

# Aplicación de geotermómetros químicos a un sistema termal de baja temperatura

## *Application of chemical geothermometers to a low temperature thermal system*

Mónica Blasco<sup>1</sup>, Luis F. Auqué<sup>1</sup>, María J. Gimeno<sup>1</sup>, Patricia Acero<sup>1</sup> y María P. Asta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009, Zaragoza, España. monicabc@unizar.es, lauque@unizar.es, mjgimeno@unizar.es, patriace@unizar.es

<sup>2</sup> Environmental Microbiology Laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Route Cantonale, 1015, Lausanne, Suiza. mapiasta@gmail.com

### ABSTRACT

The Tiermas geothermal system is one of the areas with the greatest geothermal potential in Aragón, however, its hydrogeological and geochemical features are still poorly known. In this study, the main hydrochemical features of these waters are presented and the reservoir temperature is approached by applying chemical geothermometers. These waters have a sulphate chloride sodium affinity, with nearly 40 °C of spring temperature and an approximate flow rate of 200 l/s. The most likely aquifer seems to be located in the Paleocene and Eocene carbonates. However, due to the structural complexity of the area, the waters would also interact with the evaporitic facies present in the Eocene–Oligocene boundary. Two different hydrochemical groups have been distinguished based on their salinity, Na/Cl ratios, SO<sub>4</sub> concentrations and TDS values. Despite the compositional variations detected in the springs, the geothermometric calculations allow to infer a reservoir temperature of 85 ± 17 °C. Good consistency has been obtained with the cationic geothermometers, which is an unusual situation for a geothermal system in carbonate–evaporitic materials.

**Key-words:** Geothermometry, geothermal system, chemical geothermometers, thermal waters.

Geogaceta, 60 (2016), 107-110  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

### Introducción

El estudio de las características químicas e isotópicas de las surgencias termales proporciona información sobre distintos aspectos de la evolución del agua en el circuito hidrológico y permite estimar la temperatura de las aguas en el reservorio. Es por ello que el estudio geoquímico de los sistemas geotermales constituye el paso inicial en la prospección y evaluación del potencial geotérmico de una zona (p. ej. D'Amore y Arnórsson, 2000).

La zona de los manantiales termales de Tiermas (NW de la provincia de Zaragoza; Fig. 1) se encuentra actualmente cubierta por las

aguas del embalse de Yesa durante la mayor parte del año. Sin embargo, con temperaturas de surgencia próximas a los 40 °C y un caudal total de unos 200 l/s, ha sido identificada como una de las zonas más importantes de Aragón por su potencial geotérmico (Sánchez Navarro *et al.*, 2004). Pese a ello, el funcionamiento hidrológico del sistema y sus características geoquímicas están todavía poco estudiados.

En este trabajo se presentan los primeros resultados sobre la temperatura de las aguas en el reservorio de este sistema, obtenidos mediante la aplicación de técnicas geotermométricas clásicas.

### RESUMEN

El sistema geotermal de Tiermas representa una de las zonas con mayor potencial geotérmico de Aragón y, sin embargo, se sabe todavía poco acerca de sus características hidrológicas y geoquímicas. En este trabajo se presentan los principales rasgos hidroquímicos de estas aguas y se determina su temperatura en profundidad mediante la aplicación de geotermómetros químicos. Estas aguas tienen una afinidad clorurada sulfatada sódica, una temperatura de surgencia de casi 40 °C y un caudal de unos 200 l/s. El acuífero más probable se localizaría en los carbonatos del Paleoceno y Eoceno, pero debido a la complejidad estructural de la zona, las aguas entrarían en contacto con la facies evaporítica del tránsito Eoceno–Oligoceno, adquiriendo así dicha afinidad. Se han distinguido dos grupos hidroquímicos con una diferente salinidad, relación Na/Cl y concentraciones de SO<sub>4</sub> y TDS. A pesar de las variaciones composicionales detectadas en las surgencias, los cálculos geotermométricos realizados permiten establecer un rango de temperaturas en el reservorio de 85 ± 17 °C, habiéndose obtenido buenos resultados con los geotermómetros catiónicos, situación poco habitual en sistemas termales instalados en materiales carbonatados – evaporíticos.

**Palabras clave:** Geotermometría, sistema geotermal, geotermómetros químicos, aguas termales.

Recepción: 4 de enero de 2016  
Revisión: 20 de abril de 2016  
Aceptación: 20 de Mayo de 2016

### Situación geológica

La zona de estudio se localiza en el Prepirineo Navarro–Aragonés, en la Cuenca de Jaca–Pamplona, situada, a su vez, en la zona occidental de la Cuenca Surpirenaica.

La cuenca de Jaca–Pamplona tiene una forma alargada en dirección E–W, paralela a la directriz estructural del Pirineo y su estructura corresponde a la de un sinclinal asimétrico con vergencia al sur (Larrasoña Gorosquieta *et al.*, 1996).

Estratigráficamente está formada por materiales que abarcan desde el Triásico al Mioceno (Fig. 2). Los materiales triásicos de



**Fig. 1.- Localización de los Manantiales de Tíermas.**  
 Fig. 1.- Location of the Tíermas Springs.

la cuenca pertenecen al Triásico inferior en Facies Keuper. Sobre éstos, aparece una serie de materiales marinos depositados en la cuenca de antepaís surpirenaica y que pertenecen al Cretácico superior, Paleoceno (Calizas de Alveolinas), Eoceno inferior y medio (Calizas de Guara y turbiditas del Grupo Hecho) y Eoceno superior (Margas de Arguís–Pamplona) (Faci Paricio, 1997). En el límite Eoceno superior-Oligoceno aparece una facies evaporítica constituida principalmente por halita y anhidrita (Ayora *et al.*, 1995) y, finalmente, aparecen los materiales oligocenos y miocenos continentales (Grupo Campodarbe) representando las últimas fases de evolución de la cuenca (Faci Paricio, 1997).

Los manantiales surgen a través de las

Margas de Arguís – Pamplona, aunque el acuífero más probable estaría constituido por los carbonatos del Paleoceno y Eoceno (Sánchez Navarro *et al.*, 2004). No obstante, la complejidad estructural de la zona (Fig. 2), con numerosos cabalgamientos, facilitaría el contacto de las aguas con los materiales evaporíticos del tránsito Eoceno–Oligoceno, justificando así algunos de los rasgos composicionales de las aguas termales. La zona de recarga no se conoce con precisión, aunque podría situarse en las Sierras Interiores (Fig. 2).

**Metodología**

La primera tarea abordada en el estudio de este sistema termal fue la compilación de una base de datos analíticos de las aguas del sistema termal de Tíermas, obteniendo así una serie de análisis químicos desde 1985 hasta 2012.

El estudio inicial de estos datos evidenció que desde 1990 se observa una paulatina disminución de la salinidad, cuya causa está siendo actualmente estudiada. Para evitar los efectos de esta variación química en el cálculo de la temperatura en profundidad se han empleado los datos analíticos obtenidos con anterioridad a este cambio (en 1985; Tabla I; Auqué, 1993).

Para la determinación de la temperatura en el reservorio se han utilizado técnicas geotermométricas clásicas, mediante la aplicación de diferentes geotermómetros químicos. Estos geotermómetros consisten en diferentes ecuaciones teóricas o empíricas basadas en las reacciones químicas heterogéneas, dependientes de la temperatura, que controlan algunos de los contenidos elementales de las aguas (p.ej.

D’Amore y Arnórsson, 2000). Para su aplicación se asume que dichos contenidos no han cambiado durante el ascenso de las aguas a la superficie y que las aguas se encontraban en equilibrio con los materiales del reservorio.

En la bibliografía existe un gran número de geotermómetros (y de calibrados geotermométricos), aunque muchos de ellos da lugar a inconsistencias cuando se aplican a sistemas geotermales de baja y media temperatura alojados en materiales sedimentarios, como el caso aquí tratado (p. ej. Chiodini *et al.*, 1995; D’Amore y Arnórsson, 2000). Para este estudio se han seleccionado aquellos calibrados que han proporcionado resultados coherentes en sistemas de caracteres similares. Estos geotermómetros han sido: SiO<sub>2</sub>-cuarzo, SiO<sub>2</sub>-calcedonia, Na-K, K-Mg y Na-K-Ca, con los calibrados que se indican en la Tabla II.

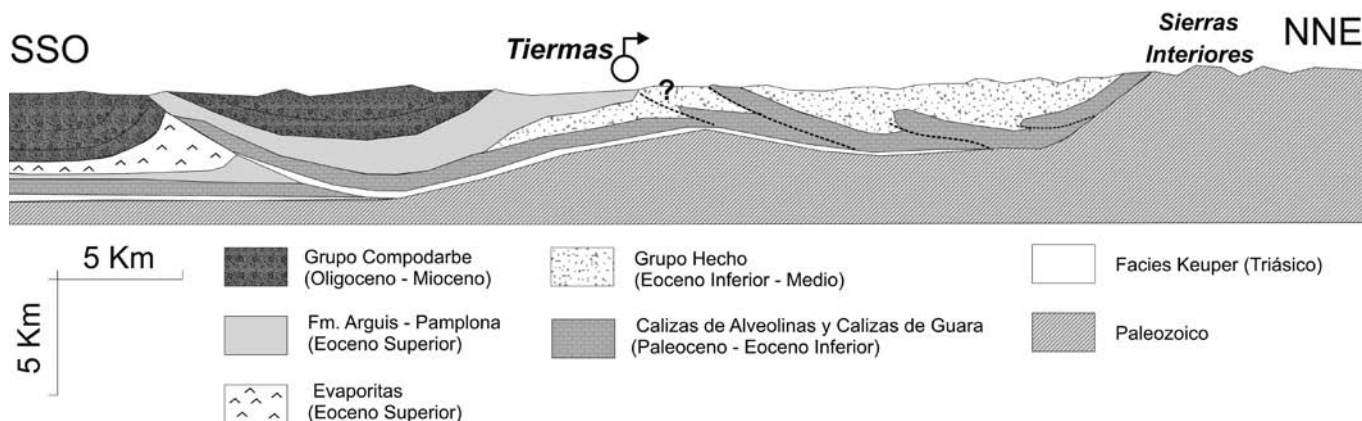
**Resultados**

*Características de las aguas*

El muestreo seleccionado para llevar a cabo este estudio fue realizado en 1985 y consta de cinco muestras, tomadas cada una de ellas en un manantial diferente.

Las aguas son de tipo clorurado-sulfatado-sódico, con temperaturas entre 37 y 39 °C, valores de pH entre 6,75 y 7,38 y sin contenido de tritio detectable (Tabla I).

Composicionalmente, las aguas pueden dividirse en dos grupos (en la Tabla I se muestran los caracteres composicionales de una muestra de cada grupo). El primer grupo estaría formado por dos de las muestras (T-1), con relaciones molares Cl/Na próximas a 1, concentraciones de SO<sub>4</sub> infe-



**Fig. 2.- Estructura geológica de la zona de estudio, señalando la localización de los Manantiales de Tíermas (modificado de Cámara y Klimowitz, 1985).**  
 Fig. 2.- Geological structure of the studied area showing the location of the Tíermas Springs (modified after Cámara and Klimowitz, 1985).

Muestra	T-1	T-2
Temp. (°C)	38,7	37,3
pH	6,75	6,79
TSD (ppm)	7750,3	10653
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	233	227
Cl <sup>-</sup> (ppm)	3573	2975
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	1035	3650
Ca <sup>2+</sup> (ppm)	270	331,2
Mg <sup>2+</sup> (ppm)	90	87,8
Na <sup>+</sup> (ppm)	2400	3195
K <sup>+</sup> (ppm)	42	31
SiO <sub>2</sub> (ppm)	28	28

**Tabla I.- Datos composicionales de las muestras seleccionadas.**

*Table I.- Compositional data of the selected samples.*

riores a 2000 ppm y total de sólidos disueltos (TSD) en torno a 8000 ppm.

El segundo grupo incluye a las otras tres muestras (T-2), que presentan una relación molar Cl/Na menor que 1, contenidos de sulfato superiores a 3000 ppm y valores más elevados de TSD (casi 11000 ppm).

La causa de estas diferencias en la composición de las aguas podría deberse a distintas pautas de evolución en el sistema hidrológico (p. ej. distinto grado de contacto con minerales evaporíticos) o a la actuación de procesos secundarios durante el ascenso de las soluciones. Para evaluar el efecto de esta variabilidad composicional en los cálculos geotermométricos se ha seleccionado una muestra de agua representativa de cada grupo (Tabla I).

**Geotermometría**

Cuando se representan estas aguas en el clásico diagrama de Giggenbach (1988), se localizan en el campo de las aguas parcialmente equilibradas o próximas a las totalmente equilibradas, dependiendo del calibrado geotermométrico considerado (Fig. 3), lo que permite, *a priori*, el uso de los geotermómetros catiónicos. Por ello, tanto éstos, como los de la sílice, se han aplicado a las aguas seleccionadas (Tabla I).

Las temperaturas obtenidas con los geotermómetros de la sílice son iguales en ambas muestras puesto que el contenido en sílice es el mismo. La temperatura que se obtiene con el geotermómetro SiO<sub>2</sub>-cuarzo está en torno a 76 – 78 °C, mientras que con el geotermómetro SiO<sub>2</sub>-calcedonia la temperatura es menor, en

torno a 45 – 48 °C, muy próxima a la de surgencia.

El geotermómetro K–Mg proporciona una temperatura entre 68 y 75 °C, similar a la obtenida con el termómetro SiO<sub>2</sub>-cuarzo que a la obtenida con el SiO<sub>2</sub>-calcedonia.

El geotermómetro Na-K con el calibrado de Giggenbach (1988) proporciona temperaturas más elevadas (96 – 123,2 °C) que con el calibrado de Fournier (1979), cuyos valores de temperatura (75 – 102 °C) son próximos a los proporcionados por los geotermómetros SiO<sub>2</sub>-cuarzo y K-Mg, especialmente considerando la muestra T-2.

El geotermómetro Na-K-Ca indica una temperatura de unos 120 °C para la muestra T-1 y de 93 °C para la T-2, situación similar a la encontrada con el de Giggenbach (1988) para el geotermómetro Na-K.

En general, las temperaturas obtenidas con los geotermómetros catiónicos están más próximas a las que se obtienen con el geotermómetro SiO<sub>2</sub>-cuarzo que a las obtenidas con el SiO<sub>2</sub>-calcedonia. Esto indicaría que la fase que controla la sílice disuelta en las aguas es el cuarzo y, por tanto, que los resultados obtenidos con el geotermómetro SiO<sub>2</sub>-calcedonia no son representativos del sistema.

**Discusión**

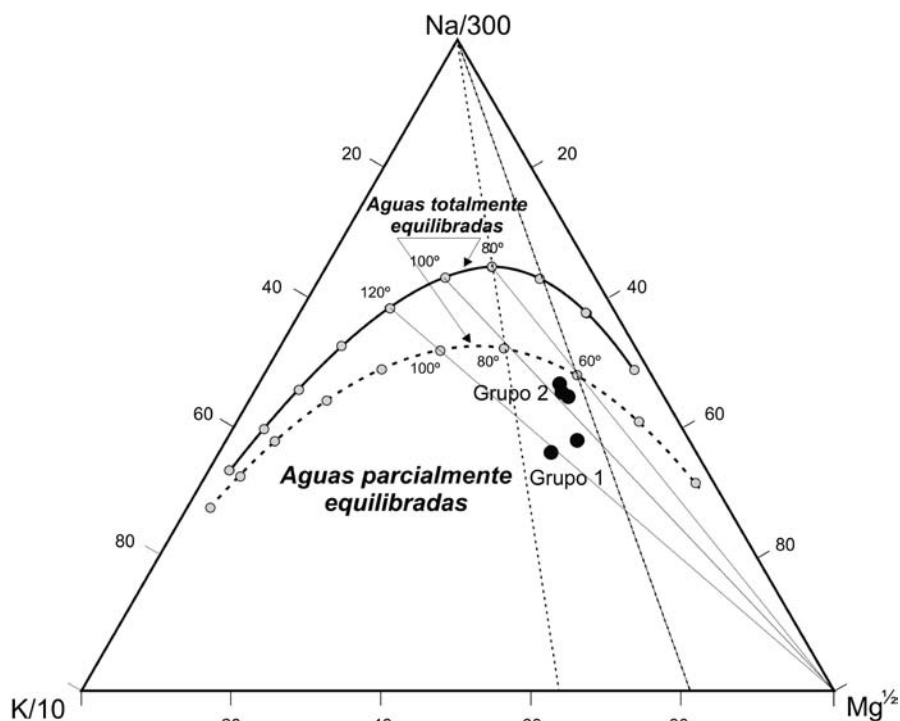
Las temperaturas calculadas para las aguas del segundo grupo mediante los geotermómetros SiO<sub>2</sub>-cuarzo, K-Mg y Na-K, con el calibrado de Fournier (1979), muestran un excelente grado de coincidencia (entre 69 y 78 °C). La buena concordancia entre estos dos últimos geotermómetros es coherente con la situación de estas muestras más próximas a una situación de equilibrio total en el diagrama de Giggenbach (Fig. 3).

En el caso del primer grupo, el rango de temperaturas definido por esos mismos calibrados sería algo mayor, entre 74 y 102 °C.

Teniendo en cuenta el rango de incertidumbre normalmente considerado para los geotermómetros químicos (± 20 °C; Fournier, 1982), las temperaturas para ambos grupos de muestras se pueden considerar muy similares.

De hecho, se podría proponer un rango de temperaturas en profundidad para todas las aguas de Tiermas de 85 ± 17 °C, lo que incluiría todas las temperaturas proporcionadas por los calibrados elegidos.

Los procesos responsables de las diferencias composicionales encontradas en estas



**Fig. 3.- Diagrama de Giggenbach en el que aparecen representados los dos grupos de muestras de Tiermas. La línea de puntos se obtiene de los calibrados Na-K de Fournier (1979) y K-Mg de Giggenbach (1988); y la línea continua de los calibrados Na-K y K-Mg de Giggenbach (1988).**

*Fig. 3.- Giggenbach diagram displaying the composition of both groups of Tiermas water samples. The dotted line is obtained from the calibrates of Na-K by Fournier (1979) and of K-Mg by Giggenbach (1988) and the solid line corresponds to the Giggenbach (1988) Na-K and K-Mg calibrates.*

Geotermómetro	Calibrado	Temp. (°C) T-1	Temp. (°C) T-2
SiO <sub>2</sub> -cuarzo	Truesdell (1976)	76,78	76,78
	Fournier (1977)	76,58	76,58
	Michard (1979)	77,83	77,83
SiO <sub>2</sub> -calcedonia	Fournier (1977)	45,09	45,09
	Arnórsson et al. (1983)	47,97	47,97
Na-K	Giggenbach (1988)	123,2	96
	Fournier (1979)	102,47	74,95
K-Mg	Giggenbach (1988)	73,88	67,61
Na-K-Ca	Fournier y Truesdell (1973)	119,73	93,34

Tabla II.- Temperaturas deducidas para las muestras representativas de los dos grupos de aguas mediante distintos geotermómetros químicos y diferentes calibrados.

Table II.- Temperatures deduced for the samples representatives of both water groups with different chemical geothermometers and their calibrates.

aguas, ya sean procesos secundarios o diferentes procesos de interacción agua-roca dentro del circuito hidrogeológico, no provocan variaciones significativas en las temperaturas calculadas para ambos grupos de muestras.

Las causas de estas diferencias composicionales deberán ser estudiadas con mayor detalle mediante modelización geoquímica.

No obstante, resulta destacable la coherencia de los resultados obtenidos con los geotermómetros catiónicos Na-K y K-Mg en un sistema termal de baja entalpía instalado en materiales carbonatado-evaporíticos.

## Conclusiones

En el sistema termal de Tiermas se han identificado dos grupos de aguas, diferenciados por sus relaciones Cl/Na, concentraciones de SO<sub>4</sub> y valores de TSD.

Se propone un rango de temperatura de las aguas en el reservorio de  $85 \pm 17$  °C, que incluiría los resultados obtenidos mediante los geotermómetros químicos en ambos grupos de muestras. Los geotermómetros catiónicos (Na-K y K-Mg) proporcionan resultados coherentes a pesar de que no ser habitual en este tipo de sistemas carbonatado-evaporíticos.

Para poder caracterizar completamente el sistema y determinar las causas de las

variaciones composicionales encontradas, este estudio será completado con otros más detallados de modelización geoquímica y geotermométrica.

## Agradecimientos

Este trabajo forma parte de las actividades realizadas por el Grupo de Modelización Geoquímica, financiado por el Gobierno de Aragón (DGA). Mónica Blasco posee una ayuda de Formación del Profesorado Universitario (ref. FPU14/01523) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España. Agradecemos al Dr. Juan Carlos Cerón y a un revisor anónimo sus sugerencias.

## Referencias

Auqué, L.F. (1993). *Estudio de sistemas geotermales en Aragón. Pautas de especificación y reacción aplicadas a la modelización de sistemas de baja – media entalpía*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 509 p.

Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E. y Svavarsón, H. (1983). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 47, 567-577.

Ayora, C., Taberner, C., Pierre, C y Pueyo, J.J. (1995). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 1799-1808.

Cámara, P. y Klimowitz J. (1985). *Estudios Geológicos* 41, 391-404.

Chiodini, G., Frondini, F. y Marini, L. (1995). *Applied Geochemistry* 10, 337-346.

D'Amore F. y Arnórsson S. (2000). *Geothermometry*. En: *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use* (S. Arnórsson, Ed.), International Atomic Agency, Vienna, 152-199.

Faci Paricio, E. (dir.) (1997). *Cartografía Geológica de Navarra. E. 1:25000. Hoja 175-I: Tiermas*. Gobierno de Navarra. Departamento de Obras Públicas, Transportes y Comunicaciones.

Fournier, R.O. (1977). *Geothermics* 5, 41-50.

Fournier, R.O. (1979). *Geothermal Resources Council Transactions* 3, 221-224.

Fournier, R.O. (1982). Water geothermometers applied to geothermal energy. En: *Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development* (F. D'Amore, Coordinador), UNITAR/UNDO centre on Small Energy Resources, Rome, Italy, 37-69.

Fournier, R.O. y Truesdell, A.H. (1973). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 37, 1255-1275.

Giggenbach, W.F. (1988). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.

Larrasoña Gorosquieta, J.C., Pueyo Morer, E.I., del Valle de Lersundi, J., Millán Garrido, H., Pocoví Juan, A. y Dinarés Turell, J. (1996). *Geogaceta* 20, 1058-1061.

Michard, G. (1979). *Geothermomètres chimiques*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (2nd Ser.), section III, 2, 183-189.

Sánchez Navarro, J.A., Coloma López, P. y Pérez-García, A. (2004). *Hydrogeology Journal* 12, 601-609.

Truesdell, A.H. (1976). *Geochemical Techniques in Exploration*. Summary of Section III. En: *Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, California, USA, 20-29 May 1975, pp. iii-xxix.