



# Hidrogeoquímica de sistemas geotermales en diferentes ambientes geológicos de la provincia de Jujuy, Argentina.

Yésica Peralta Arnold<sup>ab\*</sup>, Franco Tasii<sup>cd</sup> y Pablo Caffè<sup>ab</sup>

a CIT-JUJUY (Conicet-UNJu), Av. Bolivia 1661, 4600 San Salvador de Jujuy, Argentina.

b Instituto de Geología y Minería de Jujuy, UNJu, Av. Bolivia 1661, 4600 San Salvador de Jujuy, Argentina.

c Dipartimento di Scienze della Terra Università di Firenze, Via La Pira 4, 50121 Firenze, Italy.

d CNR-IGG Istituto di Geoscienze e Georisorse, Via La Pira 4, 50121 Firenze, Italy.

\* email: [yesicajael@hotmail.com](mailto:yesicajael@hotmail.com)

**Resumen.** En este trabajo se comparan las características químicas e isotópicas de cuatro sistemas geotermales localizados en diferentes ambientes geológicos de la provincia de Jujuy, Argentina. La región de Pairique, en el ámbito de la Puna, representa la zona más interesante de los sitios expuestos; dado que las Termas de Rosario de Coyaguayma presentan características únicas, no observadas en los otros sistemas geotermales, como son las descargas de hasta 63°C, los valores más altos de  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  y la presencia de  $\text{H}_2$  y de hidrocarburos más pesados, no están presentes en los otros sistemas. Termas de Aguas Calientes es el de más baja temperatura y los datos que aporta coinciden con el origen somero del sistema, al igual que Termas de Reyes, con la particularidad de que éste alcanza temperaturas de descarga de hasta 50 °C y el anión predominante es  $\text{SO}_4^{2-}$ .

**Palabras Claves:** Sistemas Hidrotermales, Hidroquímica de agua, Manantiales termales, Puna.

## 1 Introducción

En este trabajo se aborda el estudio de la hidroquímica de cuatro sistemas geotermales emplazados en ambientes geológicos diferentes de la provincia de Jujuy (Figura 4), que son: Termas Aguas Calientes (TAC), correspondiente al Sistema interandino; Termas de Reyes (TR), en la Cordillera Oriental y Rosario de Coyaguayma (TRC) y termas de Pairique (TP), en el marco de la Puna.

Con el objetivo de caracterizar estos sistemas, se analizaron iones mayoritarios, isótopos e hidrocarburos en agua y gases de diferentes manifestaciones en cada área de estudio. Esta información, sumada a los datos geológico-estructurales, es útil para evaluar el origen de la actividad termal y su relación con el ambiente geológico en el que se encuentran.

## 2 Metodología

En cada punto de interés se tomaron parámetros *in situ* (pH, STD, T°C y Conductividad) junto con cinco alícuotas de agua. Dos de ellas acidificadas, filtradas a 45µ en botellas de polietileno de alta densidad. En el laboratorio de analizaron cationes mayores ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$  y  $\text{NH}_4^+$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Br}$  y  $\text{F}^-$ ) mediante

cromatografía iónica. Los gases disueltos se muestrearon en viales de vidrio con tapa precinto y  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ , Ar, He,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  fueron analizados mediante cromatógrafo de gas (Shimadzu 15A). Los gases libres se colectaron en ampollas de vidrio tipo Giggenbach con vacío previo y con 20 ml de NaOH 4 N, mientras que los gases orgánicos fueron muestreados en viales de vidrio.

## 3 Geología de las zonas de estudio

### Aguas Calientes (Sierra de Puesto Viejo)

En el área de estudio, enmarcada dentro del Sistema Interandino (Ramos, 1999), se destaca un anticlinal asimétrico con vergencia al este que coincide geomorfológicamente con la sierra de Puesto Viejo y es la continuación del anticlinal de Zapla. Su flanco occidental presenta un aumento progresivo del buzamiento hasta que los estratos se verticalizan, mientras que el flanco oriental es suave, con inclinaciones promedio de 12°. El basamento de la región está constituido por cuarcitas y areniscas cuarzosas ordovícicas, por encima de las cuales se encuentran importantes depósitos silúrico-devónicos conformados por cuarcitas, areniscas micáceas, areniscas hematíticas y areniscas cuarzosas. Luego se encuentran las areniscas calcáreas y calizas mesozoicas propias de la Fm. Yacoraite. Sobre ellas, afloran las areniscas y calizas estromatolíticas del Subgrupo Santa Bárbara y las areniscas y conglomerados del Grupo Orán. Los depósitos cuaternarios están conformados por conglomerados, areniscas, limos y arcillas. Completando la columna estratigráfica se encuentran travertinos relacionados a actividad termal extinta (Arias et al., 1987). Los manantiales termales, con temperaturas que van desde los 21°C hasta los 33°C, se localizan en el sector suroeste de la sierra mostrando un marcado control estructural mediante la falla de Puesto Viejo, que es inversa y de gran ángulo en superficie.

### Reyes

Forma parte del borde este de la Cordillera Oriental, cuya característica geológica principal es el desarrollo de grandes láminas de corrimiento que están compuestas por un zócalo proterozoico, representado por las leptometamorfitas de la Fm. Puncoviscana (Ramos, 1999).

El esfuerzo compresivo dio como resultado una serie de bloques angostos y alargados delimitados por dos corrimientos principales. Existe también un juego de fallas inversas secundarias que, al igual que las anteriores, tienen alto ángulo y planos buzantes al oeste (Moreno Espelta et al., 1978). En el sector afloran pizarras y cuarcitas de la Fm. Puncovicana. Sobre ellas se apoyan en discordancia cuarcitas cámbricas pertenecientes al Grupo Mesón. La columna estratigráfica continúa con sedimentos marinos ordovícicos del Grupo Santa Victoria y sedimentos continentales paleógenos del Grupo Orán. Finalmente se encuentran depósitos cuaternarios (González et al., 2012). En la actualidad, las manifestaciones termales se circunscriben al arroyo Aguas Calientes y a un pequeño manantial de agua templada en la quebrada de Marín.

Los manantiales termales visibles emergen a través de diaclasas de la Fm. Campanario (Grupo Mesón) con temperaturas que oscilan entre 40° y >50 °C. Otros están cubiertos por estructuras de hormigón realizadas para captación y alimentan una cisterna con un caudal estimado de 200 L/minuto.

### Región de Pairique

Esta zona se ubica en la Puna norte (22°-24° S), una región que hospeda parte de la extensa provincia volcánica cenozoica del retroarco de los Andes centrales (Coira y Kay 2004). En la zona de Pairique (S 22°45'- 23°00' y W 66°55'-66°40') se han reconocido al menos 5 centros eruptivos principales de edad miocena superior (~12 Ma a 6.7 Ma), agrupados en el Complejo Volcánico Pairique y cuyos productos tienen composiciones que van de andesitas basálticas a riolitas (Caffe et al., 2007). El basamento está representado por sedimentitas ordovícicas, aflorantes en la sierra de Lina (Coira et al. 2004) y en la sierra de Olaroz, cubiertas en discontinuidad por areniscas y fangolitas terciarias, asignadas a la Formación Peña Colorada (Coira et al. 2004). Sobre estas rocas o intruyéndolas afloran las volcanitas antes mencionadas. Los mayores lineamientos corresponden a estructuras de rumbo submeridiano, que sobrecorrieron el basamento ordovícico por encima de las sedimentitas terciarias. Estructuras transversales (ONO, NO, NE y E-O) al rumbo principal del orógeno son predominantes y afectan preferencialmente a las rocas volcánicas (Caffe et al. 2007).

Las TP surgen a ~44°C a partir de fracturas menores ubicadas en el conjunto lávico-piroclástico más antiguo del complejo volcánico homónimo, que conforman un bajo dentro de una estructura anular formada por domos dacíticos.

Al noroeste de este bajo, sobre el cauce del río Rosario de Coyaguayma, se encuentra una plataforma de travertino en la que se pueden apreciar estructuras de géiseres extintos, abundantes vertientes y piscinas burbujeantes. En este sitio las temperaturas van desde los 31°C a los 63°C. Esta plataforma de sinters carbonáticos aflora en medio de un conjunto de lavas dacíticas alteradas (Brecha Morada; Caffé et al., 2007) que conforman la base del Complejo Volcánico Pairique, sobre la traza de una gran falla de

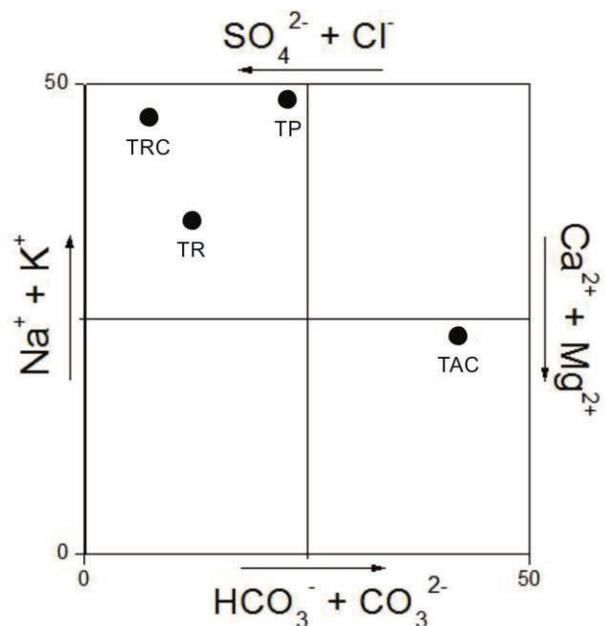
rumbo NE con comportamiento predominante de transcurrencia dextral (Caffe et al., 2005).

## 4 Resultados

### 4.1 Composición química e isotópica del agua

Las aguas de TAC son aguas bicarbonatadas cálcicas magnésicas, de pH cercano al neutro y conductividades que van desde los 0,3 a los 0,5 mS, con valores de STD del orden de los 200 mg/L. El agua de TR es sulfatada sódica cálcica, con pH de 7,69 y STD de 860 mg/L. En el caso de las TP, presentan una composición intermedia, por lo que son bicarbonatadas sódicas pero con alta proporción de Cl. Su pH es neutro y su conductividad > 2 mS. Las TRC son las más salinas, de composición clorurada sódica magnésica, presentan pH de entre 6,57 a 6,88, conductividades del orden de 12 mS y STD de entre 5000 y 6300 mg/L (Figura 1 y 2).

Los análisis de  $^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$  y  $^2\text{H}\text{-H}_2\text{O}$  realizados muestran que todas coinciden con la línea meteórica mundial (Figura 3).

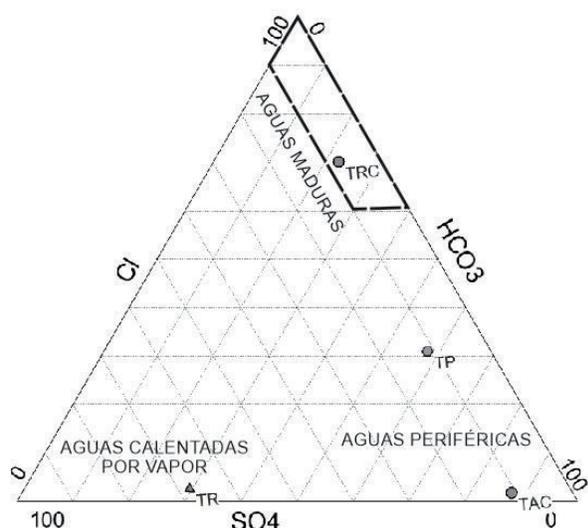


**Figura 1.** Diagrama de Langelier-Ludwing (Langelier y Ludwing, 1942) para clasificación de química del agua de los cuatro sistemas estudiados.

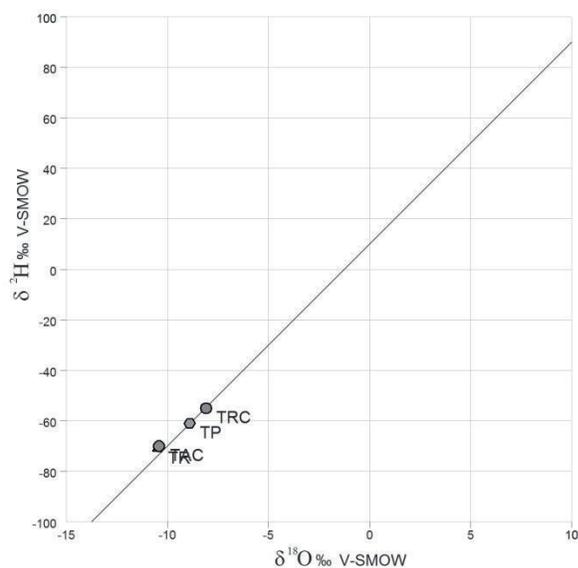
### 4.2 Composición química e isotópica de los gases

Se analizaron los gases disueltos y los gases liberados por burbujeo en todas las muestras, excepto en TR que no libera gases en superficie. Para el caso de los gases disueltos, en TAC predominan el  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$  (concentraciones de alrededor de 0,70 mmol/mol y 0,55 mmol/mol, respectivamente). En TR aumenta la proporción de  $\text{CO}_2$  (1,26 mmol/mol) y el  $\text{NO}_2$  está subordinado (0,47 mmol/mol). Es distinto el caso para

TRC y TP, donde el  $\text{CO}_2$  es el más abundante con concentraciones del orden de los 14 mmol/mol y el  $\text{N}_2$  se mantiene alrededor de los 0,4 mmol/mol.



**Figura 2.** Diagrama ternario  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Cl}^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$  de Giggensch (1991) para el agua de los diferentes sistemas en estudio.



**Figura 3.** Diagrama binario  $\delta D$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$  para las emisiones de agua de los sistemas estudiados indicando la Línea Meteorica Global.

En TRC y TP, los gases libres tienen alta proporción de  $\text{CO}_2$  y se encuentran subordinados el  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , Ar,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$ . Como resultado del análisis de los hidrocarburos se encuentra la presencia de compuestos pesados ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) y benceno. Los valores obtenidos de  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  indican origen termogénico para el  $\text{CH}_4$ .

La predominancia en los gases libres para TAC es de  $\text{CO}_2$  -  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Ar y  $\text{CH}_4$ . En este caso no se encuentra  $\text{H}_2$ , benceno, ni compuestos hidrocarburos más pesados que

$\text{C}_4\text{H}_{10}$ . Por otro lado, el valor obtenido de  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  indica origen biogénico para el metano.

## 5 Discusión

De acuerdo a los resultados presentados se pueden diferenciar tres tipos de sistemas geotermales: 1) TAC; 2) TR; 3) TRC y TP.

Por sus características geoquímicas las TAC pueden definirse como un sistema hidrotermal convectivo, donde el agua meteórica se infiltra a grandes profundidades, se calienta por gradiente geotérmico normal, y luego asciende rápidamente por grandes fallas regionales, aflorando como un agua caliente pero con composición semejante a la inicial.

TR presenta características similares a TAC, tanto en los gases como en su isotopía, pero se distingue por su composición química, ya que es el único sistema sulfatado. TR puede definirse como un sistema de aguas no maduras que recibe aporte de calor profundo y gases con azufre.

Los sistemas ubicados en el marco de la Puna serían más profundos, de acuerdo a rasgos como la presencia de  $\text{H}_2$ , valores más altos de  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  y elevadas concentraciones de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ . Los hidrocarburos más pesados y el benceno encontrados en estas fuentes son otro indicio de su carácter más caliente y profundo. Dada la configuración geológica de este sector de la Puna, que aloja grandes sistemas volcánicos extintos, la relación entre las manifestaciones geotermales y las fallas y las características químicas de las aguas de TRC y TP, se propone que la composición de estas últimas es adquirida por dos mecanismos posibles. Primero, el agua meteórica ingresa al sistema recibiendo cierto aporte profundo, ya sea por la incorporación de gases o mezcla con aguas magmáticas. En segundo lugar, una vez calentado durante la circulación profunda, el fluido asciende a través de estructuras favorables, disolviendo a su paso sales ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ) que encuentra en este ambiente, probablemente derivadas de la lixiviación de depósitos evaporíticos en profundidad.

## Referencias

- Arias, J., Chávez, A., Moreno Espelta, C., y Chalabe, E., 1987a. Geología del área termal de la Sierra de Puesto Viejo, Departamento del Carmen, Provincia de Jujuy, República Argentina. Revista del Instituto de Geología y Minería, Universidad Nacional de Jujuy, 7: 55-77. Jujuy
- Caffe, P.J., Soler, M.M., Rodríguez, G., Coira, B. y Onoe, A.T., 2005. El Complejo Volcánico Pairique. Volcanismo peraluminoso tipo S en los Andes Centrales del Sur. Actas del XVI Congreso Geológico Argentino, vol. I, 643-650, La Plata.
- Caffe, P.J., Soler, M.M., Coira, B., Cabrera, A., Flores, P., 2007. Estratigrafía y centros eruptivos de la región de Pairique, Puna Jujena. Revista Asociación Geológica Argentina 62, 242-256.
- Coira, B. y Kay, S.M. 2004. Central Andean plateau ignimbrites in the Puna Back-arc Cenozoic volcanic Province (PBVC). IAVCEI .

General Assembly 2004, CD-ROM, s-04\_o\_02, Pucón.

Coira, B., Caffè, P., Ramirez, A., Chayle, W., Diaz, A., Rosas, S., Perez, A., Perez, B., Orosco, O. y Martinez, M. 2004. Hoja Geológica Mina Pirquitas 2366-I/2166-III, (1:250.000). SEGEMAR- IGRM, Boletín 269: 1-123.

de Silva, S.L. 1989. The Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes. *Geology* 17: 1102-1106.

Giggenbach, W.F., 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development. UNITAR, New York, pp. 253-273.

Gonzalez, M.A., Fracchia, D., Solis, N. G. y Barber, E., 2012. Flujo de barro del arroyo del Comedero, Jujuy: caracterización, causas y efectos. *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, vol.69, n.3, pp. 382-392.

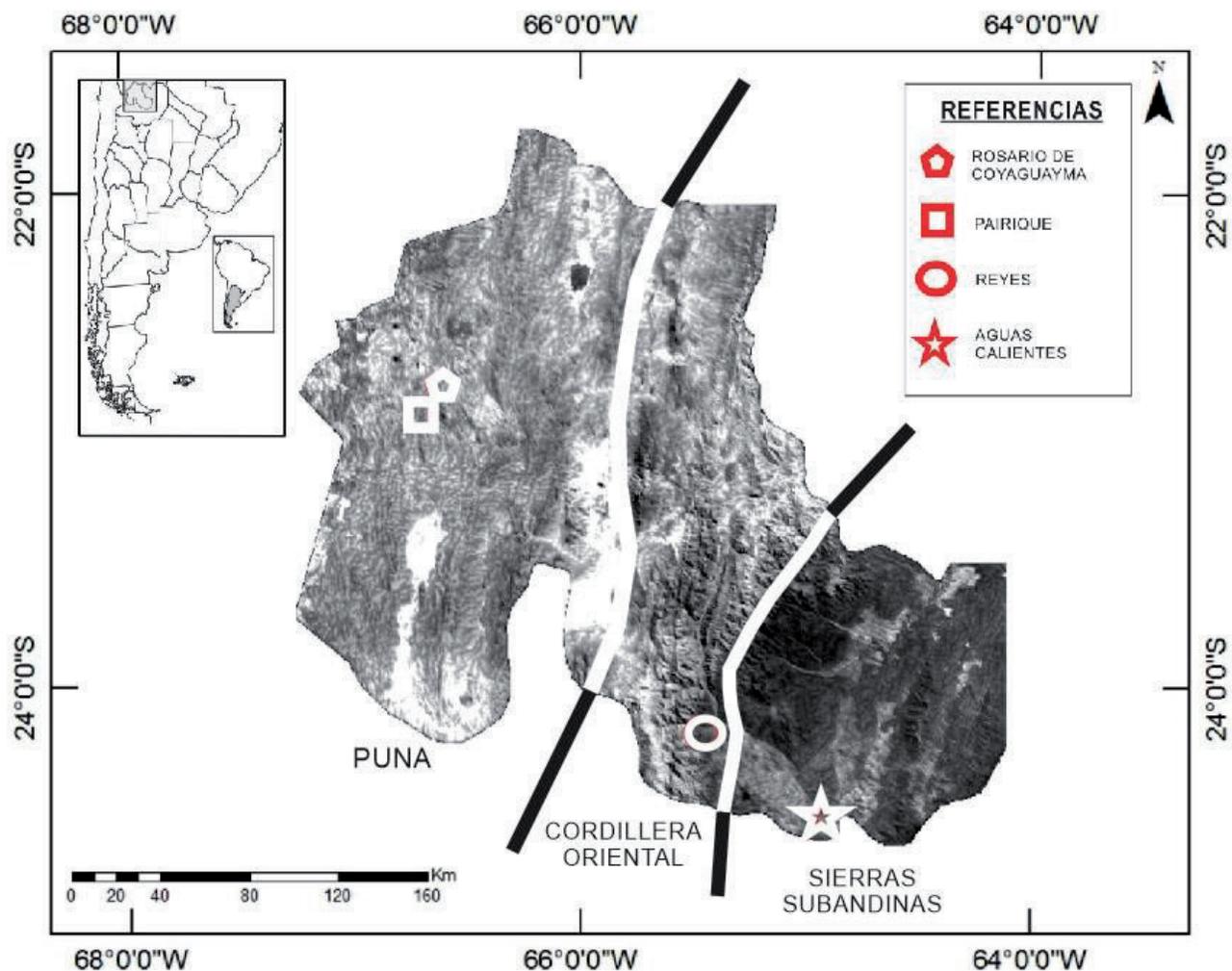
Moreno Espelta, C., Arias, J. E., y Chávez, A., 1978. Geología del Área Termal de Reyes, Departamento Capital, Provincia de Jujuy, República Argentina. *Revista del Instituto de Ciencias Geológicas, Universidad Nacional de Jujuy*, 3: 161-172. Jujuy.

Ramos, V.A. 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. *Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires, Anales* 29: 41-96.

Tassi, F., Vaselli, O., Luchetti, G., Montegrossi, G., Minissale, A., 2008. Metodo per la determinazione dei gas disciolti in acque naturali. Internal Report CNR-IGG, n. p. 10 (10420).

Tassi, F., Fiebig, J., Vaselli, O., Nocentini, M., 2012. Origins of methane discharging from volcanic-hydrothermal, geothermal and cold emissions in Italy. *Chem. Geol.* 310, 36-48

Vaselli, O., Tassi, F., Montegrossi, G., Capaccioni, B., Giannini, L., 2006. Sampling and analysis of volcanic gases. *Acta Volcanol.* 18, 65-76.



**Figura 3.** Mapa de Ubicación de Jujuy donde se muestran las diferentes provincias geológicas y la localización de los sistemas geotermales.