



HIDROGEOQUÍMICA DE FLUJOS LOCALES, INTERMEDIOS Y REGIONALES DE LA SIERRA DEL ROSARIO, PINAR DEL RÍO, CUBA.

J.R. Fagundo¹, P. González¹, M. Suárez¹, C. Melián¹, J. Pajón², J. Fagundo-Sierra¹, M. Llerena³.

1. Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina". (MINSAP).

2. Instituto de Geofísica y Astronomía (CITMA).

3. Instituto de Geografía Tropical (CITMA).

RESUMEN

Las propiedades químico-físicas de las aguas subterráneas dependen de las interacciones agua-roca durante el tiempo de contacto que media desde la infiltración hasta su emergencia y de la constitución de los materiales acuíferos que drenan, de modo que es posible caracterizar los diferentes flujos (locales, intermedios y regionales) sobre la base de un grupo de indicadores geoquímicos.

En el presente trabajo se presentan los resultados de la caracterización hidroquímica y de la interpretación del origen de la composición química de muestras de aguas tomadas de manera sistemática en diferentes sitios de la Sierra del Rosario desde 1984 hasta el 2002, así como a partir de datos tomados de un informe geológico, correspondientes a flujos de diferente naturaleza hidrogeológica que drenan rocas carbonatadas, silicatos ácidos y rocas ultrabásicas con edades que van desde el Paleógeno hasta el Jurásico.

The chemical-physical properties of the underground waters depend on the water-rock interactions during the time of contact that mediates from the infiltration until their emergency and of the constitution of the aquifer materials that drain, so that it is possible to characterize the different flows (local, intermissions and regional) on the basis of a group of geochemical parameters.

This work shows the results of the hydrochemical characterization and interpretation of the origin of the chemical composition of water samples taken in a systematic way in different places of the Rosario's Sierra from 1984 to 2002, as well as using a geologic data report, corresponding to flows of different hydrogeologic nature that drain carbonated rocks, acid silicates and ultrabasic rocks with ages that go from the Paleógeno to the Jurassic period.

INTRODUCCIÓN

En la subregión natural de las Montañas de la Sierra del Rosario (Gutiérrez y Glean, 1999), situada en la porción oriental de la Cordillera de Guaniguanico, entre la parte oriental de la provincia de Pinar del Río y la parte occidental de la provincia La Habana, existe un gran potencial de aguas naturales y minerales, que pueden tener uso como fuentes de abasto a pequeñas poblaciones rurales, para el regadío en la agricultura, para consumo mediante embotellamiento y para fines terapéuticos.

La cantidad y diversidad de las aguas de esta región está asociada a las complejas condiciones geológicas e hidrológicas existentes (Fig. 1), como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas de diferente naturaleza litológica (calizas, pizarras, areniscas y



rocas ultrabásicas), ocurrido durante el Eógeno Medio, así como la presencia de numerosas fallas orientadas en diferentes direcciones (Pszczoiowski, 1978).

Los sedimentos carbonatados están constituidos por calizas y calizas dolomitizadas de las formaciones Pan de Guajaibón, Sierra Azul, Artemisa y otras, con edades Cretácico y Jurásico.

Los sedimentos no carbonatados lo constituyen esquistos y areniscas de las formaciones Manacas (Paleógeno) y San Cayetano (Jurásico) compuestos por aluminosilicatos ácidos, básicas y ultrabásicos. Las rocas ácidas están representadas por sedimentos de tipo efusivo sedimentarias, constituidas por aleurolitas, argilitas, areniscas y silicatos de las formaciones Manacas (Paleógeno), Vía Blanca y Encrucijada (Cretácico), así como los esquistos y pizarras de la formación San Cayetano (Jurásico). Las rocas básicas y ultrabásicas están constituidas por serpentinitas, harzburgitas y otras rocas serpentinizadas de edad Cretácico.

La distribución y disposición de las secuencias estratigráficas en la Sierra con diferente composición originan acuíferos libres y confinados a diferentes profundidades, cuyas aguas poseen una variada composición química. Además de las aguas dulces originadas en los acuíferos más someros, existen otras de tipo mineral de composición más estable y temperatura más elevada. El objetivo de este trabajo es caracterizar los correspondientes flujos y determinar el origen de la composición química de los mismos aplicando modelos de reconocimiento de patrones, balance de masas y mezcla de aguas.

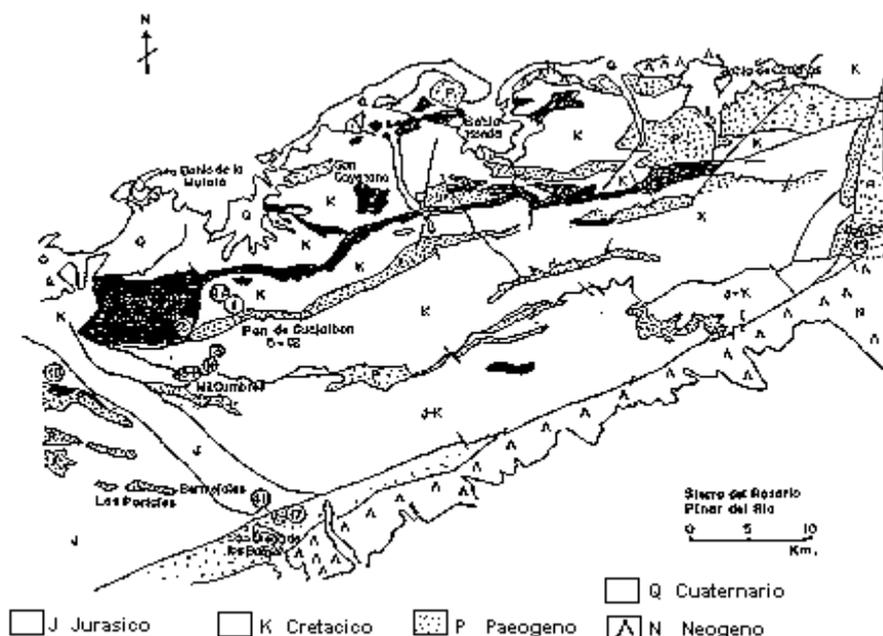


Figura 1. Esquema geológico de la Sierra del Rosario

MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones de los parámetros geoquímicos se realizaron en el campo mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424, marca HANNA y oxímetro



modelo HI-914, marca HANNA. Los contenidos de CO₂ y H₂S, así como la alcalinidad total (HCO₃⁻ y CO₃²⁻) fueron también determinados “in situ”, mientras que los restantes macroconstituyentes (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ y Mg²⁺) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomadas las muestras. Las marchas analíticas se efectuaron mediante las técnicas analíticas estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

Las muestras fueron tomadas entre enero de 1984 y enero del año 2000. También se utilizaron datos hidroquímicos del informe de prospección detallada efectuado por Peláez et al (1990) en la región de San Diego de los Baños – Los Bermejales. Los datos fueron procesados mediante un software, basado en un modelo hidrogeoquímico de balance de masas, implementado especialmente para los objetivos (Fagundo Sierra et al, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acuíferos carbonatados

Las rocas carbonatadas se encuentran muy extendidas en la Sierra del Rosario, constituyendo más del 65%. En ellas se originan acuíferos cársicos libres o confinados, en dependencia de las condiciones de yacencia de estos materiales con respecto a otras rocas menos permeables. Las aguas de estos acuíferos pueden proceder de la zona no saturada (acuíferos colgados o vadosos), de la zona saturada o de la zona de saturación y circulación profunda; estas últimas se caracterizan por presentar elevados contenidos de minerales y gases disueltos (Fagundo et al, 1996) además de una temperatura mayor debido al calentamiento por el gradiente geotérmico. Algunas de estas fuentes poseen propiedades mineromedicinales reconocidas, como es el caso de los manantiales del Balneario de San Diego de los Baños.

Como ejemplos representativos de estos tres tipos de acuíferos se seleccionaron el manantial Mil Cumbres, el manantial La Pastora y el pozo artesiano P1, respectivamente. Todos estas fuentes tienen en común el hecho de que se encuentran asociadas a las calizas de la Fm. Artemisa. La composición química de estas aguas, se muestra en la tabla I.

Tabla I. Composición química de las aguas de varias fuentes de la Sierra del Rosario cuyas cuencas de alimentación se encuentran en terrenos carbonatados. Concentraciones de O₂ y TSS en mg/l, las restantes en mmol/l.

No	T °C	pH	Eh mv	O ₂ mg/l	CO ₂ mmol/l	H ₂ S mmol/l	H ₄ SiO ₄ mmol/l	HCO ₃ ⁻ mmol/l	Cl ⁻ mmol/l	SO ₄ ²⁻ mmol/l	Ca ²⁺ mmol/l	Mg ²⁺ mmol/l	Na ⁺ mmol/l	K ⁺ mmol/l	TSS mg/l
1	23.0	6.60			0.05	0.00	0.00	0.20	0.16	0.00	0.04	0.03	0.21	0.01	20
2	23.7	7.42	-50	7.7	0.37	0.00	0.48	4.44	0.48	0.39	2.14	0.23	0.93	0.03	438
3	23.8	7.15	-260	1.8	1.71	0.50	0.50	7.24	1.31	0.66	3.51	0.66	1.31	0.04	739
4	46.0	7.19	-250	2.8	0.89	0.73	0.40	3.36	1.22	18.36	14.44	2.63	6.98	0.18	2818

1) Agua de lluvia – San Juan de Sagua (N=5); 2) Manantial Mil Cumbres (N=18); 3) Manantial La Pastora (N=5); 4) Pozo P1 (N=10). La incertidumbre de los resultados corresponde al error de los métodos analíticos que del orden de 0.05 mol/l.

La composición química de las aguas del manantial Mil Cumbres es predominantemente del tipo bicarbonatada cálcica, aunque ocasionalmente por efecto de las precipitaciones puede transformarse en bicarbonatada cálcica sódica (CV_{TSS}=13%). Otro rasgo que caracteriza a estas



aguas es su relativamente baja temperatura, su poco contenido de CO₂, ausencia de H₂S, así como sus bajas concentraciones de cloruro y sulfato.

Los resultados del balance de masas correspondiente al proceso de intemperismo que origina la composición química de las aguas del manantial Mil Cumbres, así como los procesos geoquímicos correspondientes se muestran en la tabla II.

Tabla II. Masa de mineral disuelto o transformado en el proceso de intemperismo que origina las aguas del manantial Mil Cumbres.

Proceso geoquímico	mmol/l
Calcita	1.88
Dolomita	0.15
Albita	0.25
Pirita	0.19

Para el cálculo de la masa extraída en forma iónica por las lluvias, se tomó en consideración el factor de evapotranspiración:

$$f = \frac{\text{Contenido de Cl medio de la fuente}}{\text{Contenido de Cl medio de la lluvia}} = \frac{0.48}{0.16} = 3.0$$

El producto de este factor por la composición química del agua de lluvia se resta de la composición química del agua del manantial, obteniéndose así una diferencia (Δ iónico), correspondiente a la masa resultante en el balance, la cual es debida al intemperismo. En el caso de gases no se tiene en cuenta este factor.

La composición química del manantial La Pastora, de tipo bicarbonatada cálcica, es más estable en el tiempo que la del manantial Mil Cumbres ($C.V_{TSS} = 4.4\%$). Presenta también una temperatura media anual mayor, contenidos más elevados de CO₂ y minerales disueltos (TSS, Ca²⁺, SO₄²⁻), así como presencia abundante de H₂S.

Para calcular la masa extraída en el proceso de intemperismo en el caso del manantial La Pastora, se tomó en cuenta el procedimiento utilizado por Garrels y Mckencie (en Drever, 1982), el cual consiste en restar a la composición química de un manantial permanente, la de un manantial no permanente. En este caso, a la composición del manantial La Pastora (zona de saturación) se le restó la composición del manantial Mil Cumbres (zona no saturada). Los métodos de balance de masas constituyen una herramienta adecuada para estudiar los procesos geoquímicos en yacimientos carbonatados (Hidalgo et. al, 1997). Los resultados del balance de masas aplicado en este trabajo se presentan en la tabla III.

Tabla III. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas del manantial La Pastora.

Proceso geoquímico	mmol/l
Calcita	0.90
Dolomita	0.90
Halita	0.61
Pirita	0.41
Sulfato-sulfuro	-0.50

Del análisis de la tabla III, se infiere que algunos de los procesos geoquímicos que conducen a la composición química de las aguas del manantial La Pastora son similares a los del manantial



Mil Cumbres (disolución congruente de calcita y dolomita, oxidación de pirita y generación biogénica de CO₂). En el manantial La Pastora no se produce disolución incongruente de albita y sí disolución de halita, así como una reducción parcial de SO₄²⁻ que origina H₂S.

Si se resta la composición química del manantial La Pastora a la del pozo P1, se puede determinar la cantidad de material adquirido o eliminado en el tránsito de estas aguas, desde la zona de saturación, hasta la zona de saturación y circulación profunda. Los resultados del balance de masas correspondiente se presentan en la tabla IV.

En este tránsito, la composición química de las aguas varía desde bicarbonatada cálcica a sulfatada cálcica. Como no existe yeso ni anhidrita en la región, la fuente de sulfatos es la propia caliza de la Fm. Artemisa, la cual libera H₂S al ser triturada. Los procesos químicos que explican la composición de estas aguas, según se infiere en la tabla IV, son los siguientes: disolución congruente de calcita y dolomita, disolución incongruente de albita y fedelspato K (microclino), oxidación de pirita con reducción parcial de sulfato, precipitación de cuarzo y liberación de CO₂,

Tabla IV. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas del Pozo P1.

Proceso geoquímico	mmol/l
Calcita	8.96
Dolomita	1.96
Albita	5.66
Pirita	9.10
Microclino	0.07
Sulfato-sulfuro	-0.23

El balance neto de las tres zonas hidrogeológicas se muestra en la tabla V.

Tabla V. Balance de masas neto en las tres zonas hidrogeológicas (no saturada, saturada y de saturación y circulación profunda). Concentraciones en mg/l.

Material	Formula empírica	Zona no saturada	Zona saturada	Zona de saturación y circulación profunda	Total
Halita	NaCl	0 (0 %)	35.70 (100 %)	0 (0 %)	35.70
Calcita	CaCO ₃	188.0 (16 %)	94.0 (8 %)	896.0 (76 %)	1178.0
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	18.6 (6 %)	48.50 (16 %)	243.63 (76 %)	310.73
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	65.50 (4 %)	0 (0 %)	1482.92 (96 %)	1548.42
Microclino	KAlSi ₃ O ₈	0 (0 %)	0 (0 %)	19.46 (100 %)	19.46
Pirita	FeS ₂	22.80 (2 %)	49.20 (4 %)	1092.91 (94 %)	1164.91
Formación de H ₂ S	H ₂ S	0 (0 %)	17.0 (70 %)	7.36 (30 %)	24.36
Cuarzo	SiO ₂	0 (0 %)	0 (0 %)	702.0 (100 %)	702.0
Dióxido de carbono	CO ₂	87.2 (58 %)	63.36 (42 %)	-792.0 (-100 %)	

A partir de la información que recoge la tabla V, se puede estimar la proporción en que cada uno de los materiales es transformado en cada zona hidrogeológica como resultado del proceso de intemperismo: la halita sólo se disuelve en la zona no saturada; 16 % de calcita se disuelven en la zona no saturada, 8 % en la zona saturada y 16 % en la zona de saturación y circulación profunda; la dolomita se disuelve en las proporciones de 6%, 6 % y 78 % respectivamente; la albita se disuelve en forma incongruente (dejando caolinita en el terreno como residuo) en las proporciones 4 %, 0 % y 96 %; el microclino también se disuelve incongruente en similar forma a la albita, pero sólo en la zona de saturación y circulación profunda, la pirita se oxida a



sulfato (con producción de hematita) en las proporciones de 2 %, 4 % y 94 %; se reduce sulfuro a partir de la materia orgánica presente en el acuífero, por acción de las bacterias anaeróbicas sulforreductoras (Appelo y Postna, 1993) en las zonas saturada y de saturación y circulación profunda en las proporciones de 70 % y 30 %. El CO₂ de carácter biogénico es generado por las bacterias en mayor cuantía en las zonas más someras (58 % en la zona no saturada y 42 % en la zona saturada), mientras que en la zona más profunda no hay producción microbiológica de este gas, el cual tiende a liberarse a la atmósfera. Finalmente, se produce precipitación de sílice en la zona del drenaje más profundo.

La ocurrencia de piritas puede estar asociada tanto a las calizas fétidas de la formación Artemisa que constituyen el material acuífero, como a los polimetales que por lo general yacen en los sedimentos de la formación San Cayetano, los cuales forman parte de las capas confinantes del acuífero. La alta proporción en que este mineral es oxidado produce un elevado contenido de CO₂, hecho que puede explicar las altas concentraciones de minerales disueltos en esta zona profunda en forma congruente (calcita, dolomita y halita) y en forma incongruente (albita y microclino). Otro factor que favorece la disolución de los aluminosilicatos es la temperatura, la cual en la región de San Diego de Baños del orden de 46 °C a unos 300 m de profundidad (Peláez et al., 1990).

Acuíferos no carbonatados

En la tabla VI se presenta la composición química de las aguas seleccionadas en este trabajo, las cuales son representativas de los manantiales y pozos no carbonatados de la región de estudio.

Tabla VI. Composición química de la lluvia local y de varias fuentes de la Sierra del Rosario que drenan acuíferos no carbonatados. Concentraciones en mmol/l.

No	T °C	PH	Eh mv	O ₂ mg/l	CO ₂ mmol/l	H ₂ S mmol/l	H ₄ SiO ₄ mmol/l	HCO ₃ ⁻ mmol/l	Cl ⁻ mmol/l	SO ₄ ²⁻ mmol/l	Ca ²⁺ mmol/l	Mg ²⁺ mmol/l	Na ⁺ mmol/l	K ⁺ mmol/l	TSS mg/l
1	23.0	6.60			0.05	0.00	0.00	0.20	0.16	0.00	0.04	0.03	0.21	0.01	20
2	23.5	8.47	156	8.4	0.06	0.00	1.10	3.67	0.45	0.06	0.06	1.85	0.55	0.02	307
3	26.5	7.10	-365	7.1	1.15	5.79	1.60	12.75	0.70	0.54	2.55	2.07	5.19	0.16	1129
4	30.0	9.00			0.00	0.00	0.19	2.96	0.48	0.36	0.20	0.15	3.75	0.11	345
5	32.0	8.21			0.41	0.70	0.23	7.66	2.74	1.72	1.43	0.62	11.69	0.36	1147

1) Agua de lluvia – San Juan de Sagua (N=5); 2) Manantiales y arroyos en Sierra de Cajalbana (N=13); 3) Pozo El Sitio (N=4); 4) Pozo P3 40 m - San Diego de los Baños-Bermejales (N=1); 5) Pozo P4 –Bermejales (N=9). (HCO₃⁻ = HCO₃⁻ + CO₃²⁻)

Como puede apreciarse, existen tres tipos principales de aguas en estos acuíferos: bicarbonatadas sódicas (con mayor o menor contenido de cloruro o sodio), asociadas a los aluminosilicatos ácidos presentes en las areniscas (formaciones Encrucijada, y Manacas) y esquistos (Fm. San Cayetano); bicarbonatadas magnesianas, relacionadas con los acuíferos someros constituidos por rocas ultrabásicas del complejo ofiolítico, y bicarbonatadas mixtas, originadas en los acuíferos más profundos constituidos por este último tipo de roca. La temperatura de las aguas depende de la profundidad del acuífero, el pH es generalmente básico y el contenido de CO₂ bajo. El H₂S sólo está presente en las aguas de origen profundo y los



contenidos de minerales disueltos son más elevados también a mayor profundidad, alcanzándose por lo general, altas concentraciones de iones alcalinos y alcalinos térreos.

En la tabla VII se presentan los resultados del balance de masas, que explica el origen de la composición química de las aguas de los manantiales y arroyos que discurren por la Sierra de Cajalbana. Estos terrenos están constituidos por rocas ultrabásicas que originan lateritas por intemperismos, los minerales más abundantes son la serpentina, el piroxeno y otros similares, ricos en magnesio, hierro, níquel y cobalto.

La composición química de las aguas de los manantiales y arroyos de Cajalbana se explica mediante la ocurrencia de procesos geoquímicos de disolución de serpentina, oxidación de pirita y la generación de CO₂ según las siguientes expresiones estequiométricas que se muestran en la tabla VII. Para el cálculo de la masa extraída en forma iónica por la lluvia se tomó en consideración el factor de evapotranspiración (2.813).

Tabla VII. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas de los manantiales y arroyos de la Sierra de Cajalbana.

Proceso geoquímico	<u>mmol/l</u>
Serpentina	0.56
Pirita	0.06

El pozo El Sitio fue perforado en el marco de un estudio de exploración geológica, emitiendo desde entonces en forma artesiana, con una composición química del orden de la que se presenta en la tabla VI. Su composición puede ser explicada a partir de los cálculos de balance de masas que se exponen en la tabla VIII, donde la concentración correspondiente a los manantiales de Cajalbana se resta a la del pozo El Sitio.

Tabla VIII. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas del pozo El Sitio.

Proceso geoquímico	<u>mmol/l</u>
Halita	0.25
Serpentina	0.08
Albita	4.40
Microclino	0.14
Anorthita	5.00
Pirita	3.13
Sulfato-sulfuro	-5.79

En este proceso de intemperismo que tiene lugar desde la zona somera del acuífero (manantiales y arroyos de Cajalbana) hasta el horizonte captado por el pozo el Sitio, las mayores proporciones de minerales disueltos o transformados corresponden a la albita (36.2 %), la anorthita (43.7 %) y la pirita (17.5 %)., mientras la serpentina es intemperizada en sólo un 0.9 %.

El pozo P 3, perforado durante los trabajos de búsqueda y exploración detallada realizados en el sector hidrogeológico San Diego de los Baños - Bermejales (Peláez, 1990), interesó diferentes horizontes acuíferos en profundidad. A los 40 m captó aguas de tipo bicarbonatadas sódicas y bicarbonatadas cloruradas sódicas de relativamente alta mineralización, cuya composición química puede ser explicada mediante los cálculos de balance de masas y los procesos geoquímicos que se presentan en la tabla IX. Los procesos geoquímicos que



intervienen en este caso son los siguientes: disolución de serpentina, albita, microclino y anorthita, oxidación de pirita, precipitación de cuarzo y generación de CO₂.

Tabla IX. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas del pozo P 3 (40 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Serpentina	0.02
Albita	3.11
Microclino	0.09
Anorthita	0.08
Pirita	0.18

La cantidad de material extraído por las aguas en su curso subterráneo desde la zona saturada del acuífero hasta las capas más profundas en los esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano, así como la composición química de las mismas, puede ser calculada restando a la composición de las aguas del pozo P 4 (tomada entre 103 y 288 m), la composición del pozo P 3 (90 m). En la tabla X se presentan los resultados del balance de masas, así como los procesos geoquímicos que originan esta composición.

Tabla X. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que explican la composición química del pozo P4 tomada entre 103 y 288 m (Bermejales) a partir de las aguas del pozo P 3 (40 m), los cuales drenan diferentes horizontes acuíferos constituidos por esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano (aluminosilicatos de tipo ácido).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	3.82
Serpentina	0.09
Albita	6.09
Microclino	0.30
Anorthita	0.53
Pirita	7.72
Sulfato-sulfuro	-3.53

El balance de masa neto en los de acuíferas estudiadas en la zona los terrenos no carbonatados estudiados se resume en la tabla XI.

Tabla XI. Balance de masas neto en los acuíferos desarrollados, a diferentes profundidades, en aluminosilicatos de tipo ultrabásico y ácido de la Sierra del Rosario. Concentraciones en mmo/l.

Material	Formula empírica	Acuíferos en rocas ultrabásicas		Acuíferos en rocas ácidas	
		Somero	Profundo	Somero	Profundo
Halita	NaCl	0 (0 %)	14.6 (100 %)	0 (0 %)	212.0 (100%)
Serpentina	Mg ₃ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	131.2 (87 %)	16.2 (11 %)	11.0 (18.2 %)	49.7 (81.8 %)
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	0 (0 %)	1152.8 (100 %)	814.8 (33.8 %)	1595.6 (66.2 %)
Microclino	KAlSi ₃ O ₈	0 (0 %)	38.9 (100 %)	25.0 (23.1 %)	83.4 (76.9 %)
Anorthita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	0 (0 %)	1390 (100 %)	22.2 (13.1 %)	147.3 (86.9 %)
Pirita	FeS ₂	26.4 (41%)	375.0 (59 %)	21.6 (2.3 %)	924.9 (97.7 %)
Red. sulfato	H ₂ S	0 (0 %)	426.0 (100 %)	0 (0 %)	120.0 (0 %)
Cuarzo	SiO ₂	0 (0 %)	558.7 (100 %)	-400 (32 %)	845 (68 %)
Dióxido de carbono	CO ₂	139.5 (69 %)	-63.4 (100 %)	119.2 (11 %)	147.8 (89 %)

Aguas procedentes del drenaje profundo



En la tabla XII se presentan las características químico - físicas de las aguas de los manantiales y pozos procedentes de los acuíferos profundos de la Sierra del Rosario (flujos intermedios y regionales), así como otras fuentes que originan los mismos por procesos de interacción agua – roca y mezcla de aguas.

Tabla XII. Composición química de pozos y manantiales del sistema hidrotermal San Diego de los Baños Bermejales. Concentraciones en mmol/l.

No	T °C	pH	Eh mv	O ₂ mg/l	CO ₂ mmol/l	H ₂ S mmol/l	H ₄ SiO ₄ mmol/l	HCO ₃ ⁻ / CO ₃ ²⁻ mmol/l	Cl ⁻ mmol/l	SO ₄ ²⁻ mmol/l	Ca ²⁺ mmol/l	Mg ²⁺ mmol/l	Na ⁺ mmol/l	K ⁺ mmol/l	TSS mg/l
1	25.8	9.00			0.00	0.00	0.19	2.96 (O.20)	0.48	0.36	0.20	0.15	3.74	0.12	345
2	36.0	7.70			0.75	0.00	0.11	6.28	0.76	0.41	3.07	0.27	1.16	0.02	606
3	46.0	7.20	-250	2.8	0.86	1.18	0.37	2.77	0.95	20.52	15.92	2.99	6.84	0.21	3042
4	30.3	7.10			2.75	3.53	0.06	11.03	4.35	0.69	0.75	0.60	13.62	0.42	1261
5	30.0	7.40			1.48	3.44	0.26	3.92	1.10	12.71	11.71	2.59	1.96	0.06	2073
6	30.0	8-00			1.00	1.36	0.19	5.92	1.09	0.40	2.15	0.59	2.26	0.07	591
7	36.0	7.15	-226	2.7	1.11	0.35	0.31	5.00	1.07	7.81	7.38	1.87	3.09	0.10	1506
8	32.0	7.15	-266	2.8	1.11	0.35	0.31	3.75	1.19	13.17	11.38	2.37	0.75	0.02	1846
9	31.0	7.60	-250	2.6	1.36	1.13	0.34	5.24	1.72	13.13	12.58	2.37	3.22	0.10	2277
10	30.5	7.90			0.75	0.70	0.28	6.32	1.63	8.23	5.23	2.42	8.83	0.27	1710

1) Pozo P3 (40 m); 2) pozo P 3 (90 m); 3) pozo P 1 (237-320 m); 4) pozo P 4 (222-288 m); 5) pozo P 4 (100 m); 6) pozo P 13; 7) Manantial El Templado (San Diego de los Baños); 8) manantial La Gallina (San Diego de los Baños); 9) manantial M 1 (Los Bermejales); pozo P 4 (145-195 m) (San Diego de los Baños).

El pozo P 3 se encuentra ubicado entre los manantiales de San Diego de los Baños y los de Bermejales, más próximo a estos últimos. Corta primero a la Fm. San Cayetano, luego una brecha tectónica y posteriormente las calizas de la Fm. Artemisa. En los primeros 40 m, el acuífero presenta aguas del tipo bicarbonatadas sódicas de bajas temperatura (25.8 °C), mineralización (345 mg/l) y dureza (35 mg/l). Son aguas básicas (pH = 9) donde están presentes iones CO₃²⁻ junto a HCO₃⁻. El catión predominante es el Na⁺, no posee CO₂ ni H₂S y el contenido de sílice es de 15.3 mg/l. Esta composición es característica de un agua que drena sedimentos y rocas constituidas por silicatos.

A partir de esta profundidad hasta los 290 m, el pozo exhibe aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas originadas por disolución de calizas relativamente puras. Su temperatura asciende lentamente desde 26 hasta 34 °C, la mineralización oscila entre 564 y 606 mg/l, la dureza lo hace entre 292 y 334 mg/l, el pH es neutro tendiendo a ligeramente básico (7.5-7.9) y el contenido de CO₂ es relativamente alto (22-33 mg/l), no contienen H₂S y poseen un contenido bajo de sílice.

El pozo P 1 fue perforado hasta unos 300 m de profundidad y sólo cortó calizas de la Fm. Artemisa. Se aprecia un aumento creciente de la temperatura, desde 26 °C en la primera zona hasta los 46 °C en la última. En ese sentido descienden el pH (de 8.0 a 7.2) y se incrementan el CO₂ (de 11 a 38 mg/l), el H₂S (de 0 a 39.7 mg/l), el H₂SiO₃ (de 51.1 a 34.2 mg/l), la mineralización (de 440 a 3042 mg/l) y la dureza (de 209 a 1886 mg/l). Durante los experimentos hidrogeológicos este pozo se hizo surgente.



El pozo P 4 fue perforado en las cercanías de los manantiales de Bermejales. Corta al principio y al final la Fm. Artemisa, mientras que en las zonas intermedias (entre los 200 y 300 m) corta la Fm. San Cayetano. Aunque el primer contacto tectónico es de tipo transicional, el segundo es brusco, apareciendo una brecha tectónica y una serpentinita (Peláez et al., 1990). La temperatura en este pozo varía poco, entre 28 y 30.5 °C.

Hasta los 100 m de profundidad las aguas son similares en su composición a las de los manantiales de Los Bermejales. Poseen temperaturas del orden de 30 °C, mineralización (2073-2143 mg/l) y dureza (1421-1462 mg/l) elevadas, pH neutro (7.4-7.7) con contenidos relativamente altos de CO₂ (33-65 mg/l) y muy altos de H₂S (81.6-116.9 mg/l).

Entre los 100 y 200 m, aproximadamente, las aguas muestran una facies hidroquímica del tipo bicarbonatada sódica, con pH elevado (8.9), ausencia de CO₂ y presencia de iones CO₃²⁻ junto a HCO₃⁻. La mineralización de estas aguas es alta (1166 mg/l), mientras que la dureza es baja (62 mg/l). Poseen un elevado contenido de H₂S (120 mg/l) y contrario a lo esperado, poseen un relativamente bajo contenido de sílice (15.6 mg/l). El origen de estas aguas está asociado, posiblemente, a los procesos de disolución de silicatos en condiciones hidrotermales.

Entre los 145 y 195 m la facie hidroquímica es sulfatada cálcica sódica, al parecer originada por mezcla entre aguas de los tipos sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas, asociadas a las formaciones Artemisa y San Cayetano respectivamente. Estas aguas presentan valores de pH, CO₂, H₂S, H₂SiO₃, TSS y CaCO₃ que son intermedios entre las muestras tomadas a 100 y 103-106 m respectivamente.

Entre 222 y 300 m, las aguas poseen una composición química similar a la de la muestra tomada entre 103 y 106 m, siendo de nuevo la facies hidroquímica presente la bicarbonatada sódica.

Las aguas del pozo P 13 son del tipo bicarbonatadas cálcico sódicas de mediana mineralización (591 mg/l) y dureza (274 mg/l). El pH es básico (8.0), mientras que el CO₂ es anormalmente alto y no coherente con el pH. El H₂S es también elevado (46.3 mg/l). El contenido de sílice no es elevado (15 mg/l).

Las aguas de los manantiales de San Diego de los Baños (El Tigre, El Templado y La Gallina), poseen temperaturas ligeramente mayores (31-36 °C) que las de los manantiales de Bermejales (M 1, M 2, M 3, M 4 y M 5), las cuales varían entre 31 y 32 °C. El pH tiende a ser más bajo (7.15-7.16) y el CO₂ más elevado (49-60 mg/l) en las aguas de San Diego y la de los manantiales M1 y M 2 de Los Bermejales (pH entre 7.5 y 7.79 y CO₂ entre 29 y 49 mg/l). El H₂S es menor en las aguas de San Diego (7.42-11.9) que en Los Bermejales (31.3-34.8). El contenido de H₂SiO₃ oscila entre 23.5 y 40 mg/l para todas las aguas, tendiendo a ser algo más elevados en los manantiales de Bermejales. En cuanto a la mineralización, ésta es mayor en los manantiales de Bermejales (2256-2409 mg/l) que en los manantiales de San Diego (1506-1847 mg/l). Los mayores contenidos de TSS se corresponden con los valores de SO₄²⁻, Ca²⁺, Cl⁻ y Na⁺. Por último, el contenido de Rn es mucho más pequeño en los manantiales de Los Bermejales (0.19-0.23 mµc/l) que en los manantiales de San Diego de los Baños (0.93-1.25 mµc/l). Con anterioridad se había reportado concentraciones de Rn de 2.7, 2.1, 3.3 y 0.6 mµc/l en los manantiales de El Tigre, El Templado, La Gallina y Los Bermejales respectivamente (Guerra, 1947a, 1947b; Trelles, 1948).



Con relación a las facies hidroquímicas presentes, se observan dos ligeramente diferentes, una de tipo sulfatada bicarbonatada cálcica, presente en el manantial El Templado y ocasionalmente en el manantial El Tigre, y otra de tipo sulfatada cálcica, presente en el resto de los manantiales. En todos los casos, las aguas pueden ser considerarse como hipertermales de acuerdo a la clasificación de Schoeller (1962) o moderadamente tibias según Borgamov (en Armiejo y San Martín, 1994).

Del comportamiento global de los parámetros químico-físicos de los manantiales de San Diego de los Baños y Los Bermejales, se infiere un origen común de las aguas. La fracción de las precipitaciones que se infiltran en la región a través de las grietas y fisuras presentes en las calizas de la Fm. Artemisa, descienden hasta una cierta profundidad, donde se calientan en virtud del gradiente geotérmico, ascendiendo luego por la Falla San Diego de los Baños. Las diferencias observadas con relación a la magnitud de los diferentes parámetros en ambos sitios, pueden deberse a diferencias locales de tipo litológicas y estructurales, así como a la profundidad de descenso, tiempo de residencia, velocidades de ascenso de las aguas, así como su posible mezcla con otras más someras. Así el mayor contenido de Rn en las aguas de San Diego de los Baños apunta a un tiempo superior de contacto agua-roca que en las aguas de Los Bermejales. En correspondencia con esto, debía esperarse una mayor mineralización y contenidos de CO₂ disueltos en las aguas de San Diego. A pesar de que la concentración de este gas es superior en dichos manantiales, ocurre lo contrario con la mineralización, la cual es más grande en los manantiales de Los Bermejales. Este comportamiento pudiera deberse a que las aguas que emergen por San Diego, se mezclan antes con otras menos mineralizadas ubicadas más cerca de la superficie. El hecho de que las aguas de El Tigre y El Templado poseen un alto contenido relativo de HCO₃⁻ (19-23 % meq/l) sugiere una posible mezcla con aguas del tipo bicarbonatas sódicas, típicas de los acuíferos desarrollados en los esquistos, pizarras y areniscas de la Fm. San Cayetano.

El menor contenido de H₂S en los manantiales de San Diego con respecto a los de Bermejales pudiera explicarse asumiendo un mayor proceso de reducción bacteriana de sulfatos en Bermejales.

En la tabla XIII se presentan los resultados de los cálculos del balance de masas y los procesos geoquímicos que explican la composición química del pozo P13. Como puede apreciarse, la composición de esta fuente, de tipo HCO₃-Ca>Na, se justifica por la mezcla de las aguas de los pozos P 3 (90 m), del tipo HCO₃-Ca, y P 3 (40 m), del tipo HCO₃-Na, en las proporciones de 69 % y 31 % respectivamente. Los procesos geoquímicos que tienen lugar son: disolución congruente de halita y dolomita, precipitación de calcita; oxidación de pirita, reducción de sulfato, liberación de CO₂ al medio y transferencia de masas entre caolinita y albita. Este último tipo de proceso ha sido considerado por Helgeson (en Drever, 1982) sobre la base de los productos de alteración originados en los procesos de intemperismo en sistemas de tipo X₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O, donde X = Na o K.

Tabla XIII. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan las aguas del pozo P 13. Mezcla de aguas: 69 % pozo P3 (90 m) y 31 % pozo P3 (40 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	0.43
Calcita	-0.40
Dolomita	0.34
Albita	-0.12
Pirita	1.38
Sulfato-sulfuro	-1.36



La composición química del manantial El Templado, de tipo $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3\text{-Ca}$, puede explicarse a partir de la mezcla de las aguas del pozo P 3 (90 m), de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, con la de las aguas del pozo P 1 (237-320 m), de tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$. En la tabla XIV se presentan los resultados de los cálculos del balance de masas y los procesos geoquímicos que explican la composición química del manantial El Templado (San Diego de los Baños). Dicha composición se justifica por la mezcla de las aguas de los pozos P 3 (90 m) y P 1 (237-320 m) en las proporciones de 64 % y 36 % respectivamente. Los procesos geoquímicos que tienen lugar son: disolución congruente de halita y dolomita, precipitación de calcita, transferencia de masas entre aluminosilicatos (albita y caolinita); oxidación de pirita, reducción de sulfato y precipitación de cuarzo.

Tabla XIV. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan las aguas del manantial El Templado. Mezcla de aguas: 64 % pozo P3 (90 m) y 36 % pozo P1 (237-320 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	0.24
Calcita	-0.96
Dolomita	0.64
Albita	-0.36
Pirita	0.15

Las aguas del manantial La Gallina (San Diego de los Baños), poseen un patrón hidrogeoquímico típico de un agua sulfatada cálcica, similar al patrón del agua del pozo P 1 de mayor mineralización. Si se asume que la composición del manantial La Gallina se origina por mezcla de las aguas de dicho pozo, procedentes del drenaje profundo, con otras aguas más someras de composición similar a las del pozo P 3 (90 m), entonces el proceso neto de mezcla y de modificación de la composición química puede ser expresado por las reacciones calculadas en la tabla XV mediante balance de masas. La composición química de las aguas de este manantial puede ser explicada por la mezcla de las aguas de los pozos P 1 (237-320 m) y P 3 (90 m), en las proporciones de 36 % y 64 % respectivamente. Los procesos geoquímicos que tienen lugar son: disolución congruente de halita y dolomita, transferencia de masas entre aluminosilicatos (albita y microclino) con minerales secundarios (caolinita), reducción de sulfato, formación de azufre a partir de H_2S y precipitación de cuarzo. Finalmente, se debe considerar además una pérdida de CO_2 en los cálculos de balance de masas para obtener un error más pequeño (podría ser por disolución en agua dando HCO_3^-).

Tabla XV. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan las aguas del manantial La Gallina. Mezcla de aguas: 64 % pozo P1 (237-320 m) y 36 % pozo P3 (90 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	0.31
Dolomita	0.22
Albita	-4.36
Sulfato-sulfuro	-0.12
$\text{H}_2\text{S} - \text{S}$	-0.53

El manantial M 1 de Los Bermejales (aguas sulfatadas cálcicas sódicas) posee un contenido relativamente mayor de sodio que el de las aguas del manantial La Gallina (aguas sulfatadas cálcicas) y menor que el pozo P 1 (aguas sulfatadas cálcicas). Teniendo en cuenta además,



que la mineralización de aquel manantial es inferior a la del pozo P1, se puede asumir que la composición del manantial M 1 (Los Bermejales) pudiera originarse por mezcla de las aguas del pozo P 1 con las del pozo P 4 (103-206), de mayor contenido de Na⁺ y mineralización. En la tabla XVI aparecen los resultados de los cálculos de balance de masas y los procesos geoquímicos correspondientes.

Tabla XVI. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan las aguas del manantial M 1 Bermejales. Mezcla de aguas: 68 % pozo P1 (237-320 m) y 32 % pozo P4 (103-206 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	0.98
Calcita	1.49
Dolomita	0.37
Albita	-7.09
Sulfato-sulfuro	-1.47
H ₂ S - S	-2.27

La composición química de las aguas del manantial M 1 (Los Bermejales) puede ser explicada por la mezcla de las aguas de los pozos P1 y P 4 en la proporción de 68 y 32 % respectivamente. Los procesos geoquímicos que tienen lugar son: disolución de halita, calcita y dolomita en forma congruente y transferencia de masas entre aluminosilicatos (albita y microclino) y minerales secundarios (caolinita); oxidación de pirita; formación adicional de H₂S a partir de azufre, precipitación de cuarzo y generación de CO₂.

Durante los trabajos de exploración detallada llevados a cabo en la región (Peláez, 1990), el pozo P 4 perforó varios horizontes acuíferos, con aguas de diferente composición relativa (aguas sulfatadas cálcicas, bicarbonatadas sódicas y sulfatadas bicarbonatadas cálcicas sódicas, estas últimas, captadas entre 145 y 195 m se originan presumiblemente por mezcla de las dos anteriores. En la tabla XVII se muestra los resultados de los cálculos del balance de masas, así como los procesos geoquímicos que se producen en el marco de dicha mezcla. Las proporciones calculadas corresponden a 52 % de las aguas captadas a 100 m de profundidad y a 48 % de las aguas captadas entre 222 y 288 m.

Tabla XVII. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan las aguas del pozo P 145-195. Mezcla de aguas: 51 % pozo P4 (100 m) y 48 % pozo P4 (222-288 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	-1.03
Calcita	-2.04
Dolomita	0.83
Albita	2.29
Microclino	0.04
Pirita	1.30
H ₂ S - S	-2.78

En la figura 2 se presenta la composición química mediante diagramas de Stiff, tanto de las aguas de partida como de aquellas resultantes de los procesos de interacción agua-roca y de mezcla de aguas. En los acuíferos carbonatados someros, los principales procesos geoquímicos son los de disolución de calcita y dolomita (II), así como de oxidación de piritas, los cuales originan las aguas HCO₃-Ca (Fagundo et al, 2000a), mientras que en los acuíferos constituidos por minerales de tipo aluminosilicatos ácidos (III), priman los procesos



geoquímicos de disolución incongruente de plagioclas (albita y microclino principalmente) que originan las aguas de tipo $\text{HCO}_3\text{-Na}$ (Fagundo et al, 2000b). De las zonas profundas emergen las aguas termominerales de tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ (I), las cuales se originan por oxidación de las piritas. Mediante la mezcla de estos miembros extremos en las proporciones que aparecen en dicha figura y con la ocurrencia de los procesos geoquímicos determinados por balance de masas, se originan las restantes fuentes de composición variable: $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$ (IV), $\text{SO}_4\text{-Ca}$ de menor mineralización (V), $\text{SO}_4>\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (VI), $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$ (VII) y $\text{SO}_4>\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$ (VIII).

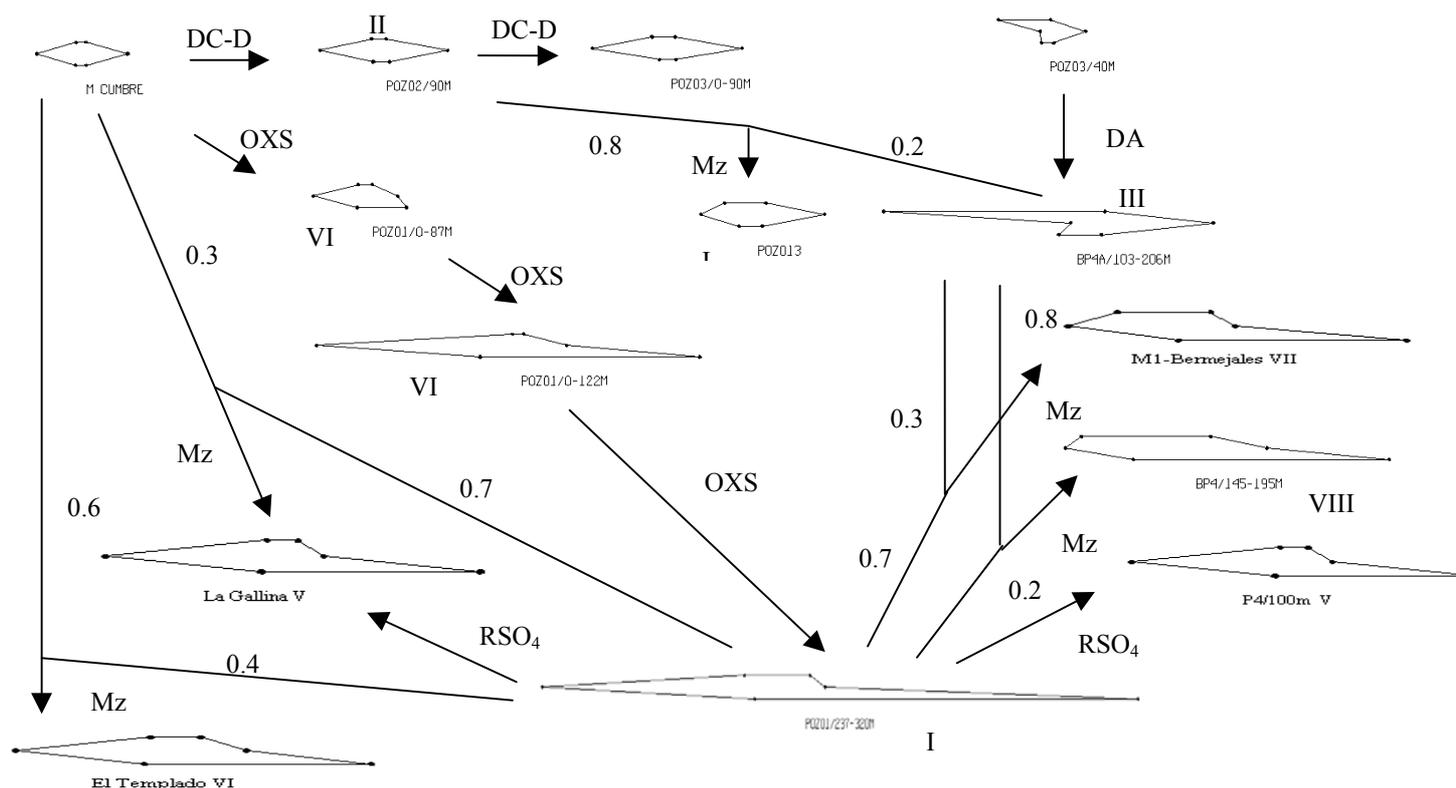


Figura 2. Procesos hidrogeoquímicos representados mediante Diagramas de Stiff (San Diego de los Baños-Bermejales).

Leyenda

DC-D: Disolución de calcita y dolomita; DA: Disolución de albita; OXS: Oxidación de piritas; RSO4: Reducción de sulfato; Patrones: (números romanos): I: Agua $\text{SO}_4\text{-Ca}$; II: Agua $\text{HCO}_3\text{-Ca}$; III: Agua $\text{HCO}_3>\text{Cl-Na}$; IV: Agua $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$; V: Agua $\text{SO}_4\text{-Ca}$ de mayor mineralización; VI: Agua $\text{SO}_4>\text{HCO}_3\text{-Ca}$; VII: Agua $\text{SO}_4\text{-Ca}>\text{Na}$; VIII: Agua $\text{SO}_4>\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$. (Los números decimales representan la proporción en que ocurren las mezclas).

CONCLUSIONES

Las principales regularidades geoquímicas encontradas en las aguas que emergen a diferentes profundidades en los acuíferos de la Sierra del Rosario fueron las siguientes:

En la zona de descarga de los flujos locales prima un ambiente oxidante, el pH depende de la del tipo de roca drenada, la cantidad de CO_2 disuelto depende del pH, siendo mayor cuando



este último es más bajo, y en correspondencia las aguas son de tipo $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ (rocas ultrabásicas), $\text{HCO}_3\text{-Na}$ (silicatos ácidos o neutros) o $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (calizas); la mineralización y los contenidos iónicos son bajos. Su composición absoluta varía con las precipitaciones.

En las emergencias procedentes de los flujos intermedios el ambiente es más reductor que en las que proceden de flujos locales, el pH es más bajo y son más elevados los contenidos iónicos y de CO_2 disueltos y la mineralización. Los tipos de aguas y procesos geoquímicos suelen ser similares a los de los flujos locales y las aguas presentan una mayor estabilidad en su composición.

Las aguas de las emergencias procedentes de flujos regionales, generalmente asociadas a fracturas y fallas, que drenan diferentes tipos de litología, se caracterizan por presentar condiciones reductoras, así como pH más bajos y contenidos de CO_2 más elevados que las de los flujos locales e intermedios. Poseen mayor mineralización y contenido de iones disueltos. Suelen poseer también componentes minoritarios en proporciones apreciables. Los principales patrones hidrogeoquímicos corresponden a aguas $\text{SO}_4\text{-Ca}$, $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}$, así como $\text{HCO}_3\text{-Mixtas}$ y $\text{SO}_4\text{-Mixtas}$. La composición química absoluta es muy estable. Por lo general se encuentran saturadas o sobresaturadas a la calcita y la dolomita y en ocasiones tienden a la saturación al yeso.

En las zonas no saturada, saturada y de saturación y circulación profunda de los acuíferos carbonatados existen aguas de los tipos bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas cálcicas sulfhídricas y sulfatadas cálcicas sulfhídricas respectivamente, estas últimas con propiedades mineromedicinales. El origen de la composición química de estas aguas se debe a la ocurrencia de procesos de disolución congruente de calcita, dolomita y halita; a la disolución incongruente de albita y microclino; a procesos de redox que implican oxidación de pirita y reducción parcial de sulfatos; así como de procesos de generación biogénica de CO_2 y de precipitación de sílice, especialmente en la zona más profunda. Mientras que los procesos microbiológicos que producen CO_2 y reducción de sulfato son más intensos en los acuíferos más someros, la oxidación de pirita es mayor en los acuíferos más profundos, originando una disolución adicional de los minerales carbonatados y silícicos.

Los principales procesos geoquímicos que explican la composición química de las aguas que drenan los acuíferos constituidos por silicatos son: disolución de serpentina, albita, microclino y anorthita, así como oxidación de pirita. La halita sólo se disuelve en las zonas más profundas de ambos tipos de acuíferos, la serpentina intemperiza en mayor proporción en la zona menos profunda de los acuíferos desarrollados en rocas ultrabásicas y en la más profunda de los acuíferos desarrollados en esquistos y areniscas. Los restantes minerales intemperizan principalmente en las zonas más profundas de ambos tipos de litología.

La composición química de las aguas minerales del sistema hidrotermal San Diego de los Baños – Bermejeles son fundamentalmente de tipo sulfatadas cálcicas y sulfatadas bicarbonatadas cálcicas, aunque también existen aguas del tipo bicarbonatadas sódicas, en casi todos los casos sulfuradas. Se origina mediante un proceso de mezcla de tres miembros extremos de composición bicarbonatada cálcica, bicarbonatada sódica y sulfatada cálcica, procedentes los dos primeros de acuíferos desarrollados en calizas y sedimentos esquistos arenosos de las formaciones Artemisa y San Cayetano respectivamente, y el tercero de un acuífero profundo que almacena aguas de tipo hidrotermal. Estas mezclas producen a su vez, modificaciones en la composición química debidas a procesos geoquímicos complejos, principalmente: disolución de halita y dolomita, precipitación de calcita, transferencia de masas entre caolinita y albita y caolinita y microclino, oxidación de pirita, reducción de sulfato,



formación de azufre a partir de H₂S, precipitación de cuarzo y liberación de CO₂ al medio. Con menos frecuencia se produce: disolución de calcita y disolución incongruente de albita y microclino.

BIBLIOGRAFÍA

- Appelo C. A. J. and D. Postma (1993). "Geochemistry, Groundwater and Pollution". Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 536 Págs.
- APHA – AWWA – WPCF (1992). "Métodos Normalizados para el análisis de Aguas Potables y Aguas Residuales, Am. Public Assoc., Edición 17th. Editorial Grijalbo (Madrid), 4-1 – 4-235.
- Armijo-Valenzuela, M. y J. San Martín (1994). "Curas Balnearias y Climáticas. Talasoterapia y Helioterapia". Ed. M. Armijo-Valenzuela y J. San Martín, Universidad Computense, Madrid, 183-194.
- Drever, J. I. (1982). "The Geochemistry of Natural Waters". Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 430 Págs.
- Embil, J. (1946). "La fotólisis del hidrógeno sulfurado en las aguas de San Diego de los Baños". Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año I, No 4, 17-20.
- Fagundo, J.R., J. J. Valdés y J. E. Rodríguez (1996). "Hidroquímica del Karst". En: Libro de Comunicaciones. I Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst. Ediciones Osuna, Granada (España), 212 Págs.
- Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, C. Melián y M. Llerena (2000a). "Origen de la composición química de las aguas naturales y minerales procedentes de acuíferos carbonatados de la Sierra del Rosario". En: "Contribución a la Educación y la Protección Ambiental". Editorial Academia, ISBN 959-02-02535. Vol. 1, 198-203.
- Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, C. Melián, M. Llerena y L. Sánchez (2000b). "Origen de la composición química de las aguas naturales y minerales procedentes de acuíferos no carbonatados de la Sierra del Rosario". En: "Contribución a la Educación y la Protección Ambiental". Editorial Academia, ISCTN 959-02-02535. Vol. 1, 204-210.
- Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez (2001). "Modelación de las aguas naturales". En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, La Habana. ISBN 959-7136-13-9 (en soporte electrónico).
- Guerra, J. (1947a). "Balneario San Diego de los Baños: determinación de la radiactividad (contenido de Radón y Radio) en las aguas de San Diego de los Baños". Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año I, No 3, 54-57.
- Guerra, J. (1947b). "Determinación de la radiactividad (contenido de Radón y Radio) en las aguas y en el aire". Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año I, No 4, 45-47.
- Gutiérrez, R. y M. R. Glean (1999). "Regiones Naturales de la Isla de Cuba". Ed. Científico Técnica. Ciudad de la Habana, 145 Págs.
- Hidalgo, D., F. López-Vera, C. Gómez y J. A. Iglesias (1997). "Balance de masas a lo largo de las aguas subterráneas del acuífero cástico de Torrelaguna". I Congreso Ibérico de Geoquímica, VII Congreso de Geoquímica de España. Ed. CEDEX, Soria (España), 375-383.
- Peláez, R., Ma. de la C. Olivárez, R. Núñez y M. Valdivia (1990). "Informe para la búsqueda detallada – exploración orientativa de las aguas minero – medicinales de San Diego – Bermejales". Unión Geológica (Fondo Geológico Nacional), MINBAS, Cuba, 159 Págs.
- Pszczoiowski A. (1978). "Geosynclinal sequences of the Cordillera de Guaninuanico in Western Cuba, their lithostratigraphy, facies development and paleogeography". Acta Geologica Polonica (Varsovia, Polonia), 28 (1) : 1-98.
- Schoeller, H. (1962). "Les eaux souterraines". Ed. Masson, Paris.
- Trelles, F. (1948). "Estudio químico de la radiactividad (contenido de Radón) de los manantiales Los Bermejales en la Provincia de pinar del Río". Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año II, No 1, 59-61.