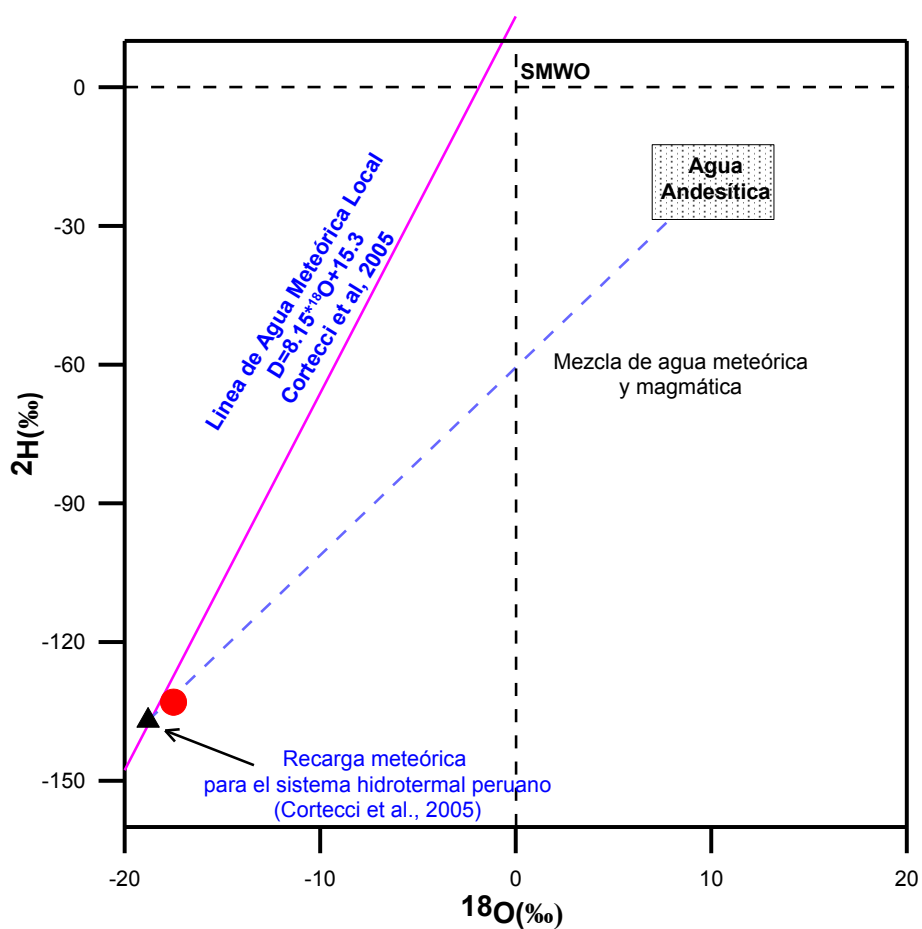


Figura 10. Ploteo de las aguas termales de la ZGP en el diagrama δ²H vs. δ¹⁸O.

5. Modelo conceptual

El modelo conceptual del sistema geotérmico de la zona geotermal de Pinaya se muestra en la Figura 11. De acuerdo a los resultados geológicos y químicos y la interpretación geoquímica, se puede inferir que la fuente de calor magmática en este área estaría relacionada a la existencia de la cadena de volcanes activos que conforma la Cordillera Occidental de los Andes en el sur del Perú. Estos volcanes tienen centros volcánicos que involucran altos flujos de energía (e.g., Kono et al., 1989). La fuente de calor y energía del sistema geotérmico de Pinaya estaría asociado al calor conductivo de los materiales magmáticos situados a niveles profundos o al calor conductivo de las rocas de intrusión.

La estratigrafía, las estructuras geológicas, y la distribución de las manifestaciones termales en la zona geotérmica de Pinaya parecen indicar que los fluidos geotérmicos están controlados por zonas permeables relacionadas al sistema de fallas Cusco-Lagunillas de dirección NO-SE y las fallas de tendencia NE-SO inferidas de los lineamientos topográficos.

La química isotópica $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del agua de Pinaya deduce que el agua geotérmica del reservorio en la zona se estaría originando básicamente de agua meteórica, que se infiltra a niveles profundos provenientes de las partes

altas de las montañas hasta las zonas próximas al calentamiento por conducción. Durante su trayecto lateral por estratos permeables como los estratos sedimentarios del Paleógeno, que consisten de conglomerados y arenas, el fluido geotérmico se mezcla con aguas cloruradas y salinas y asciende por las zonas permeables verticales relacionadas con las fallas de tendencia de NO-SE y NE-SO, encontrando a su paso zonas con rocas impermeables que permiten la formación de reservorios para su almacenamiento, de donde asciende luego a través de fracturas o fallas para emerger en superficie como fuentes termales.

Los geotermómetros aplicados a las aguas de los manantiales de Pinaya permiten estimar que la temperatura del reservorio llegaría a 180 °C, lo que indicaría que, al ascender el agua caliente a un nivel poco profundo, es diluida y enfriada con agua fría superficial o del río, y continua su ascenso para descargarse en superficie en la zona de Pinaya.

El bajo contenido de boro en las fuentes termales se debe al largo recorrido lateral del fluido termal por un tiempo bastante prolongado a través de las rocas circundantes, donde el boro es atrapado por absorción en las arcillas durante este recorrido.

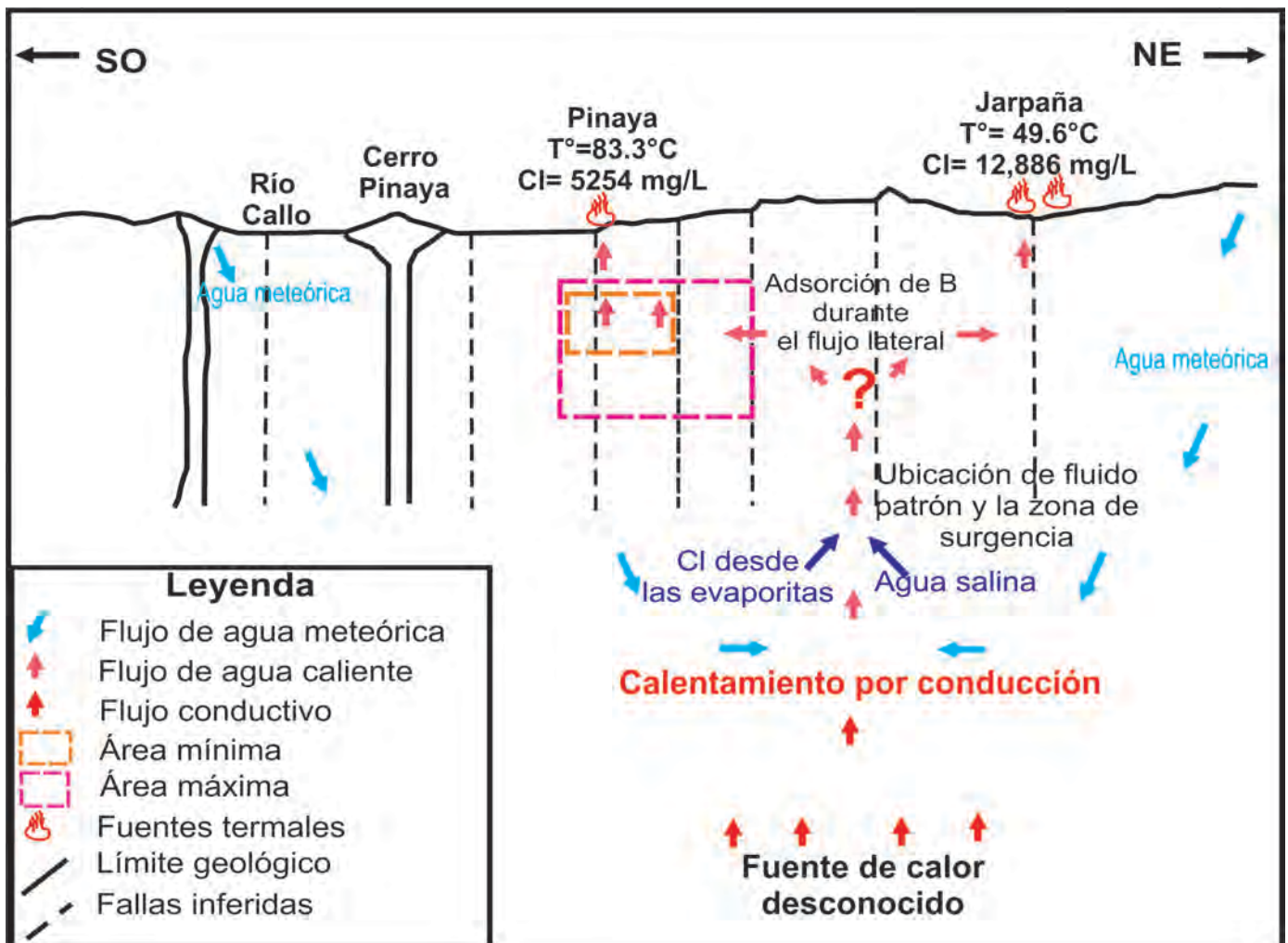


Figura 11. Modelo conceptual para la zona geotermal de Pinaya.

6. Conclusiones

La caracterización geoquímica de las aguas termales de la zona geotermal de Pinaya indica que estas aguas son de tipo clorurado-sulfatado-alcálico.

El reservorio geotérmico posiblemente se encuentra sobre y alrededor de un cuerpo intrusivo asociado al complejo intrusivo Pinaya, controlado por el sistema de fallas Cusco-Lagunillas de dirección NO-SE.

La geotermometría química en fase líquida y el modelo de mezcla, permite estimar que las temperaturas en profundidad son menores a 200°C.

Mediante los parámetros $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, los isótopos estables indican que las aguas termales se originan por una mezcla entre agua meteórica y agua magmática, siendo el principal componente el agua meteórica.

Por lo tanto, el recurso que se presenta en la zona geotermal de Pinaya puede ser utilizado para generación de energía geotérmica en una planta de ciclo binario, y para usos directos como la balneología, calefacción, acuicultura, etc., por lo cual se sugiere ampliar los estudios.

Referencias

- Aguilar, R. 2012. Magmatismo, tectónica y metalogenia de los centros volcánicos miocénicos entre Condoroma y Paratia (Cusco, Puno), Sur del Perú. Tesis profesional, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú.
- Carlotto, V. 2013. Paleogeographic and tectonic controls on the evolution of Cenozoic basins in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru. *Tectonophysics*, v. 589, p. 195-219.
- Cortecchi, G., Boschetti, T., Mussi, M., Lameli, C.H., Mucchino, C., Barbieri, M. 2005. New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, Northern Chile. *Geochemical Journal*, v. 39, p. 547-571.
- Giggenbach, W.F. 1988. Geothermal solute equilibria: Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica Cosmochimica Acta*, v. 52, p. 2749-2765.
- Giggenbach, W.F. 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. In: D'Amore, F. (ed.), *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development*. UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Rome, Italy, p. 119-144.
- Kono, M., Fukao, Y., Yamamoto, A. 1989. Mountain building in the Central Andes. *Journal of Geophysical Research*, v. 94, p. 3891-3905.
- Langelier, W.F., Ludwig, H.F. 1942. Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters. *Journal of the American Water Works Association*, v. 34, p. 335-352.
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*. Berlin, Springer-Verlag, 278 p.
- McCrea, J. 2006. Technical report on the Pinaya gold-copper property, south-central Peru. Acero-Martin Exploration Inc., 46 p.
- Shigeno, H., Abe, K. 1983. B-Cl geochemistry applied to geothermal fluids in Japan, especially as an indicator for deep-rooted hydrothermal systems. In: *Extended abstracts, 4th International Symposium on Water-Rock Interaction*, Misasa, p. 437-440.