

El estudio hidrogeológico de los manantiales y su aplicación geológica: caso de las aguas termales, carbónicas y sulfhídricas de Cataluña.

por J. F. ALBERT, J. COROMINAS y C. PARÍS

ABSTRACT

The results obtained by the authors after the hydrogeological study of hot, carbonic and sulphide springs in Catalonia are summarized. These results have been obtained by techniques which are sometimes quite different from those used in the methodology of the hydrological studies of single springs.

RESUMEN

En este trabajo se resumen los resultados obtenidos por los autores en el estudio hidrogeológico de los manantiales termales, carbónicos y sulfhídricos de Cataluña, resultados hallados en base a la aplicación de técnicas que, en ocasiones, escapan de las normalmente empleadas en la metodología de estudio hidrogeológico de manantiales simples.

INTRODUCCIÓN

El quimismo de las aguas subterráneas está evidentemente en estrecha relación con las características geológicas del acuífero y con las condiciones físico-químicas y aún bio-químicas del mismo, las cuales, en conjunto, condicionan la mineralización del agua y su evolución química en el espacio y en el tiempo. Es lógico, por tanto, que el estudio hidro-químico e hidrogeoquímico del agua de un acuífero permita obtener información diversa sobre las características del mismo.

Un problema importante que se plantea en estos casos, es el de disponer de accesos al acuífero que permitan obtener las muestras de agua correspondientes, especialmente cuando faltan obras de captación o de reconocimiento, y es particularmente en estos casos cuando el interés de los manantiales se pone de manifiesto, por constituir muchas veces el único acceso posible al agua del acuífero.

El simple análisis químico del agua puede proporcionar información sobre la composición litológica del acuífero, como es el caso de los acuíferos profundos y de la litología poco conocida, o bien puede poner de manifiesto la presencia de componentes minoritarios solubles, aunque, claro está, las relaciones agua-litología no siempre sean fáciles de establecer y requieran un conocimiento mínimo del complejo hidráulico considerado. En los manantiales termales el conocimiento de algunos parámetros químicos permite el cálculo de las temperaturas del almacén a través de diversos métodos termométricos.

Finalmente cabe considerar también que los principales

procesos sedimentarios y de alteración de materiales tienen lugar en medios acuosos y que su estudio precisa muchas veces de métodos hidrogeológicos. Sobre este particular se considera el caso de los manantiales sulfhídricos y el interés de su estudio para el conocimiento del ciclo del azufre en los medios acuosos naturales.

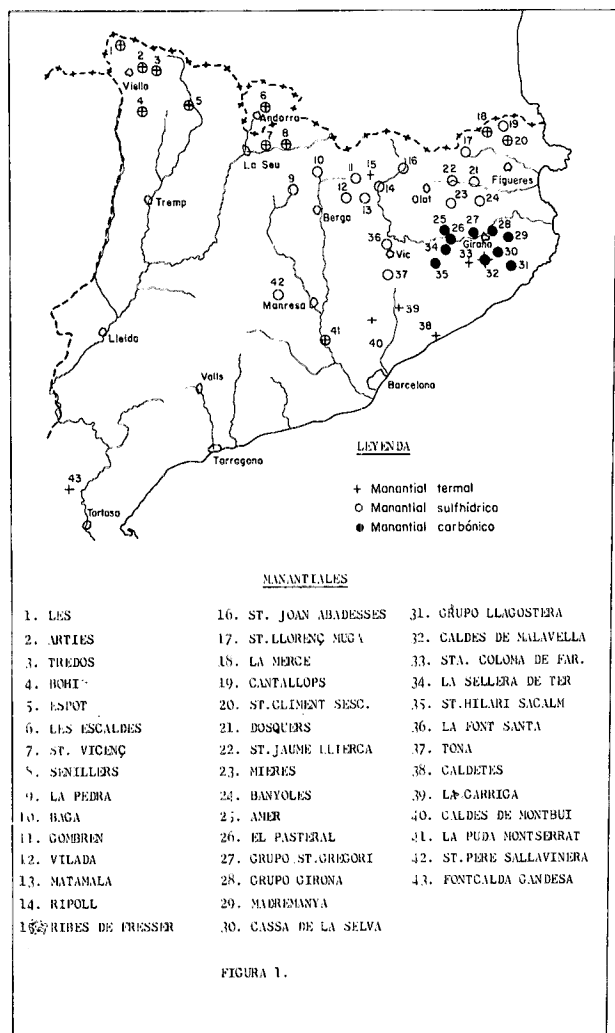
La metodología y los resultados que a continuación se exponen se han obtenido del estudio de cuarenta y tres surgencias o grupos de surgencias de Cataluña, cuya relación y situación se expone en la figura 1. De estos manantiales, seis son termales (Ribes de Freser, Sta. Coloma de Farners, Caldetes, La Garriga, Caldes de Montbui y Font Calda de Gadesa); uno es carbónico-termal (Caldes de Malavella), nueve son carbónicos fríos (Amer, El Pasteral, Grupo St. Gregori, grupo de Gerona, Madremanya, Cassà de la Selva, grupo de Llagostera, la Cellera de Ter y St. Hilari Sacalm), once son sulfhídrico-termales (Lés, Arties, Caldes de Boí, Tredòs, Espot, Les Escaldes, St. Vicenç, Senillers, Ntra. Sra. de la Mercè, St. Climent Sesebes y la Puda de Montserrat), y dieciséis son sulfhídricos fríos (La Pedra, Bagà, Gombren, Vilada, Matamala, Ripoll, St. Joan de les Abadesses, St. Lorenç de la Muga, Cantallops, Dosquers, St. Jaume de Llierca, Mieres, Banyoles, La Font Santa de Torelló, Tona y St. Pere Sallavina).

En este trabajo no se describe el entorno geológico de las surgencias ni sus características hidrogeológicas particulares, para lo cual remitimos a los lectores a Albert (1974 y 1976), París-Albert (1976) y Corominas (1978), trabajos en los que se describen detalladamente estos manantiales.

MANANTIALES TERMALES

El estudio de los manantiales, considerados éstos como sistemas de descarga de sistemas acuíferos, se basa en tres técnicas generales que, con toda seguridad, en el caso de los termales, alcanzan su plenitud en cuanto a cantidad de información que pueden suministrar.

Todos los casos conocidos de manifestaciones geotérmicas en forma de fluidos termales, están constituidos por aguas meteóricas que, una vez infiltradas y después de haber experimentado un período más o menos largo de residencia en profundidad, donde se han calentado, surgen a la superfi-



cie en base a determinadas condiciones hidro y termodinámicas.

Este proceso puede ser cuantificado mediante las técnicas antes referidas, a saber: estudio hidráulico de los manantiales y estudio isotópico y geoquímico de los fluidos descargados:

Estudio hidráulico de los manantiales

Esta metodología, apta para todo tipo de manantiales, permite determinar la relación entre alimentación, tránsito y descarga. El estudio de la recarga, el cálculo de coeficientes de agotamiento, etc., constituyen labores imprescindibles para comparar la dinámica del sistema y establecer un orden de magnitud de los parámetros hidrogeológicos (transmisividad, almacenamiento, etc.) que lo caracterizan.

Estudio isotópico de los fluidos geotérmicos

La dinámica del sistema acuífero puede precisarse todavía más con la ayuda de trazadores naturales localizados en la

propia molécula de agua, a saber, los isótopos del hidrógeno y del oxígeno.

Los isótopos estables que pueden integrar la molécula de agua, deuterio y oxígeno-18, constituyen preciados instrumentos a la hora de cuantificar, por ejemplo, la zona de alimentación de una determinada manifestación geotérmica. El fraccionamiento isotópico que tiene lugar por efecto de altura, continentalidad y latitud, permite determinar las leyes de variabilidad de los referidos isótopos en las tres direcciones del espacio, por lo que resulta sencillo, a partir de la muestra analizada, conocer el lugar donde se realizó la infiltración del agua que de nuevo, ahora, vuelve a aparecer en superficie.

El isótopo más pesado del hidrógeno, el tritio, como isótopo radioactivo de período ideal (12,26 años) para gran parte de modelos hidrogeológicos, permite acotar la cuarta dimensión necesaria para todo estudio completo: el tiempo de tránsito del fluido en cuestión.

Estudio químico de los fluidos geotérmicos

El estudio químico de los fluidos termales permite, con la ayuda de las técnicas isotópicas referidas, determinar dos características muy importantes del fluido geotérmico, además del natural conocimiento de su calidad: la temperatura del almacén y la posible litología de la formación que actúa como tal en profundidad.

Para tiempos de residencia largos en los que el fluido termal llega a equilibrarse químicamente con la roca almacén, existen una serie de relaciones iónicas que actúan como geotermómetros químicos y permiten calcular la temperatura en profundidad a la que ha tenido lugar el último equilibrio agua-roca. El contenido en SiO₂, la relación Na/K, formulaciones empíricas entre los contenidos de Na, K y Ca, etc., son los geotermómetros clásicos más ampliamente difundidos.

La coincidencia de los órdenes de magnitud de las temperaturas en profundidad derivados de la aplicación de estos geotermómetros, basados en criterios químicos distintos, permite cerciorarse de las condiciones térmicas reinantes en el almacén. Una vez fijada esta temperatura, el estudio termodinámico del comportamiento del agua con diferentes minerales tipo en las condiciones calculadas, permite deducir la naturaleza petrológica de la roca almacén con cierta aproximación. El propio quimismo del agua y el contenido en oxígeno-18 son complementos valiosos en esta interpretación. En este orden de cosas, el equilibrio del sistema agua-albita-anortita ha sido de inestimable ayuda para conocer la geotermia de Cataluña y de las islas Canarias (Albert, 1975, 1976).

Resultados obtenidos

La aplicación de las técnicas referidas a las manifestaciones termales de Cataluña, que se presentan siempre en forma de manantiales de agua caliente cuya temperatura oscila entre 20° y 70°C, permite llegar a conclusiones como las siguientes:

— Los manantiales se caracterizan por una total estabilidad térmica y de descarga, que resulta independiente de las variaciones estacionales de la alimentación. Este régimen de descarga constante implica un modelo hidráulico en el que la

recarga y/o el almacenamiento es muy superior a la descarga, siendo la transmisividad (al menos del circuito de salida) también reducida.

– Los análisis del contenido en tritio ponen de manifiesto que las aguas termales son aguas meteóricas que no corresponden a los aportes de los últimos veinte-veinticinco años. Su tiempo de residencia es superior, por tanto a esta cifra.

– Los isótopos estables, deuterio y oxígeno-18, ponen de manifiesto en la mayoría de los casos, un grado de fraccionamiento isotópico por vaporización acorde con los resultados de los geotérmicos químicos.

– La aplicación de los cálculos geotermométricos permite separar claramente aquellos manantiales que constituyen mecanismos de descarga de sistemas con clara implicación geotérmica (80°–120° C), de los que se obedecen a un simple calentamiento del agua durante su tránsito subterráneo, no diferenciando sustancialmente su temperatura de salida de la alcanzada en profundidad.

– En determinados casos, la presencia de posible fase vapor se detecta, ya no sólo por el fraccionamiento isotópico y los cálculos geotermométricos, sino por el simple análisis químico. Tal es el caso de determinados manantiales pirenaicos cuyas aguas, con un tiempo de tránsito de más de 20 años a temperaturas superiores a los 100° C, contienen únicamente de 2 a 3 meq/l de mineralización total con más de 200 ppm de SiO₂.

– La comparación del quimismo del agua termal con el estudio termodinámico de determinados equilibrios agua-mineral, y concretamente con el anteriormente referido agua-anortita, pone de manifiesto que el termalismo catalán se genera esencialmente en materiales de naturaleza granitoide.

MANANTIALES CARBONICOS

La profusión de manantiales carbónicos existente en Cataluña, y especialmente en la provincia de Gerona, ha motivado su estudio y la elaboración de una metodología de trabajo particular.

En principio, la dificultad para su estudio es ostensiblemente mayor, debido a que las tres grandes directrices antes citadas suelen ser de difícil aplicación por los siguientes motivos:

– Resulta difícil determinar las leyes de descarga de estos manantiales, ya que su caudal de emisión viene determinado en cada momento por la cantidad de CO₂ que acompaña al agua. Existe una cierta relación cuantificable entre presión atmosférica, emisión de CO₂ y régimen de descarga que permite establecer correlaciones estadísticas y, con ellas, determinar la tendencia del comportamiento hidráulico del manantial.

– Los análisis isotópicos funcionan en cuanto a isótopos del hidrógeno se refiere (deuterio y tritio). El oxígeno-18 presenta frecuentes y aleatorias variaciones por causa del CO₂. No obstante, en determinados casos han sido de gran utilidad para comprender la naturaleza y origen del referido gas.

– Los geotermómetros químicos, sobre todo los basados en equilibrios con el calcio (Na-K-Ca, albita-anortita, etc.), han de emplearse con sumo cuidado, debido a las interacciones de este catión con el CO₂ en forma de CO₃Ca o derivados. Las técnicas de geotermometría de gases están siendo puestas a punto por los autores en estos momentos.

Resultados obtenidos

Como resultado a los estudios realizados con los manantiales carbónicos de la provincia de Gerona (Paris y Albert, 1976) puede concluirse que:

– Los manantiales carbónicos termales están implicados en un activo proceso geotérmico en profundidad, del orden de los 110° C.

– Los manantiales carbónicos fríos, que son mayoría, se agrupan en dos familias geoquímicas completamente distintas:

Los de naturaleza bicarbonatada cálcica, que son simples aguas meteóricas a las que en su tránsito subterráneo se les incorpora una cantidad variable en el tiempo de CO₂, que les facilita el ataque químico a la roca y su salida al exterior en función de los valores de presión parcial del gas.

Los de naturaleza bicarbonatada sódica que, aunque fríos en el momento de surgir a la superficie, han experimentado un proceso termal en profundidad siempre inferior a los 100° C, que les imprime un carácter geoquímico e isotópico completamente diferente de las cálcicas. Los tiempos de residencia son sensiblemente mayores y las derivas de oxígeno – 18 más acusadas.

MANANTIALES SULFHIDRICOS

El estudio de estos manantiales y, particularmente, de la génesis del gas sulfhídrico de sus aguas, pone de manifiesto la importancia de la mediación biológica en los procesos redox del azufre y, dado que en algunos de ellos se ha detectado un ciclo redox completo, es de considerar el interés que su estudio puede tener para definir la evolución de los compuestos de azufre en los ambientes sedimentarios naturales, como por ejemplo en la génesis de los sulfuros sedimentarios y su alteración posterior. Los resultados obtenidos pueden también servir para llamar la atención sobre la importancia de la mediación biológica como explicación de aquellos procesos redox que en condiciones ambientales son termodinámicamente inviables.

La metodología utilizada en el estudio de estos manantiales, puede esquematizarse también en tres puntos, a saber:

Estudio hidráulico

Cuya finalidad ha quedado suficientemente desarrollada al hablar de los manantiales termales.

Estudio hidrogeoquímico

El conocimiento físico-químico del agua que mana de estas surgencias, y de la naturaleza litológica de los respectivos acuíferos, es previo a toda investigación ulterior sobre el tema, ya que permite establecer una primera aproximación sobre las diversas condiciones que intervienen en la formación de un manantial sulfhídrico, y permite también sentar las bases para el estudio genético del SH₂ (Corominas, 1978).

Estudio hidrobioquímico

Dado que en la mayoría de los casos estudiados la única

fuelle de azufre disponible la constituyen los sulfatos presentes en la composición litológica de los acuíferos o disueltos en el agua que alimenta las surgencias, se puede suponer que el gas sulfhídrico se forma por reducción de estos sulfatos.

El problema que plantea la reducción de sulfatos a sulfhídrico en los ambientes acuosos naturales, es la dificultad físico-química del proceso, que requiere unas condiciones reductoras muy difíciles de obtener (Stumm y Morgan, 1970; Berner, 1971). Sin embargo, en estos ambientes la sulfato-reducción puede darse mediante la intervención de microorganismos como catalizadores necesarios. Hutchinson (1957), ya considera la sulfatoreducción como un resultado de la actividad de bacterias heterótrofas y anaerobias, que hacen servir el sulfato como aceptor de hidrógeno en la oxidación metabólica de la materia orgánica, bajo condiciones muy reductoras y en ausencia de oxígeno, y considera, como también lo hacen los autores antes citados, esta actividad como la principal responsable de la producción de sulfhídrico en los ambientes naturales.

El gas sulfhídrico formado, al pasar a condiciones oxigenadas, se oxida espontáneamente a sulfato, y esta reacción, aunque espontánea, puede ser también mediada biológicamente. Sin embargo, el campo de las bacterias sulfo-oxidantes no está bien definido, debido principalmente a la conducta alternante que presentan muchos de estos microorganismos, cuya acción sulfo-oxidante queda supeditada a las condiciones ambientales.

Hechas estas consideraciones generales sobre el ciclo del azufre en los ambientes naturales, el problema inmediato que se plantea es el de la viabilidad del modelo en los manantiales considerados. Para su comprobación se operó de la forma que a continuación se describe:

La determinación de la presencia de microorganismos sulfuroreductores en los acuíferos que alimentan las surgencias, se realizó utilizando el cultivo de Baars (1930), que consiste fundamentalmente en una solución neutra o ligeramente alcalina de sulfatos, lactato sódico y hierro metálico (como reactivo). El cultivo se preparó en frascos herméticos y esterilizados, con tapón de goma perforable y de unos 15-20 cc de contenido. En cada frasco se inyectaba 1 cc de agua del manantial correspondiente, utilizando aguja y jeringa esterilizadas. Los cultivos así preparados, dos por manantial, se mantuvieron en incubación a 30°C durante 25 días. La reacción positiva de este cultivo, se manifiesta por la formación de un precipitado negro de sulfuro de hierro.

La mediación biológica en la oxidación del sulfhídrico del agua que mana de los manantiales, se estudió por determinación taxonómica de los crecimientos de bacterias filamentosas que se desarrollan en las proximidades de las surgencias. (Tanto en este caso como en el anterior, se contó con la colaboración de especialistas del Instituto de Investigaciones Pesqueras de Barcelona).

Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en el estudio de los manantiales

sulfhídricos de Cataluña, pueden resumirse en las conclusiones que a continuación se especifican:

- Hay que considerar dos tipos de manantiales sulfhídricos con características genéticas e hidráulicas netamente diferenciadas: los manantiales fríos, relacionados con acuíferos superficiales, y los manantiales termales, asociados a acuíferos profundos e implicados en la problemática planteada en apartados anteriores.

- Los manantiales sulfhídricos estudiados presentan una distribución geológica peculiar. Por un lado, los manantiales fríos se sitúan sobre formaciones margosas terciarias, especialmente sobre las margas del Eoceno marino, mientras los termales están especialmente asociados a materiales cristalinos con condiciones de tipo estructural.

- El quimismo de las aguas es muy variable en los manantiales fríos y muy constante en los termales, hecho condicionado por las características litológicas de los respectivos acuíferos.

- Se ha demostrado la presencia de bacterias reductoras de sulfatos en tres manantiales fríos y en dos de termales, sobre un total de quince estudiados.

- Prácticamente en todos los manantiales estudiados se han observado crecimientos de bacterias sulfo-oxidantes en las proximidades de las surgencias. Las determinaciones hechas corresponden al género *Beggiatoa*.

- Queda demostrado, en algunos casos, que el azufre, a nivel de las aguas estudiadas, está sometido a un proceso redox cíclico (reducción de sulfatos a sulfhídrico y oxidación de sulfhídrico a sulfato) en el que la mediación bacteriana juega un papel fundamental.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBERT, J. F. (1974): «Les Sources thermales des Pyrénées catalans». *Symposium International pour les Eaux Minérales, Studii Tehnice si Economice*. Institut de Geologie si Geofisica. Seria E Mr. 12, p. 21-26. Bucarest.
- ALBERT, J. F. (1975): «El equilibrio albita-anortita como termómetro hidrogeotérmico en zonas graníticas». *Acta Geol. Hisp.*, año X, n.º 5, pp. 170-174.
- ALBERT, J. F. (1976): «Termometría hidroquímica de las aguas de Gran Canaria». *I Simposium Internacional sobre el Aprovechamiento de Nuevas Fuentes de Energía*. Las Palmas.
- ALBERT, J. F. (1976): «Estudio geotérmico preliminar de Cataluña». Tesis doctoral, Univ. Barcelona. 461 pp. Inédito.
- BERNER, R. A. (1971): «Principles of Chemical Sedimentology». 240 pp. Mc. Graw-Hill Book Cny. New York.
- COROMINAS, J. (1978): «Condiciones hidrogeológicas de los manantiales sulfhídricos de Cataluña». *Acta Geol. Hisp.* t. XII, n.º 1, pp. 26-30.
- HUTCHINSON, G. E. (1957): «A Treatise on Limnology, V. I. (Geography, Physics and Chemistry)» John Wiley and Sons, Inc. New York.
- PARIS, C. y ALBERT, J. F. (1976): «Sobre la génesis de las aguas carbónicas de la provincia de Gerona». *Acta Geol. Hisp.*, tomo XI, n.º 5, pp. 124-128.
- STUMM, W. y MORGAN, J. J. (1970): «Aquatic Chemistry. An Introduction Emphasizing Chemical Equilibrium in Natural Waters». 583 pp. John Wiley and Sons, Inc. New York.

Recibido, setiembre 1978.