

# Modelo Conceptual para el Sistema Geotermal de Alhama-Jaraba (Cordillera Ibérica, España)

/ LUIS FRANCISCO AUQUÉ SANZ (1,\*), MARIA JOSÉ GIMENO SERRANO (1), PATRICIA ACERO SALAZAR (1), JAVIER BERNARDO GÓMEZ JIMÉNEZ (1), MARIA PILAR ASTA ANDRÉS (2)

(1) Área de Petrología y Geoquímica, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Geología, Universidad de Zaragoza, Zaragoza (España)

(2) Departamento de Geología Ambiental, Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera"-CSIC. C/Lluís Solé i Sabaris s/n, 08028 Barcelona (España)

## INTRODUCCIÓN.

Los manantiales de Jaraba y Alhama, situados en el extremo suroccidental de la provincia de Zaragoza (Fig. 1), forman parte de una de las principales manifestaciones termales de Aragón. Los manantiales de mayor caudal y aprovechamiento son los de Jaraba, con un caudal de entre 300 y 600 l/s, y los de Alhama de Aragón, con un caudal total estimado entre 350 y 550 l/s. (Sanchez Navarro *et al.*, 2000; Pinuaga *et al.*, 2004)

Geológicamente, estas manifestaciones termales se sitúan en el borde occidental de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica, en el contacto con la cuenca terciaria de Almazán. Los manantiales se asocian a los materiales carbonatados del Cretácico Superior que, junto con los del Jurásico, constituyen los principales acuíferos de la zona. La disposición de los principales manantiales termales (y no termales), situados a favor de los cauces de los ríos más importantes, apoyan la hipótesis de un control estructural del flujo, ya que éstos se encuentran encajados a favor de fracturas de dirección similar a las propuestas para las dos principales pautas de flujo subterráneo (Fig. 1).

En este trabajo se analiza la evolución geoquímica asociada a la pauta de dirección SW-NE, con la principal área de recarga situada en los materiales carbonatados de la Sierra del Solorio (Fig. 1) y desarrollada por debajo de los rellenos terciarios de la cuenca de Almazán hacia Jaraba y, finalmente, Alhama de Aragón. Hasta el momento, existen muy pocos trabajos sobre los procesos responsables de la evolución geoquímica de este sistema geotermal. En este trabajo se combinan los resultados obtenidos mediante técnicas de modelización geoquímica y geotermométrica para plantear un

modelo conceptual sobre la evolución de las aguas a lo largo de la pauta de flujo seleccionada en el sistema de Alhama-Jaraba.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Aunque existe una considerable variabilidad hidrogeoquímica para los manantiales muestreados, éstos se disponen claramente según una tendencia de evolución composicional a lo largo de la línea de flujo desde las áreas de recarga (Mochales) hasta los manantiales de Jaraba y, finalmente, Alhama (Fig. 1). La menor variabilidad de parámetros en Alhama de Aragón sugiere que la influencia de procesos secundarios durante el ascenso de las soluciones es menor que en los manantiales de Jaraba. A priori, y dado el tipo de variación observado en esta última localidad (de temperatura y quimismo a la vez), puede pensarse en la actuación efectiva de procesos de mezcla de aguas y, posiblemente, de reacciones heterogéneas concomitantes.

La combinación de los resultados obtenidos mediante varias técnicas geotermométricas clásicas con los resultados de modelización geoquímica (empleando códigos como PHREEQC; Parkhurst y Appelo, 1999) indican un rango probable de temperaturas para el reservorio en profundidad de entre 40 y 50°C. Este rango de temperaturas permite establecer de forma preliminar una profundidad máxima para el reservorio de entre 750 y 1100 m, coincidente con el espesor del relleno terciario estimado para la zona NE de la cuenca de Almazán, por debajo del cual se considera que circulan las aguas estudiadas.

Los cálculos de especiación-solubilidad realizados con PHREEQC y usando la base de datos termodinámicos WATEQ4F; Ball y Nordstrom, 1991), junto

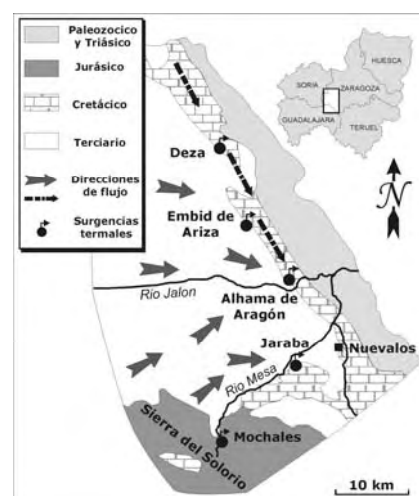


Fig. 1. Esquema geológico e hidrogeológico de síntesis del entorno del sistema termal de Alhama-Jaraba.

con el estudio de las pautas de evolución de unos elementos frente a otros (Fig. 2) han permitido identificar algunos de los procesos geoquímicos más relevantes en la evolución composicional de las aguas del sistema termal de Alhama-Jaraba: la existencia de procesos de pérdida de CO<sub>2</sub> durante los tramos finales del ascenso de las aguas hacia los manantiales y los procesos de desdolorización.

Todos los manantiales estudiados se encuentran muy subsaturados con respecto a halita, yeso y anhidrita pero en equilibrio (o próximas al equilibrio) respecto a calcita y dolomita. La presión parcial de CO<sub>2</sub> calculada para todas las fuentes incluidas en este estudio es más elevada (log pCO<sub>2</sub> entre -1.3 y -2.4) y se encuentra en una situación de total desequilibrio respecto a la atmosférica (log pCO<sub>2</sub> = -3.5), lo que sugiere la posible existencia de procesos de pérdida de CO<sub>2</sub> en los tramos más superficiales del ascenso de las aguas termales hasta los manantiales. La existencia de estos procesos de desgasificación y su influencia sobre la composición de las

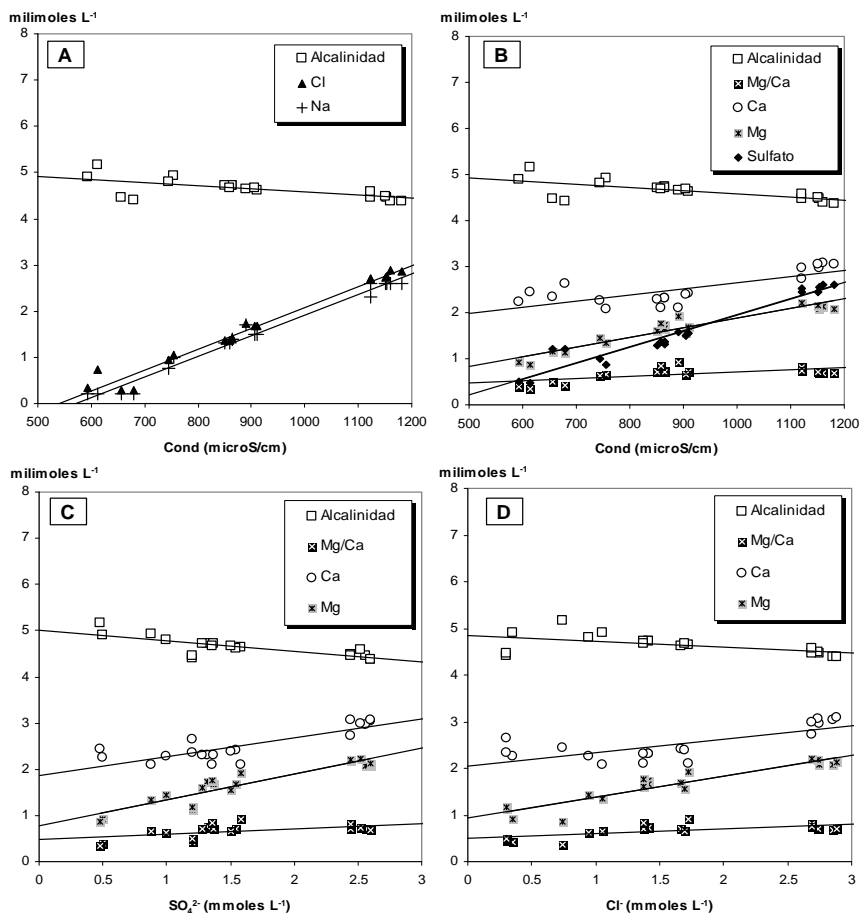


fig 2. Representación de la evolución de los principales parámetros composicionales frente a la conductividad (A y B),  $\text{SO}_4^{2-}$  (C), y  $\text{Cl}^-$  (D) para las soluciones del sistema termal de Alhama-Jaraba.

aguas en los manantiales ha sido además comprobada con éxito mediante simulaciones geoquímicas realizadas con el código PHREEQC.

Considerando la litología por la que circulan las aguas, las pautas generales de evolución de elementos mayores (Figura 2) y los resultados de los cálculos de especiación-solubilidad indican que la composición de las aguas está inicialmente determinada por la interacción con minerales carbonatados (calcita y dolomita), haciéndose progresivamente más importante la disolución de sulfato cálcico y de halita. Por lo tanto, las variables más adecuadas para caracterizar el sentido evolutivo de estas aguas son el cloruro y el sulfato, a las que podemos añadir la conductividad eléctrica de las soluciones por su relación con el incremento en el total de sólidos disueltos conforme aumenta el grado de evolución geoquímica de las mismas.

Las pautas de Ca y Mg frente al sulfato presentan coeficientes de correlación positivos de 0,9, manteniendo una pauta

creciente groseramente paralela (Figura 2). Sin embargo, en contraste con lo esperable en un proceso de disolución de yeso o anhidrita, el incremento del sulfato es progresivamente mayor que el sufrido por el Ca en solución (Figura 2). Ello indica la existencia de un proceso de extracción de este último elemento proporcionalmente más importante conforme avanza el proceso evolutivo representado por la adición de sulfato.

Además, la alcalinidad (como  $\text{HCO}_3^-$ ) presenta una tendencia decreciente frente al propio avance de las variables de progreso elegidas y, por lo tanto, también con respecto a las concentraciones de Ca y Mg (Figuras 2 B y C). Esta evolución indica que los procesos de interacción agua-carbonatos se encuentran, al menos parcialmente, controlados por reacciones de precipitación de alguna fase carbonatada que extrae de la solución parte del calcio aportado por la disolución de yeso y/o anhidrita, provocando la observada disminución neta del  $\text{HCO}_3^-$  y la menor tasa de crecimiento del calcio frente al

avance del proceso global de evolución. La única explicación posible que justifica simultáneamente todas las observaciones descritas es la existencia de un proceso de desdolomitización, en el cual la disolución de dolomita tiene lugar paralelamente a la precipitación de calcita. A la vista de la situación generalizada de equilibrio respecto a calcita y dolomita en los manantiales y del mantenimiento de una relación Mg/Ca constante (Fig. 2), este proceso está plenamente justificado.

## CONCLUSIONES.

La combinación de los resultados obtenidos con distintas técnicas, incluyendo modelización geoquímica, en el sistema geotermal de Alhama-Jaraba ha permitido caracterizar este sistema, identificar los principales procesos que determinan su evolución, y acotar tanto las temperaturas que las aguas pueden alcanzar en profundidad como la profundidad máxima de circulación en este sistema.

## AGRADECIMIENTOS.

Parte de este trabajo ha sido realizado con la financiación del Proyecto PSE-120000-2007-27 del Ministerio de Industria del Gobierno de España.

## REFERENCIAS.

- Ball, J.W. & Nordstrom, D.K. (1991): *User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 91-183, 189 pp.
- Parkhurst, D. L. & Appelo, C.A.J. (1999): *User's Guide to PHREEQC (Version 2), a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. Water Resources Research Investigations Report 99-4259, 312 p.
- Pinuaga, J.I., Garrido, E., Ramírez, A. (2004): *Geología, hidrogeología y protección de los balnearios de Jaraba (Zaragoza)*. An. R. Acad. Farm., **70**, 597-610.
- Sanchez Navarro, J.A., Coloma, P., Pérez-García, A. (2004): *Evaluation of geothermal flow at the springs in Aragon (Spain), and its relation to geologic structure*. Hydrogeology Journal, **12**, 601-609.