

ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS FUENTES TERMALES DE LA ZONA GEOTERMAL DE PINAYA, SANTA LUCIA (PUNO).

Vicentina Cruz¹, Koji Matsuda²

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

²West Japan Engineering Consultants, INC, Space cube Bldg., 2F, 7-11,1-Chome, Haruyoshi Chuo-ku, Fukuoka, Japan, 810-0003 (mazda@wjec.co.jp).

INTRODUCCIÓN

La Zona Geotermal de Pinaya (ZGP) está ubicada en el altiplano de los Andes a 3.5km del centro poblado menor de Pinaya, distrito de Santa Lucia, provincia de Lampa en el Departamento de Puno, a una altitud de 4,400 m.s.n.m. La ZGP se emplaza 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).

La ZGP comprende un relieve moderado a suave, con altitudes que oscilan entre los 4,300 a 4,700 msnm, adyacentes a montañas volcánicas. La superficie total donde emergen las aguas geotermales es aproximadamente de 3 a 4 hectáreas, con presencia de afloramientos de sinter y alteración hidrotermal. El clima en invierno es lluvioso y semifrígido, en verano y primavera seco. 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). Se observa que la temperatura máxima media mensual es poco variable en el año fluctuando alrededor de 13.4 °C. A la ZGP se puede acceder desde la carretera asfaltada Puno-Arequipa. La superficie está cubierta de tierra suave, la mayor parte del área hay solamente presencia de zonas de pastizales y bofedales (Fig. 2).

Los objetivos del presente estudio, son realizar: (a) una caracterización química e isotópica de las manifestaciones geotérmicas superficiales de la zona de estudio; (b) identificar el origen del agua geotermal utilizando isótopos estables (oxígeno-18 y deuterio); y (c) la estimación de la temperatura del reservorio.

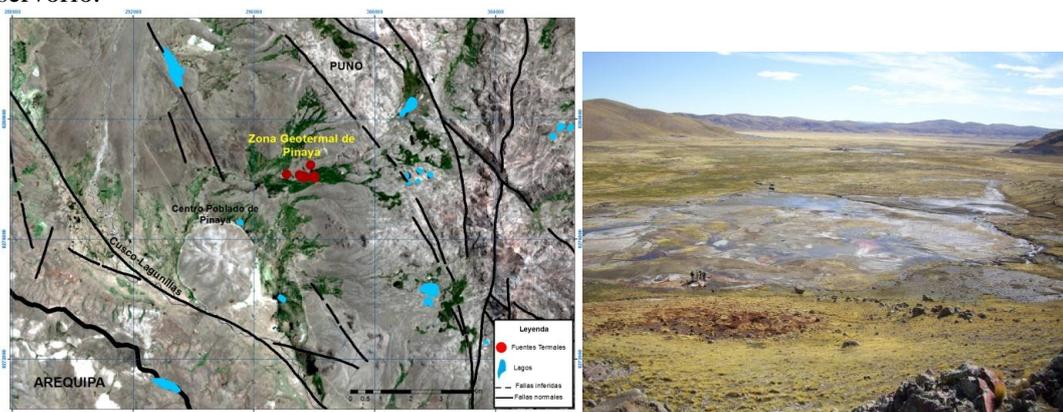


Fig. 1. Mapa de localización de fuentes termales de la ZGP. Fig. 2. Vista panorámica de la ZGP.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La ZGP se encuentra emplazado en una región de litología variada que incluye afloramientos rocosos de origen marino y continental con sedimentos volcánicos intercalados, cuyas edades van del Jurásico al Cuaternario reciente. La zona es atravesada con sistema de fallas Cusco-Lagunillas de dirección NO-SE (Carlotto, 2013) (Fig. 1) durante los períodos de extensión estructural. Esta estratigrafía ha sido invadido por las intrusiones de composición diorítica y monzoníticos, y posteriormente recubierto por el volcánico Terciario del Grupo Tacaza (McCrea, 2006).

Las rocas en la ZGP es predominante toba félsica con cuarzo, micas y plagioclasas. Además se observa la presencia de rocas volcánicas lávicas y piroclásticas en la zona, resultado de la actividad eruptiva desarrollada entre 13-10 Ma asociada al Arco Magmático Sillapaca (Aguilar, 2012) de composición andesítica y dacita, algunos de ellos están parcialmente erosionados. En el área, el Grupo

Sillapaca descansa concordante sobre el Grupo Palca, también descansa en discordancia angular sobre el Grupo Tacaza.

Las fuentes termales emergen a nivel superficial en depósitos cuaternarios coluviales con gravas y bloques subangulosas con matriz arenisca y limo. Asimismo, alrededores de estos se observa la presencia de depósitos morrénicos, de fragmentos angulosos a subangulosos, con diámetro variable en matriz, así como la presencia de depósitos de bofedal con intercalación de limos, arenas y niveles orgánicos (Fig. 2).

RESULTADOS

La temperatura de las fuentes termales varía entre 60 hasta 83 °C y el pH entre 6 a 7 con valores de conductividad eléctrica entre 14.8 y 15.98 mS/cm. Las manifestaciones tienen valores de descarga entre 30 y 60 L/min, haciendo un valor total aproximado de todas las descargas de 300 L/min (Tabla 01). Los resultados de la composición química presentan iones mayoritarios de cloruro y sulfato, con valores desde 1610 mg/l a 5508 mg/l y 310 mg/l a 1153 mg/l respectivamente; así como sodio y calcio con concentraciones de 1130 mg/l a 3784 mg/l y 116 mg/l a 366 mg/l respectivamente (Tabla 01).

Tabla 01. Composición química (mg/L) de las manifestaciones geotermales en la ZGP.

Fuente	Código	Temp °C	pH	Cond μ 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	-	-	-	-

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. 2). En este diagrama se observa, que la mayoría de las aguas geotermales corresponden al tipo sulfato-clorurada sódica, consideradas como aguas provenientes de niveles profundos, que se originan en sistemas de alta entalpía (Nicholson, 1993).

Luego, según el contenido relativo de Cl, SO₄ y HCO₃ (Giggenbach, 1988) se realizó la clasificación de las aguas geotermales, agrupando a las aguas de la ZGP dentro de las aguas cloruradas con una ligera tendencia hacia la línea sulfatada (Fig. 3). Esto indicaría que 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 rocas sulfurosas como la piritita, calcopiritita asociados a procesos de alteración hidrotermal. El agua de manantial y del río Pinaya por ser aguas superficiales, se localizan en el diagrama en el campo de las aguas bicarbonatadas ó periféricas.

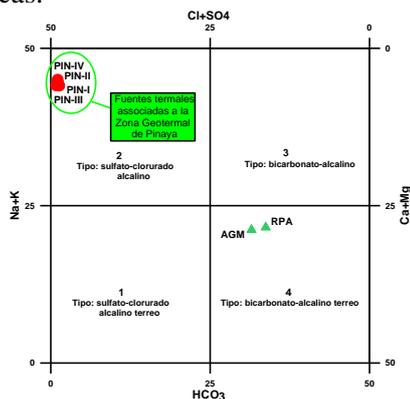


Fig. 2. Diagrama de Langelier-Ludwig

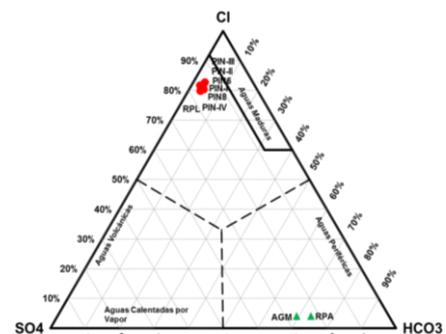


Fig. 3. Diagrama ternario (Giggenbach, 1988)

TRAZADORES QUÍMICOS

El Cl, B, Li, Rb y Cs son elementos traza 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 diagrama ternario de Cl-Li-B (Fig. 4) (Giggenbach, 1991 a) muestra que las aguas termales en el área de estudio, tienen predominio de la especie clorurada, seguido de litio y boro, por lo que se ubican cerca al vértice de Cl, lo que indicaría que estas aguas están asociadas a sistemas hidrotermales antiguos y que los fluidos migran desde la roca vieja del basamento.

En el diagrama binario B-Cl (Fig. 5) se observa que la proporción de B/Cl (0.01) es baja, típico de aguas que están interaccionando con rocas subvolcánicas o graníticas, a nivel profundo. En la ZGP se observa afloramientos de roca intrusiva del Eoceno-Oligoceno, asociados a la presencia de Pórfidos-Skarn 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. La circulación de fluidos en este entorno posiblemente se estén mezclando entre los fluidos magmáticos altamente salinos, que tienen un tiempo de residencia considerable con los fluidos de origen meteórico de etapas posteriores, las mismas que emergen en superficie favorecido por el sistema de fallas locales y regionales existentes.

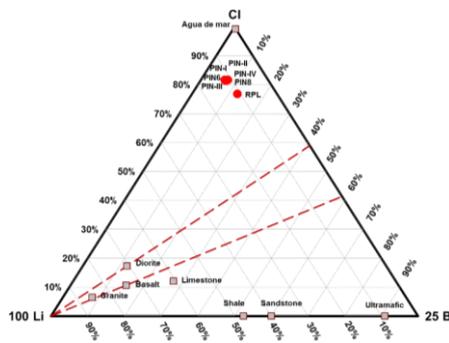


Fig. 4. Diagrama ternario Cl-Li-B.

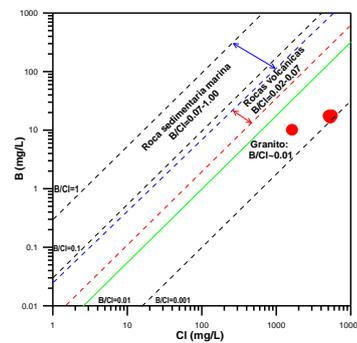


Fig. 5. Diagrama Boro vs Cloruro (Shigeno, 1983)

GEOINDICADOR DE NA-K-MG

Mediante el diagrama ternario se realizó la evaluación de los datos analíticos de Na, K y Mg (Giggenbach, 1991a) que se muestran en la figura 5, permite observar que las aguas en estudio se ubican en el área de equilibrio químico parcial agua-roca, característico de aguas provenientes de reservorios geotermales. Sin embargo, la temperatura de equilibrio Na-K del reservorio se estima por debajo de 200°C (Figs.6 y 7). Este dato sugiere que en el reservorio se produce una mezcla entre los fluidos geotérmicos con una mayor proporción de agua meteórica, que ingresa desde los alrededores de las rocas intrusivas que afloran en la zona.

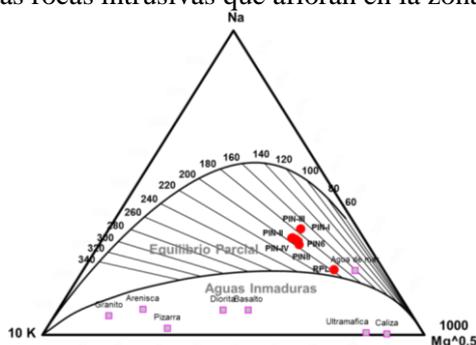


Fig.6. Diagrama ternario (Giggenbach, 1991a)

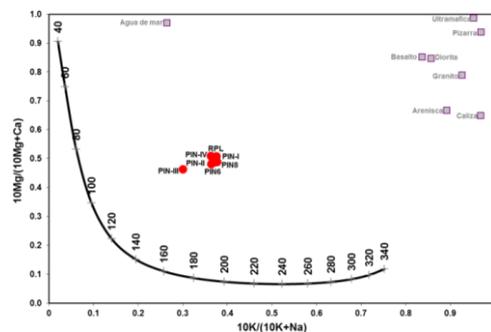


Fig. 7. Grafica Na-K-Ca-Mg (Giggenbach, 1988)

MODELO DE MEZCLA

La figura 8 muestra el modelo de mezcla sílice-entalpía. Una línea recta que pasa por los puntos de datos y extrapolada hasta que corta la curva de solubilidad de cuarzo, dando una temperatura de 148 °C para la mayoría de las fuentes, siendo ligeramente superiores a los estimados por el geotermómetro de cuarzo. Esto indica que la mayoría de las aguas termales probablemente se están 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.

RESULTADO ISOTÓPICO

La gráfica $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ (Fig. 9) muestra que las aguas en la ZGP se localizan muy cerca de la Línea Meteorica Local (Cortecci et al., 2005), lo que indicaría que esta agua se origina de la mezcla de un componente mayoritario de aguas meteóricas y una mínima contribución de fluido magmático, posiblemente asociados a un cuerpo caliente del complejo volcánico Sillapaca.

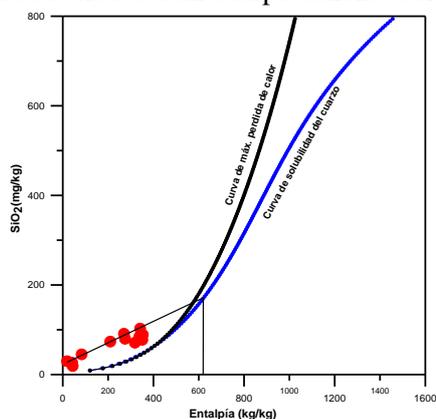


Fig. 8. SiO_2 vs Entalpia.

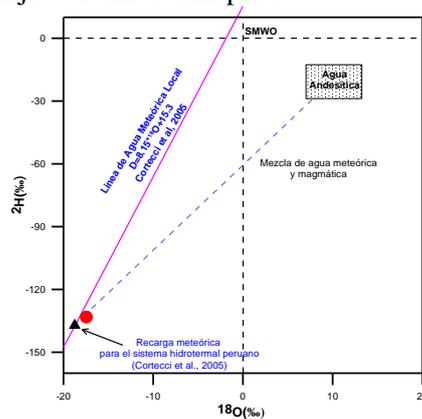


Fig. 9. $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$

CONCLUSIONES

La caracterización geoquímica de las aguas termales de la ZGP, indican que son de tipo clorurada-sulfatada- alcalina. El reservorio geotérmico posiblemente se encuentra sobre y alrededor de un cuerpo intrusivo asociado posiblemente al complejo intrusivo Pinaya controlado por el sistema de fallas Cusco-Lagunillas de dirección NO-SE. Por otro lado, la geotermometría química en fase líquida y el modelo de mezcla, permitió estimar la temperatura en profundidad menores a 200°C .

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

Por lo tanto, el recurso que se presenta en la ZGP 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

1. Aguilar, R. (2012).- Magmatismo, Tectónica y Metalogénia de los Centros Volcánicos Miocénicos entre Condorama y Paratia (Cusco-Puno) Sur del Perú, Tesis profesional, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú.
2. Carlotto, V. (2013).- Paleogeographic and tectonic controls on the evolution of Cenozoic basins in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru, *Tectonophysics*, 589 (2013) 195–219.
3. Cortecci, 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* 39: 547-571.
4. Giggenbach, W. F., (1988).- Geothermal solute equilibria; derivation of Na-K-Ma-Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2749-2765.
5. Giggenbach, W.F., (1991a).- Chemical techniques in geothermal exploration. En: D'Amore, F. (Ed.), *Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*. UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Rome, Italy, pp 119–144.
6. Langelier, W.F. & Ludwing, H.F. (1942) - Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters. *Journal of the American Water Works Association*, 34(3): 335-352.
7. Nicholson, K. (1993) - *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*. Berlin: Springer-Verlag, 278 p.
8. McCrea, J. (2006) - Technical Report on the Pinaya Gold-Copper Property, South Central Peru, 43-101 Report Prepared for Acero-Martin Exploration Inc., 46 pp plus appendices.
9. Shigeno, H. & ABE, K. (1983) - B-C1 geochemistry applied to geothermal fluids in Japan, especially as an indicator for deep-rooted hydrothermal systems. En *International Symposium on Water-Rock Interaction*, 4º, Misasa 1983. Extended Abstr. 437-440.