

Sobre la génesis de las aguas carbónicas de la Provincia de Gerona *

por CARMEN PARÍS ** y JOSÉ F. ALBERT-BELTRÁN ***

RESUMEN

Las aguas carbónicas de la provincia de Gerona están ligadas en profundidad a un proceso termal de baja entalpía. El hecho se pone de manifiesto al comparar el quimismo de estas aguas con los típicamente termales de Cataluña y aplicar geotermómetros químicos. Se comprueban las limitaciones de los geotermómetros clásicos ante la presencia de CO₂ y aparece el basado en el equilibrio albite-anortita como el de aplicación más idónea junto con la gráfica de solubilidad del SiO₂ de SIEVER (1962).

SUMMARY

Carbonic waters of Gerona province are related in depth with a thermal process of low enthalpy. This fact is inferred by comparison of their analysis with those of thermal springs of Cataluña and by application of classical geothermometers. Some of them are not available due to CO₂ presence, and albite-anorthite equilibrium appears as the best geothermometer as well as SiO₂ solubility curve of SIEVER (1962).

INTRODUCCIÓN

La descriptiva de los manantiales carbónicos de la provincia de Gerona ha sido objeto de numerosos trabajos, entre los que cabe destacar la exhaustiva síntesis efectuada por SOLÉ SABARÍS en 1946. En ella se hace patente la estrecha relación entre los citados manantiales y las grandes fallas directrices a escala regional que determinan la estructura en bloques de la provincia de Gerona y la presencia de manifestaciones volcánicas de edad neógena y cuaternaria.

La presencia de estas manifestaciones carbónicas, al igual que la existencia de los manantiales termales de Sta. Coloma de Farners y Caldes de Malavella (termal y carbónica) se han atribuido siempre a manifestaciones póstumas de este volcanismo plio-cuater-

nario, si bien nunca se ha demostrado una interdependencia total o parcial entre volcanismo, termalismo y presencia de CO₂.

En el presente trabajo se pone de manifiesto la relación genética existente en la provincia de Gerona entre las aguas termales y las carbónicas como resultado de un único proceso termal en profundidad.

SITUACIÓN DE LOS MANANTIALES

Los manantiales carbónicos de Gerona, al igual que los termales de toda Cataluña, aparecen en los bordes de las grandes fallas que determinan la tectónica regional. Las fracturas N-S y NW-SE que dan lugar a las dos grandes dovelas hundidas del Ampurdán y La Selva, junto con los respectivos horsts, Guillerías y Gabarras, constituyen las vías preferentes de circulación ascendente de las mencionadas aguas gaseosas.

SOLÉ SABARÍS (1946) establece su distribución en grupos en función de su localización geográfica y a la vez estructural. Emplearemos su mismo criterio (Fig. 1):

A. — Grupo de las Guillerías:

Relacionado con las grandes fallas paralelas de dirección NW-SE, las mismas que más al Norte dan lugar a la fosa tectónica en la que se emplaza el volcanismo de Olot:

— Falla del Brugent. Pasa por Amer-Las Planes-Joanetes-Riudaura.

1. — Manantial de Amer
2. — El Pasteral
3. — La Sellera

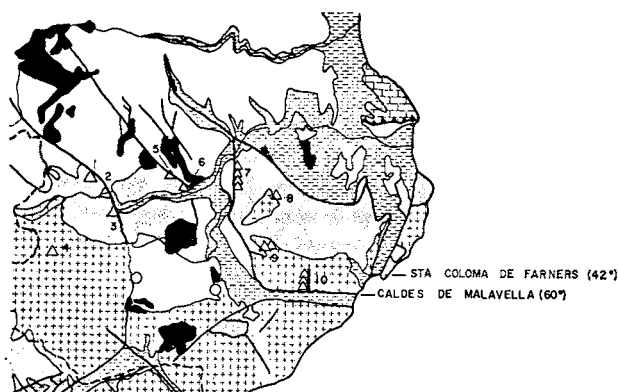
— Lalla de Llémána. Puede seguirse por St. Martí de Llémána y Sta. Pau.

5. — St. Gregori
6. — Coromines

* Este trabajo constituye parte de la Tesis de Licenciatura del primero de los que suscriben.

** Departamento de Geotectónica, Facultad de Geología de Barcelona.

*** Compañía General de Sondeos. Madrid.



MANANTIALES CARBONICOS

- 1.- AMER
- 2.- EL PARTERAL
- 3.- LA BELLESA
- 4.- SI HILARI SACALM
- 5.- FONT ERGA DE SI. GREGORI
- 6.- FONT SEN COMANES
- 7.- GRUPO DE GERONA
- 8.- MADREMANYA
- 9.- GRUPO DE CASSÀ DE LA SELVA
- 10.- GRUPO DE LLAGOSTERA
- △ MANANTIAL CARBONICO
- MANANTIAL TERMAL

LEYENDA

- CUATERNARIO
BASALTOS
TERCIARIO
- MESOZOICO
- PALEOZOICO
- ROCAS INTRUSIVAS
- FALLA
- CAMBIAIMIENTO

FIG. 1.

Se incluye en este grupo el manantial carbónico de S. Hilario Sacalm (4) que está situado en el centro del horst de las Guillerías, en vez de en los bordes como los ya mencionados.

B. — Grupo de Gerona (7):

Situado en la gran falla N-S que limita la parte occidental del horst de las Gabarras con la dovela hundida de la Selva junto a la propia ciudad de Gerona.

Se han analizado los siguientes manantiales: Costa Roja, Congost, Pedret, Miralles, Fita, Pólvora, Lliure, así como el pozo de Torres-Hostench (Sarriá de Ter) con agua carbónica a 30° C.

C. — Frente norte de las Gabarras:

Madremanya (8): situada en la parte septentrional del horst en una dislocación interna que pone en contacto granito con Paleozoico.

D. — Grupo de Cassà de la Selva (9):

SOLÉ SABARÍS (1946) cita dos manantiales: Font del Ganso y Font de Can Basil. No obstante, y según las informaciones de los lugareños, el segundo no existe en la actualidad. La Font del Ganso se sitúa cerca del borde NW del macizo de las Gabarras, también en contacto Paleozoico-granito.

E. — Grupo de Llagostera (10):

En el borde meridional del horst de las Gabarras, próximo al contacto con la fosa de Sta. Cristina de Aro. Lo integran los siguientes puntos de agua:

- Manantial de Bell-Lloch
- Pozo de la estación de Bell-Lloch

- Manantial de Salenys
- Manantial de Penedes

Como complemento a estas manifestaciones carbónicas se adjuntan los análisis de los dos manantiales termales existentes en la fosa de la Selva: Caldes de Malavella (60° C y CO₂) y Sta. Coloma de Farners (42° C).

La simple visión del contexto geológico pone de manifiesto que todos los manantiales reseñados están relacionados con una importante tectónica de zócalo la cual motiva que la circulación del agua transcurra, al menos en una parte importante de su recorrido, por materiales graníticos.

HIDROQUÍMICA

En la tabla 1 se resumen las características químicas de las aguas pertenecientes al inventario antes citado.

Los manantiales termales de Cataluña, y los dos mencionados existentes en esta zona no escapan a esta salvedad, se caracterizan por poseer un elevado contenido de sodio (85-98 % del total de miliequivalentes de cationes) y una cantidad de sílice relativamente importante respecto a su contenido total en sales que en ocasiones puede llegar a sobrepasar los 100 ppm (ALBERT, 1974 y 1975).

Estas características químicas son consecuencia de un proceso termal en profundidad (WHITE, 1970) y permiten, a través de ellas y de otras relaciones geoquímicas, conocer la temperatura a la que se ha establecido el equilibrio agua-roca en ausencia de mezcla con aguas meteóricas recientes.

Las aguas carbónicas analizadas presentan dos facies hidroquímicas perfectamente diferenciadas: una bicarbonatado sódica y otra bicarbonatado cálcica.

Las bicarbonatado sódicas poseen un quimismo cualitativamente idéntico al de las aguas termales del resto de Cataluña (ALBERT 1974 y 1975), aunque más mineralizadas por la presencia de CO₂. El manantial de Caldes de Malavella, termal (60°) y carbónico a la vez, presenta una composición química cuantitativa y cualitativamente muy semejante a estos manantiales carbónicos sódicos fríos mencionados.

Los bicarbonatado cálcicos, poseen, no obstante, elevadas concentraciones de SiO₂ totalmente impropias de aguas de circulación subterránea normal (Tabla 1). Adviértase, por otra parte, que la solubilidad de la sílice es prácticamente independiente del pH entre valores de 3 a 8,5, por lo que la acción del CO₂ resulta en este caso muy mitigada. La sola presencia de estas cantidades de sílice ya hace pensar en un proceso termal en profundidad.

TERMOMETRÍA HIDROQUÍMICA

Con el fin de conocer cuál ha sido la temperatura que ha afectado a estas aguas en profundidad, se han

TABLA 1.

Localidad	T. °C	pH	CO ₃ H ⁻	SO ₄ ⁼	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Fe ⁺⁺	SiO ₂
GUILLERIES											
S. Gregorio	17°	6,0	2.923	307,2	700,0	1.175	29,5	303,0	76,3	4,0	34,7
Coromines	15°	6,5	3.696	240,0	819,0	1.575	53,6	298,0	72,4	5,8	36,6
La Sellera	15°	6,5	2.074	11,5	70,0	505,0	19,6	189,1	50,1	2,7	26,6
El Pasteral	14°	6,0	1.777	105,6	74,2	213,5	5,6	184,3	54,4	7,3	22,0
Amer	14°	5,5	134,2	14,4	22,4	12,6	2,2	36,8	8,2	0,3	16,0
S. Hilari	14°	5,5	1.098	41,2	21,0	68,0	2,5	275,7	306,6	4,0	15,5
LLAGOSTERA											
Pozo estación de Bell-Lloch	—	6,5	1.378	219	117	530	3,5	118	48	1	27
Bell-Lloch	15°	6,5	3.560	5	78	740	8	587	6	5,6	63
Salenys	14°	6,0	1.720	1	45	81	5	404	82	1	65
Penedès	15°	6,5	1.451	4	43	53	2,9	384	52	0,4	52
CASSÀ DE LA SELVA											
F. del Ganso	14°	5,5	463,6	18,6	63,0	48,1	1,9	92,9	34,5	9,0	30,8
GABARRES											
Madremanya	15°	6,0	1.360	23,0	47,6	44,0	2,9	346,2	55,4	12,3	41,1
GIRONA											
Costa Roja	17°	6,0	1.272	1.352	45	48	7,7	813	72	1,1	26
Congost	16°	6,0	2.243	91	138	392	30	324	95	0,1	24
Pedret	14°	5,7	1.360	152	138	156	126	374	13	0,1	21
Miralles	15°	5,5	1.509	14	36	35	39	374	63	2,6	32
F. d'en Fita	15°	5,5	184	24	45	27	5	64	16	—	18
Pólvora	16°	5,5	1.463	16	39	75	4,7	291	87	1,9	29
Lliure	15°	5,5	741	22	34	40	2,2	175	33	2,9	32
Pozo Torras-Hostench	30°	6,5	516	1.701	25	20	7,2	710	101	0,1	23
Caldes de Malavella	60°	6,5	2.078	17,3	585,7	1.050	53,4	13,6	9,2	0,1	66
Sta. Coloma de Farners	42°	7,6	224	19,2	65,5	121	2,2	10,4	2,4	0,1	68

Análisis expresados en ppm.

aplicado los métodos de termometría química usuales (SiO₂, Na/K, Na-K-Ca) y el geotermómetro basado en el equilibrio albita-anortita empleado por LOPOUKHINE (1973) para basaltos y ampliado por J. F. ALBERT (1975) para ser aplicado a materiales graníticos con excelentes resultados en los manantiales termales de Cataluña. Los resultados obtenidos se indican en la tabla 2.

Hay que recalcar que, al no disponer de análisis isotópicos, no se ha podido comprobar la existencia de un auténtico equilibrio agua-roca en función de un largo tiempo de tránsito, ni de mezcla con aguas frías de circulación poco profunda, premisas indispensables a la hora de aplicar con rigor un geotermómetro químico.

La inversión del método Na/K dando lugar a temperaturas aberrantes excesivamente elevadas, como las que se obtienen en el grupo de Gerona, es una consecuencia típica y ampliamente experimentada de que no se ha alcanzado el equilibrio agua-roca para estos cationes. La termometría Na-K-Ca también presenta resultados aberrantes derivados sobre todo de la interacción del CO₂ con el calcio del geotermómetro. Las temperaturas que se han considerado a todas luces erróneas por los motivos mencionados se han reseñado entre paréntesis en la tabla 2.

Como se ha comentado en otras publicaciones (ALBERT, 1975), para bajas concentraciones de SiO₂ que impliquen temperaturas inferiores a 100° C, ofrece mejores resultados la gráfica de solubilidad de SIEVER (1962) que la de FOURNIER y TRUESDELL (1970).

En la tabla 2 pueden observarse los resultados obtenidos. Los diversos métodos termométricos aparecen, para un mismo manantial, mucho más coincidentes en los de naturaleza bicarbonatada sódica que en los de carácter bicarbonatado cálcico.

En los manantiales termales, todos ellos bicarbonatados sódicos, se supone establecido el equilibrio agua-roca debido al largo tiempo de tránsito (superior a 20 años) que arrojan sus análisis de contenido en tritio (ALBERT, 1975).

La coincidencia de resultados de los diversos métodos termométricos, basados en criterios químicos diferentes, aplicados a las aguas carbónicas sódicas, parece ser un buen argumento para suponer que efectivamente este es el orden de magnitud de la temperatura de equilibrio en profundidad. Este hecho se hace patente, sobre todo, en el grupo de las Guillerias donde tres de los manantiales son sódicos (S. Gregorio, Coromines y La Sellera) y se deduce claramente una temperatura de equilibrio de 80° C. Los

TABLA 2.

Manantial carbónico	T. ^a Na/K	T. ^a Na-K-Ca	T. ^a SiO ₂		Temperatura Albita-Anortita
			FOURNIER	SEIWER	
GUILLERIES					
<i>S. Gregorio</i>	77°	(125°)	85°	72°	81°
<i>Coromines</i>	97°	(143°)	88°	74°	92°
<i>La Sella</i>	105°	90°	70°	59°	60°
<i>El Pasteral</i>	(80°)	47°	—	52°	42°
<i>Amer</i>	(240°)	25°	—	39°	< 25°
<i>S. Hilari</i>	(98°)	(11°)	—	38°	25°
LLAGOSTERA					
<i>Pozo estación</i>					
<i>Bell-Lloch</i>	—	48°	70°	61°	65°
<i>Bell-Lloch</i>	40°	44°	112°	102°	92°
<i>Saleny</i>	135°	(21°)	114°	104°	51°
<i>Penedès</i>	127°	(7°)	103°	92°	40°
CASSÀ DE LA SELVA					
<i>F. del Ganso</i>	(108°)	(17°)	80°	66°	37°
GABARRES					
<i>Madremanya</i>	(142°)	(7°)	93°	80°	37°
GIRONA					
<i>Costa Roja</i>	(232°)	(17°)	70°	59°	25°
<i>Congost</i>	(158°)	(198°)	—	56°	58°
<i>Pedret</i>	—	(288°)	—	50°	38°
<i>Miralles</i>	(200°)	(9°)	83°	69°	30°
<i>F. d'en Fita</i>	(258°)	42°	—	44°	24°
<i>Pólvora</i>	(141°)	31°	77°	64°	39°
<i>Lliure</i>	(724°)	(10°)	83°	68°	37°
<i>Pozo T. Hostench</i>	(400°)	(11°)	—	54°	(< 25°)
MANANTIALES TERMALES					
<i>Caldes de Malavella</i>					
	125°	(182°)	113°	103°	125°
<i>Sia. Coloma de Farners</i>					
	59°	68°	144°	105°	100°

restantes manantiales del grupo (cálcicos), presentan temperaturas entre 30° y 45°, aunque estos resultados no son tan fiables como los procedentes de aguas sódicas, de origen claramente termal.

En el grupo de Llagostera, el pozo de la estación de Bell-Lloch también presenta naturaleza sódica, deduciéndose una temperatura de equilibrio cercana a los 60° C.

Las termometrías deducidas de las aguas cálcicas con los diversos métodos químicos aplicados, presentan resultados mucho más dispersos, aunque siguen revelando un ligero proceso termal en profundidad.

CONCLUSIONES

A la luz de los resultados termométricos obtenidos, y por comparación con los manantiales termales puede deducirse la existencia de dos grupos de aguas carbónicas.

— Uno bicarbonatado sódico. Son aguas frías en la salida, cualitativamente idénticas a las termales del resto de Cataluña, y también iguales bajo el punto de vista cuantitativo a las termales y a la vez carbónicas (Caldes de Malavella). Se trata de aguas originalmente termales (60°-80°) que han experimentado un proceso de enfriamiento en el circuito de salida con adición de CO₂ endógeno.

— Otro bicarbonatado cálcico. Aguas de origen termal más incierto al menos en lo que a la temperatura de equilibrio se refiere (30°-60°). Incluso se pone en duda que éste se haya producido. A la luz de los resultados obtenidos, pueden ser aguas meteóricas que han alcanzado una profundidad y/o una temperatura menor en su circuito subterráneo, con adición de CO₂ en una determinada parte del mismo, con toda seguridad en el de salida, facilitando el propio gas la ascensión.

Los manantiales carbónicos de la provincia de Gerona están ligados, por tanto, a un proceso termal que resulta mucho más patente, a la luz de los resultados hidroquímicos, en la falla de Llémána (S. Gregorio, Coromines) y en menor intensidad en la falla del Brugent (La Sella) y Llagostera.

En las restantes zonas con manifestaciones carbónicas, el orden de magnitud de la dependencia termal no resulta tan claro. En el grupo cercano a Gerona, por ejemplo, los manantiales carbónicos son todos fríos, pero gran cantidad de pozos próximos perforados en las formaciones adyacentes extraen agua carbónica a 25°-35°, temperaturas muy próximas a las halladas por el método de la albita-anortita.

BIBLIOGRAFÍA

- ADAMS, J. B. (1968). — Differential solution of plagioclase in supercritical water, *Am. Mineralogist*, 53: 1603-1613.
- ALBERT, J. F. (1974). — Los manantiales termales del Pirineo catalán: primeros resultados, VII Congreso Internacional de Estudios Pirenaicos, Seo de Urgel (Lérida) (en prensa).
- ALBERT, J. F. (1975). — Los manantiales termales de Cataluña como indicadores de posibles campos geotérmicos, Seminario Internacional sobre Aprovechamiento de la Energía Hidrogeotérmica, Madrid (en prensa).
- ALBERT, J. F. (1974). — Les sources thermales des Pyrénées catalanes. Symposium International pour les Eaux Minérales. Studii Tehnice si Economice. Institut de Geologie si Geofizica. Seria E Mr. 12, p. 21-26, Bucarest.
- ALBERT, J. F. (1975): El equilibrio albita-anortita como termómetro hidrogeotérmico en zonas graníticas. *Acta Geológica Hispánica*, 10 (5): 170-174.
- BATALLER, J. R. (1973). — Condiciones geológicas de las aguas minerales de Cataluña. *Publicación n.º 8 del Laboratorio de Geología del Seminario de Barcelona*. 90 p.
- CODINA, R. (1895). — Análisis cualitativo de las aguas ferruginosas bicarbonatadas, variedad acídulas, bicarbonatadas mixtas, silicatadas y litínicas de N.ª Sr. de los Angeles del distrito municipal de Madremaña. Gerona.
- ELLS, A. J. (1970). — Quantitative interpretation of chemical

- characteristics of hydrothermal systems, *Geothermics Spec. Issue 2*: 516-528.
- ELLIS, A. J., MAHON, W. A. I. (1964). — Natural hydrothermal systems and experimental hot water interactions, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 28: 1323-1357.
- ELLIS, A. J., MAHON, W. A. I. (1967): Natural hydrothermal systems and experimental hot water interactions (part II), *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 31: 519-538.
- FAURA I SANS, M. (1909). — Origen geológico de los manantiales de la Font de la Pólvora *Bol. Real Soc. Esp. Hist. Nat.* 9: 376-491.
- FONT I SAGUÉ, N. (1903). — Origen geológicos de los manantiales termominerales de Caldas de Malavella (Gerona). *Bol. Real Soc. Esp. Hist. Nat.*
- FOURNIER, R. O., ROWE, J. J. (1966). — Estimation of underground temperatures from the silica content of water from host springs and wet steam wells, *Amer. Journ. Sci.*, 264: 685-697.
- FOURNIER, R. O., TRUESDELL, A. H. (1970). — Chemical indicators of subsurface temperature applied to hot springs waters of Yellowstone National Park, Wyoming, USA., *Geothermics, Spec. Issue, 2*: 529-535.
- FOURNIER, R. O., TRUESDELL, A. H. (1973). — An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters, *Geochim. et Coschim. Acta*, 37: 1255-1275.
- FOURNIER, R. O., TRUESDELL, A. H. (1974). — Geochemical indicators of subsurface temperature. Part 2: Estimation of temperature and fraction of hot water mixed with cold water, *Journ. Research U.S. Geol. Survey*, 2 (3): 263-270.
- FOURNIER, R. O., WHITE, D. E., TRUESDELL, A. H. (1974). — Geochemical indicators of subsurface temperature. Part 1: Basic assumptions, *Jour. Research U.S. Geol. Survey*, 2 (3): 259-262.
- GARRELS, R. M., CHRIST, C. L. (1967). — *Solutions, Minerals an Equilibria*. Harper and Row, New York, 450 pp.
- HELGESEN, H. C. (1969): Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *Amer. Journ. Scien.*, 267: 729-804.
- LOPOUKHINE, M. (1973). — Rôle de la géochimie dans la recherche géothermique. Applications au Territoire Français des Afars et Issas, *Tesis 3.º ciclo*, Universidad de París, 164 pp.
- LLOPIS LLADÓ, N. (1951). — Estudio hidrogeológico de los alrededores de Caldes de Malavella (Gerona). *Speleon* 2 (2-3): 103-164.
- MAHON, W. A. J. (1966). — Silica in hot water discharged from drill holes at Wairakei, *New Zealand Jour. Scien.*, 9: 135-144.
- MAHON, W. A. J. (1970). — Chemistry in the exploration and exploitation of hydrothermal systems, *Geothermics, Special Issue, 2*.
- ORVILLE, P. M. (1963). — Alkali ion exchange between vapor and feldspar fases, *Amer. Journ. Scien.*, 261: 201-237.
- ORVILLE, P. M. (1972). — Plagioclase cation exchange equilibria with aqueous chloride solutions results at 700° S and 200 bars in presence of quartz, *Amer. Journ. Scien.*, 272: 234-272.
- ROBIE, R. A.; VALDBAUM, D. R. (1968). — Thermodynamic data with aqueous chloride solutions results at 700° C and one atmosphere pressure and at higher temperatures, *U. S. Geol. Survey Bull.*, 1.259: 256.
- SIEVER, R. (1962). — Silica solubility 0-200° C and the diagenesis of siliceous sediments, *The Journal of Geology*, 70 (2): 127-150.
- SOLÉ SABARÍS, L. (1946). — Características hidrogeológicas de los manantiales carbónicos de Gerona, llamadas "Fonts Picants" *Anales del Instituto de Estudios Gerundenses* 1: 236-269.
- SOLÉ SABARÍS, L. (1962). — Observaciones sobre la edad del volcanismo gerundense *Mem. R. Acad. Cienc. y Art. Barcelona*, 3.ª ép., n.º 695, v. XXXIV, n.º 12, 16 pp. Barcelona.
- SOLÉ SABARÍS, L., LLOPIS LLADÓ, N. (1939). — Terminación septentrional de la Cordillera Costero-Catalana. *Asoc. Est. Geol. del Medit. Occid.* T. T. VI *Estudios geomorfológicos de la Península Hispánica*, n.º 1, 87 pp.
- VIDAL, L. M. (1882). — Estudio geológico de la estación termal de Caldas de Malavella (Gerona) *Bol. Com. Mapa Geol. Esp.* 9: 65-91.
- WHITE, D. E. (1970). — Geochemistry applied to the discovery, evaluation and exploration of geothermal energy resources, *Geothermics, Special Issue, 2*.

Recibido enero 1976.

Aceptado para publicación 13 octubre 1976.