

## CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS FUENTES TERMALES EN LA ZONA GEOTERMAL DE BORATERAS, TACNA

Vicentina Cruz<sup>1</sup>, Victor Vargas<sup>1</sup>, Koji Matsuda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INGEMMET, Av. Canadá N° 1470, San Borja Lima 41, Perú, Apartado 889.

Email:vcruz@ingemmet.gob.pe, vvargas@ingemmet.gob.pe

<sup>2</sup>West Japan Engineering Consultants, INC, Space cube Bldg., 2F, 7-11, 1-Chome, Haruyoshi Chuo-ku, Fukuoka, Japan, 810-0003

Email: mazda@wjec.co.jp

### INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos de los estudios geoquímicos realizados en la zona geotermal de Borateras (ZGB)-Tacna, efectuados por INGEMMET y West Japan Engineering Consultants, INC. La ZGB se localiza en la Cordillera Occidental de los Andes peruanos, en la denominada franja volcánica Mio-Pliocena (Fig.1), a una altura de 4300 m.s.n.m.

La ZGB se caracteriza por la presencia de un número considerable de manifestaciones geotermales tales como fuentes termales, fuentes en ebullición y coladas de lodo, cuyas temperaturas máximas alcanzan hasta los 86°C. Las fuentes están principalmente ubicadas en tres sectores, Putina Grande, Putina Chico y a lo largo del río Maure, desde Kovire hasta Calachaca (Fig. 2). En octubre del 2007 se realizó la evaluación geoquímica de las aguas termales para la interpretación de las características químicas e isotópicas, la que ha permitido estimar la temperatura mínima en profundidad y el origen de las aguas.

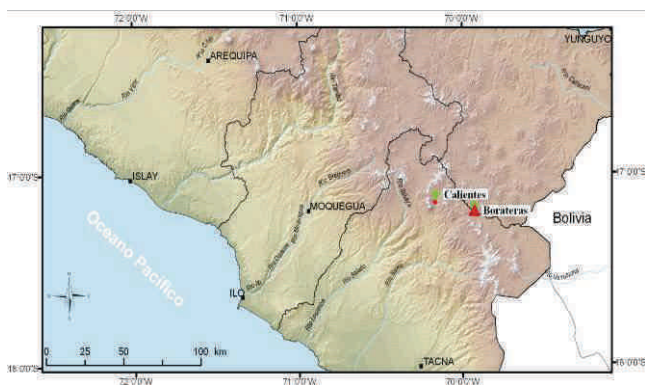


Figura 1. Mapa de localización de la zona geotermal de Borateras

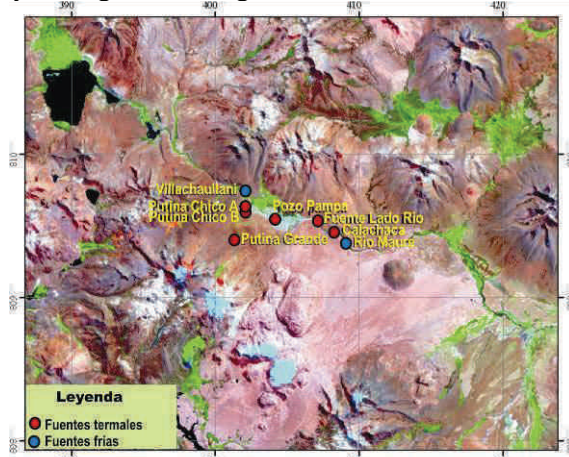


Figura 2. Mapa de localización de las fuentes termales y frías en la zona de Borateras.

### CONTEXTO GEOLÓGICO

En la ZGB se han distinguido diferentes sistemas volcánicos, destacando los centros Jaruma, Coverane y Purupuruni entre otros, donde éste último se presenta como un conjunto de domos dacíticos con 850 m de diámetro aproximado. Estos centros se encuentran alineados en dirección NW-SE y sus edades varían desde el Mioceno superior hasta el Plioceno. Entre los principales depósitos se tienen flujos piroclásticos de bloques y cenizas, en su mayoría soldados; flujos de lavas andesíticas con presencia de cristales de plagioclasas, olivinos y piroxenos. Los depósitos volcánicos en la ZGB cubren aproximadamente el 90% de toda el área. Sobre estas rocas volcánicas se han identificado depósitos holocénicos entre los cuales se tienen depósitos aluviales y coluviales conformados por acumulaciones de gravas, arenas y limos, que se encuentran rellenando cauces de quebradas. Asimismo, se ha identificado un conglomerado muy compacto, el cual aflora sólo en el cauce del río Maure en la zona de Calachaca. Finalmente se observa algunas morrenas ubicadas en las laderas de los domos Purupuruni. Es importante mencionar que los diversos eventos volcánicos han sucedido sobre un basamento sedimentario mesozoico, donde se observan afloramientos de las formaciones Labra, Gramadal y Hualhuani, al sur de la ZGB. Dichos afloramientos consisten en intercalaciones de lutitas y calizas marinas, así como areniscas deltaicas.

En la ZGB se han identificado fallas regionales con dirección NO-SE y locales con dirección NE-SO, las cuales probablemente han controlado el emplazamiento del sistema geotermal de Borateras.

## RESULTADOS

Durante el trabajo de campo llevado a cabo en octubre del 2007, se ha colectado 6 muestras de agua geotermal, las que presentan temperaturas entre 43.5 a 86.0 °C y valores de pH entre 6.9 a 7.9. Asimismo hemos colectado 2 muestras de agua fría, una de la parte baja del rio Maure y la otra de un manantial. Los resultados de los análisis químicos e isotópicos analizados por la WEST JEC en Japón, se muestran en las Tabla 1 y 2 respectivamente.

Tabla 1. Composición química (mg/L) de las fuentes termales de Borateras

Código de muestras	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	B
54111-035					0.38	47.6	21.0	
54111-001	1310	91.0	68.0	0.48	2150	71.9	86.0	95.4
54111-009	1020	96.3	44.4	2.84	1630	70.3	93.0	72.7
54111-017	253	29.5	36.8	17.0	350	37.1	224	16.5
54111-015	643	77.2	40.1	9.17	981	73.3	128	43.4
54111-016	592	68.1	45.2	13.0	874	66.3	184	39.6
54113-001					0.88			
54114-001					510			

Tabla 2. Resultados isotópicos

Muestras \ Isotopos	54111-001	54111-009	54111-017	54111-015
δ D(H <sub>2</sub> O)	-106	-109	-119	-114
δ 18O(H <sub>2</sub> O)	-11.1	-12.3	-15.8	-13.9
δ 34S(SO <sub>4</sub> )	9		4.5	
δ 18O(SO <sub>4</sub> )	-5.7		-1	

La composición química de las aguas fue planteada en el diagrama de Langelier (Marini, 2000; Fig. 3), donde se observa que todas las muestras (54111-001, 54111-009, 54111-015, 54111-016) se localizan en el sector Na-Cl. Esto indica que las aguas son del tipo clorurada sódica. La fuente de Calachaca (54111-017) se aleja de las demás fuentes, esto debido posiblemente a la mezcla con aguas meteóricas.

El diagrama ternario Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> (Giggenbach, 1988; Fig.4) muestra que las fuentes 54111-001, 54111-009, 54111-015 y 54111-016 se ubican dentro del grupo de agua clorurada, típico de fluidos geotermales profundos maduros, característicos de sistemas de altas temperaturas, que presentan fuentes con grandes flujos de agua y elevada concentración de cloruro. Estos sistemas son alimentados directamente desde reservorios clorurados profundos y pueden ser usados para identificar zonas permeables dentro del campo (Nicholson, 1993). En consecuencia, esto nos indica que las aguas en el ZGB provienen de un reservorio profundo. Asimismo la fuente de Calachaca (54111-017) se aleja de las aguas maduras, similar a lo observado en el diagrama de Langelier, debido a la mezcla lateral con aguas superficiales frías, mientras que la fuente Putina Grande (54111-035) que presenta alto contenido de sulfato y bicarbonato se debería a la mezcla de fluidos magmáticos y agua superficial.

Por otro lado, las aguas geotermales en la ZGB se caracterizan por presentar elevada concentración de boro (16.5 a 95.5 mg/L), así como elevada proporción atómica B/Cl, alrededor de 0.15 (Fig. 5), lo que sugiere que las aguas reaccionan con rocas sedimentarias marinas a niveles profundos (Shigeno & Abe, 1983). Posiblemente el reservorio geotérmico en la ZGB estaría desarrollándose a profundidad en los detritos de rocas sedimentarias marinas del Mesozoico, el cual probablemente tiene alta porosidad y permeabilidad con abundantes fracturas (Shigeno, 1993). Asimismo este reservorio profundo probablemente sea calentado por efecto de la conducción termal del calor proveniente de las cámaras magmáticas de los diferentes sistemas volcánicos existentes en la zona.

La evaluación de los datos analíticos del contenido de Na, K y Mg que se muestra en la Figura 6 permite observar que la fuente 54111-001 se encuentran dentro del equilibrio total y la fuente 54111-009 cercano al equilibrio químico, característico de aguas provenientes de reservorios geotermales profundos. También hemos notado que las fuentes 54111-015, 54111-016 y 54111-017 presentan relativamente elevada

concentración de magnesio (Mg), elemento que tiende a ser soluble a bajas temperaturas. Todo esto indicaría que las fuentes termales se localizan a profundidad y a temperaturas menores a 100 °C, debido a la mezcla entre un acuífero termal y un acuífero superficial frío.

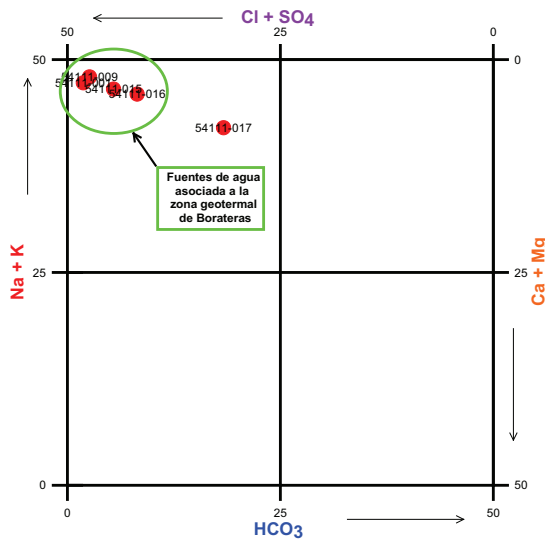


Fig. 3 Diagrama de Langelier.

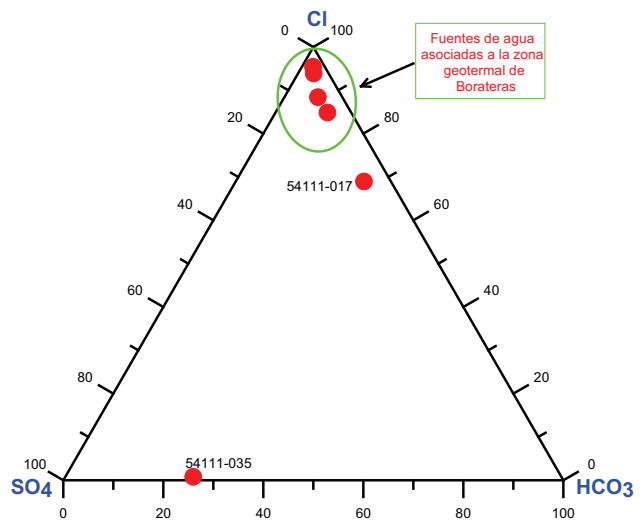


Fig. 4 Diagrama ternario (Giggenbach, 1998).

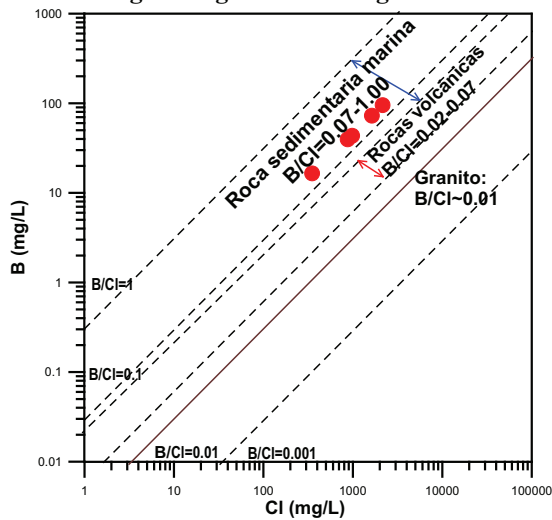


Figura 5. Diagrama Boro vs Cloruro

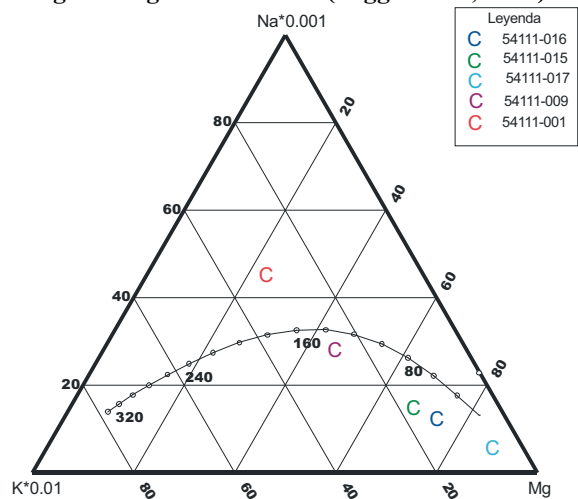


Figura 6. Diagrama ternario (Giggenbach, 1983)

## RESULTADOS DE ISÓTOPOS Y GEOTERMÓMETROS

La figura 7 muestra la relación entre  $\delta^{18}\text{O}$  en los límites -11.1 a -17.1‰ y  $\delta\text{D}$  en los límites -106 a -126‰. Se observa que las fuentes de agua fría se localizan cerca de la Línea Meteorica Local-LML (Cortecchi et al., 2005) lo que indicaría que estas aguas están siendo diluidas principalmente por agua meteórica. Asimismo notamos que las fuentes termales se alejan relativamente de la LML, lo que muestra claramente que estas aguas se originan de la mezcla entre el agua meteórica y magmática, siendo el principal componente el agua meteórica proveniente de la superficie alrededor del 75%.

La geotermometría química en fase líquida permitió estimar la temperatura a profundidad del recurso geotérmico. El geotermómetro de isotopo de oxigeno ( $\text{T}^{18}\text{O}$  ( $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ )), muestra una temperatura de 276 °C para las aguas de Putina Chico (54111-001). Adicionalmente, la temperatura calculada con los geotermómetros de Na/Li (T-Na/Li) indican rangos desde 220 a 250°C y Na/K (T-Na/K) rangos de 150 a 200°C respectivamente, dependiendo de la variación de la temperatura de sílice (Fig. 8). Entonces la temperatura estimada del recurso geotérmico a profundidad puede ser mayor a los 200°C.

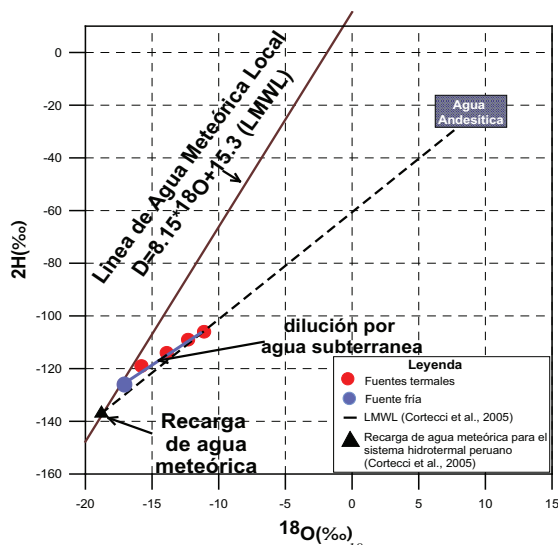


Figura 7  $\delta D$  vs  $\delta^{18}O$

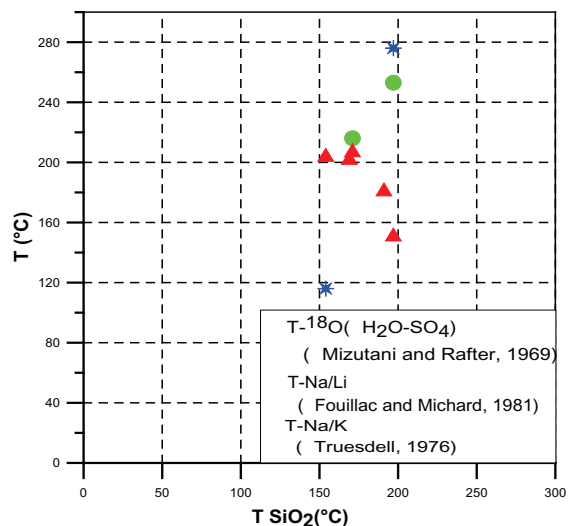


Figura 8  $T\text{-Na/Li}$ ,  $T\text{-}^{18}O(H_2O\text{-}SO_4)$ ,  $T\text{-Na/K}$  vs  $T\text{-SiO}_2$

## CONCLUSIONES

La caracterización geoquímica de las aguas termales en Borateras son de tipo clorurada –alcalina (Na-Cl). Por otro lado, los isotopos estables  $^{18}O$  y  $\delta D$ , indican que las aguas termales se originan por la mezcla entre agua meteórica y magmática. Finalmente, la geotermometría química en fase líquida estima que la temperatura a profundidad del recurso geotérmico de la ZGB posiblemente sea superior a los  $200^{\circ}C$ .

## REFERENCIAS

- 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.
- Fouillac, C. & Michard, G. (1981).- Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics* 10: 55-70.
- Giggenbach, W. F., (1988) - Geothermal solute equilibria; derivation of Na-K-Ma-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2749-2765.
- Marini, L., (2000) - *Geochemical Techniques for the Exploration and Exploitation of Geothermal Energy*, Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università degli Studi di Genova, Italy.
- Mizutani, Y. & Rafter, T. A. (1969).- Oxygen isotopic composition of sulphates: Isotopic composition of sulphate in rain water, Gracefield, New Zealand. *New Zealand Journal of Sciences* 12, 69-80.
- Nicholson, K., (1993) - *Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag edition, Germany.
- Shigeno, H. (1993) - Reservoir Environment of the Onuma Geothermal Power Plant, Northeast Japan, Estimated By Forward Analysis of Long-Term Artificial Tracer Concentration Change, Using Single-box-Model Simulator, Workshop on Geothermal Reservoir engineering, Stanford University California.
- Shigeno, H. & Abe, K. (1983).- B-Cl geochemistry applied to geothermal fluids in Japan, especially as an indicator for deep-rooted hydrothermal systems. *Extended Abstr. 4th Internat. Symp. On Water-Rock Interaction, Misasa 1983*, p. 437-440.
- Truesdell, A.H., (1976).- Geochemical techniques in exploration (Summary of Section III). In *Proceedings of the 2nd United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources: San Francisco, CA, USA 1: 53-79*.