

PATRONES HIDROGEOQUÍMICOS Y ORIGEN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS QUE DRENAN CARBONATOS

Juan Reynerio Fagundo Castillo⁽¹⁾, Vilma Monteagudo Zamaora⁽²⁾, Mónica Rodríguez Piña⁽³⁾, Tamara Leonarte Pérez⁽⁴⁾, Otilio Beato Mesa⁽⁴⁾, Patricia González Hernández⁽¹⁾, Margaret Suárez Muñoz⁽¹⁾, Clara Melián Rodríguez⁽¹⁾, Ana Abraham Alonso⁽⁵⁾

(1) Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional. Calle 44 y 5ta Ave. Playa, Ciudad de La Habana. E-mail: juanrfag@infomed.sld.cu

(2) Instituto Superior Pedagógico de Las Tunas. E-mail: vilma@isplt.ltu.sld.cu

(3) Centro de Estudios de Medio Ambiente. Zapata y G, Plaza de la Revolución, Ciudad de La Habana. E-mail: mrp@rect.uh.cu

(4) Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. E-mail: danilof@cimex.com.cu; otilio@hidro.cu

(5) Instituto de Geografía Tropical. Calle 13 # 409 / F y G Plaza de la Revolución Ciudad de La Habana E-mail: anan@geotech.cu

RESUMEN

Se presentan bs patrones hidrogeoquímicos y tipos de aguas subterráneas de Cuba que drenan depósitos carbonatados, representativos de flujos de diferente naturaleza (locales, intermedios y de carácter más regional o profundo) y se determina el origen de su composición química. Las muestras procesadas en este estudio corresponden a depósitos carbonatados de la Cordillera de Guaniguanico del intervalo Jurásico-Paleógeno, al macizo Cretácico de Las Tunas, a mármoles cretácicos de la Isla de la Juventud y a sedimentos miocénicos de la provincia de Matanzas. Los flujos más someros presentan patrones hidrogeoquímicos típicos de aguas bicarbonatadas cálcicas o cálcico magnésica en dependencia de la relación calcita-dolomita del material acuífero. Los flujos de carácter intermedio presentan patrones similares a los de los flujos locales que se desarrollan en cuencas cerradas sin contacto con el mar, pero poseen por lo general H₂S en su composición química. Los flujos de carácter más regional o profundo presentan patrones hidrogeoquímicos con alto contenido de sulfato y abundante H₂S en su composición.

Los procesos geoquímicas que explican la composición de estas aguas son: disolución de calcita y dolomita donde no se existe contacto con el agua marina; mientras que predominan los procesos de precipitación de calcita, dolomitización, intercambio iónico y reducción anaeróbica de sulfato en los acuíferos costeros con intrusión marina. El H₂S se explica mediante procesos de oxidación de pirita con reducción parcial de sulfato.

ABSTRACT

The hydrogeochemical patterns and type waters of Cuban groundwater which drain limestone deposits, representative of different nature flow (local, intermediate and flow of more regional and deep character) are shown and the origin of the composition of these water are determined.

The data processed are from Jurassic-Paleocene carbonate deposits of the Guaniguanico mountain range; Cretacic massif of Las Tunas province; Cretacic marble of Isla de la Juventud and Miocenic sediments of Matanzas province. The hydrogeochemical patterns of shallower flows are typical of calcium or calcium magnesium hydrocarbonate waters depending of the calcite-dolomite ratio of the aquifer material. The intermediate flows has

hydrogeochemical pattern similar to the local flows of closet basins no connected with the sea, but posses H_2S in its chemical composition. The more regional and deeper character flows has hydrogeochemica patterns with high sulfate and H_2S contents.

The goechemical processes which explain the origin of the water chemical composition are: calcite and dolomite dissolution where are not sea intrusion, while calcite precipitation, dolomitization processes, ion interchange and anaerobic sulfate reduction are present in coastal aquifers with sea intrusion. The H_2S content are explained by pyrite oxidation whit partial sulfate reduction.

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas adquieren su composición química mediante un proceso complejo, donde intervienen factores de tipo químico-físico, geológico, hidrogeológico, geomorfológico, climático, pedológico, antrópico y otros (Fagundo, 1990).

Los procesos químico-físicos están regidos por leyes termodinámicas (Fagundo, 1996), y en un momento dado de su trayectoria, la composición química del agua es el resultado de interacciones más o menos prolongadas de los flujos con el medio ambiente drenado. La litología determina, por lo general, las facies hidroquímicas dominantes en una región determinada, es decir, el tipo de agua o patrón hidrogeoquímico, mientras que el resto de los factores ejercen su influencia sobre el contenido de minerales disueltos. Por último, se debe destacar el papel que desempeña el factor antrópico en la composición química del agua. La actividad del hombre causa un deterioro progresivo de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

Tal como fue demostrado por Chebotarev (en Frezze y Cherry, 1980) mediante el procesamiento de más de 10 000 muestras de aguas de pozos, los aniones en las subterráneas tienden a evolucionar químicamente siguiendo aproximadamente la siguiente regularidad: $HCO_3^- \rightarrow SO_4^{2-} \rightarrow Cl^-$. Estos cambios ocurren en la medida que el agua se mueve desde zonas de grandes caudales (flujos locales), a través de zonas intermedias (flujos intermedios), hasta zonas donde los flujos son escasos y el agua es vieja desde el punto de vista geológico (flujos regionales).

En Cuba, las subterráneas están muy distribuidas en todo el territorio, particularmente aquellas que discurren por terrenos carbonatados. En general tienen un origen meteórico, incluyendo las aguas minerales, y su composición está relacionada con los procesos de interacción agua-roca con los materiales constitutivos del medio geológico drenado, tras un recorrido subterráneo más o menos largo, desde que se infiltran en la zona de alimentación del acuífero hasta que emergen por manantiales o son captadas en pozos. En el caso las aguas minerales, las emergencias están asociadas a dislocaciones tectónicas o contactos litológicos locales.

El presente trabajo tiene por objetivo estudiar patrones hidrogeoquímicos y el origen de la formación las aguas subterráneas de Cuba que drenan carbonatos del intervalo Jurásico-Neógeno (Figura 1), su evolución química a través de su trayectoria subterránea, los procesos geoquímicos que explican la composición de las mismas, así como la relación entre dicha composición y el medio geológico drenado. Este trabajo formará parte de otro más extenso que incluirá la caracterización hidrogeoquímica de flujos de diferente naturaleza que drenan otras litologías.

MATERIALES Y MÉTODOS

La constitución litológica de las diferentes formaciones geológicas fue tomada del Mapa Geológico de Cuba. Escala 1: 250 000 (Academia de Ciencias de Cuba, 1989).

Una parte de los datos hidroquímicos utilizados en el desarrollo de este trabajo corresponden a muestreos realizados por el colectivo, los cuales aparecen publicados o referidos en varios artículos: Rodríguez et al, 1989; 1991; Pulina y Fagundo, 1992; Fagundo et al, 1993; González et al, 2000; 2001. Otros datos hidroquímicos fueron tomados a partir de la información de archivo: Trelles, 1948; Rodríguez et al, 1989; 1990; Peláez et al, 1990; 1991; Valdés y García, 1993, y bases de datos del INRH. En el primer caso se realizaron en el campo mediciones de temperatura, pH, potencial redox mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh) modelo HI-8424, marca HANNA. Los contenidos de H_2S fueron también determinados "in situ" mediante las técnicas analíticas estándar, al igual que los contenidos de los principales constituyentes de las aguas (APHA, AWWA, WPCF, 1989).

La calidad de los datos fue chequeada mediante balance de aniones y cationes. Además, mediante el empleo del sistema informático HIDROGOQUIM (Fagundo et al, 2005 a), se comparó la conductividad eléctrica real y teórica, eliminándose aquellos datos de mala calidad. Mediante dicho programa de computación también se realizaron los diferentes cálculos geoquímicos y se determinó, en forma gráfica, la variación temporal del total de sólidos disueltos (TSS).

Para la clasificación de las aguas se utilizó el método hidroquímico de Kurlov. Los patrones hidrogeoquímicos y los procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química de las aguas fueron determinados mediante el sistema informático MODELAGUA (Fagundo-Sierra et al, 2001), basado en modelos de reconocimiento de patrones, balance de masas y de mezcla de aguas.

Aplicando MODELAGUA, la composición química del agua fue caracterizada a través de determinadas relaciones iónicas o patrones hidrogeoquímicos propuestos por Fagundo (1998). Estos patrones consisten en relaciones estequiométricas del tipo $Na + K : Mg : Cl : HCO_3 : SO_4$. Sobre esta base se establecen 729 patrones (27×27 combinaciones numéricas formadas por números enteros entre 1 y 9).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el objetivo de estudiar los patrones hidrogeoquímicos y el origen de la composición química de las aguas subterráneas de Cuba que drenan sedimentos carbonatados, se tomaron datos hidroquímicos de muestras representativas de las diferentes formaciones geológicas de Cuba constituidas por calizas y dolomitas. Para su procesamiento, los datos fueron separados en tres grupos acorde al carácter del sedimento y el intervalo de edad geológica según el siguiente criterio: calizas de origen sedimentario del intervalo Jurásico-Paleógeno de Cuba, calizas de origen sedimentario del Macizo Cretácico de Las Tunas, calizas de origen metamórfico de la Isla de la Juventud y calizas, calizas dolomitizadas y dolomitas de la cuenca M-1 del norte de Matanzas.

Depósitos carbonatados del intervalo Jurásico-Neógeno.

Los depósitos de Jurásico medio están ampliamente distribuidos en todo el país (Figura 1). En la Cordillera de Guaniguanico, en la provincia de Pinar del Río, están representados por calizas masivas y estratificadas, silicificadas, con intercalaciones y lentes de rocas silíceas (Formaciones Gusasa, Jagua y Artemisa). En los niveles superiores se encuentran

escasas intercalaciones de calizas arenosas (calcarenitas). Las rocas descansan en discordancia con depósitos del Jurásico inferior y medio. En la parte inferior del corte estas últimas rocas están representadas por esquistos arcillosos, menos frecuentes por areniscas y lentes calcáreos (Formación San Cayetano); la parte media está formada principalmente por areniscas, en algunos lugares se encuentran esquistos arcillosos y limonita, y la parte superior del corte está compuesta de esquistos arcillosos con intercalaciones de areniscas (Ergerov y Luege, 1967).

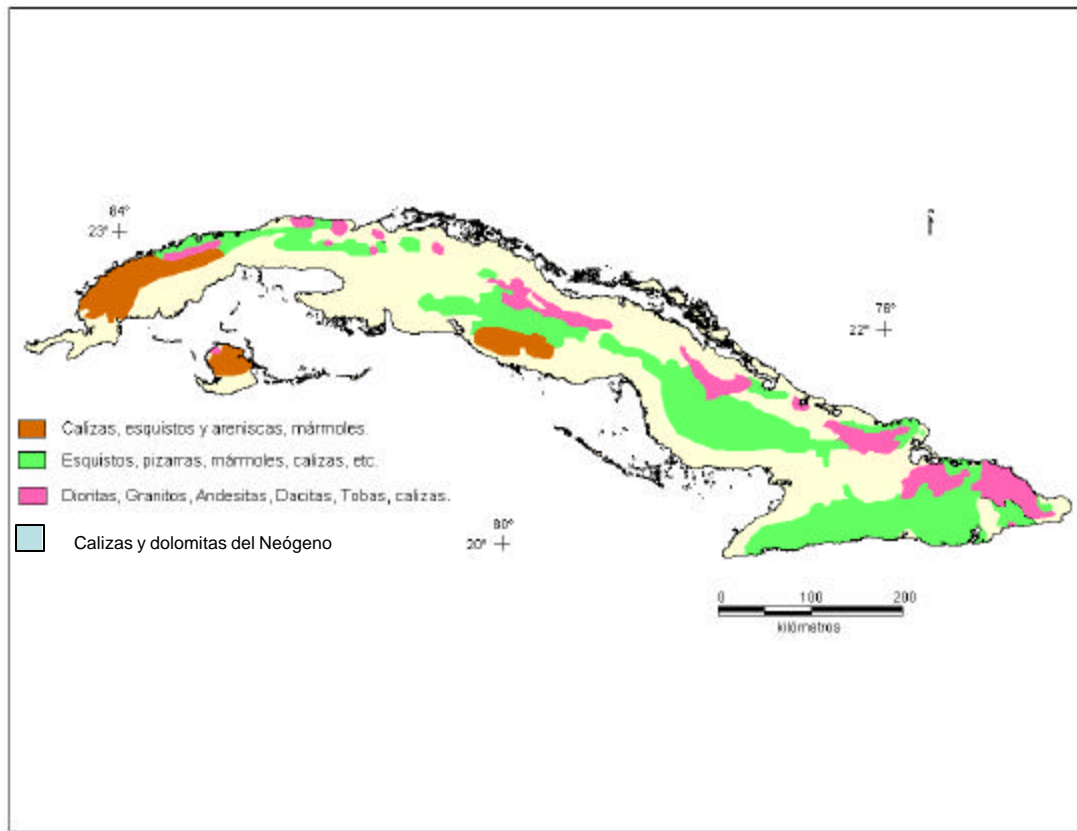


Figura 1. Mapa esquemático de las rocas carbonatadas de Cuba del intervalo Jurásico-Neógeno (cortesía de M. Iturralde Vinent).

En la tabla 1 las muestras aparecen ordenadas según el aumento del total de sólidos disueltos (TSS). Además de la concentración iónica expresada en mg/l, se presenta el tipo de agua acorde al criterio de clasificación Kurlov. En general, las aguas que presentan menor contenido de minerales disueltos son las de los tipos bicarbonatadas ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$ y $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Mg}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$), mientras la de mayor contenido de TSS se corresponden con las de tipo sulfatadas bicarbonatadas y sulfatadas ($\text{SO}_4>\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{SO}_4\text{-Ca}$, $\text{SO}_4\text{-Ca}>\text{Na}>\text{Mg}$).

Los principales patrones hidrogeoquímicos son los siguientes:

Aguas bicarbonatadas cálcicas: 271-181, 181-172, 181-181.

Aguas bicarbonatadas cálcicas magnésicas: 172-181, 253-181.

Aguas bicarbonatadas cálcicas sódicas: 271-181, 361-172.

Aguas bicarbonatadas sulfatadas cálcicas sódicas: 271-154.

Aguas sulfatadas bicarbonatadas cálcicas y cálcicas sódicas: 271-127, 361-127.

Aguas sulfatadas cálcicas: 181-118, 271-127.

Aguas sulfatadas cálcicas sódicas magnésicas: 352-217.

En la tabla 1 se presenta la composición química de algunas muestras representativas de estos depósitos, tomadas en la Cordillera de Guianiguanico.

Tabla 1. Composición química (mg/l) de las aguas que drenan calizas de origen sedimentario en la Cordillera de Guniguanico.

No	N	Muestra	Flujo	T	pH	CO ₂	H ₂ S	SiO ₂	TSS	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	Tipo de agua
1	38	S Ancón	FL	22.7	7.53	7.4	0.0	-	305	202.0	15.4	10.0	58.8	4.9	13.7	0.4	HCO ₃ -Ca
2	3	Lucas	FL	22.3	7.05	41.9	0.0	-	386	247.9	15.4	23.7	70.5	6.7	20.8	0.6	HCO ₃ -Ca
3	15	Los Portales	FI	25.1	7.29	18.8	0.0	12.1	423	255.0	10.1	52.0	93.3	8.7	3.2	0.2	HCO ₃ -Ca
4	18	Mil Cumbres	FI	22.7	7.42	16.2	0.0	-	438	271.1	16.9	37.0	85.8	5.4	21.4	0.5	HCO ₃ -Ca
5	10	PC-10 San Vic	FI	24.5	7.64	21.2	0.0	9.9	599	344.0	23.0	97.0	98.4	4.8	30.5	1.0	HCO ₃ >SO ₄ -Ca>Na
6	4	Soroa	FI	24.2	7.54	36.3	15.0	15.0	573	400.4	22.3	17.3	71.0	29.0	31.1	1.7	HCO ₃ -Ca>Mg>Na
7	7	Pedernales	FI	24.2	7.13	71.0	5.4	-	682	434.4	43.5	29.6	117.0	13.9	43.6	0.4	HCO ₃ -Ca>Na
8	12	El Templado	FR	38.5	7.01	65.8	11.5	11.9	1442	304.6	31.8	709.0	326.7	36.1	32.6	1.0	SO ₄ >HCO ₃ -Ca
9	11	La Gallina	FR	36.6	7.09	43.4	21.0	27.0	2176	221.2	34.4	1307.2	485.1	50.8	75.0	2.0	SO ₄ -Ca
10	8	M1 Bermejales	FR	31.0	7.60	53.9	39.3	30.0	2361	297.6	39.6	1354.0	471.5	50.5	143.7	4.2	SO ₄ -Ca
11	9	P-12	FR	30.0	7.42	41.6	51.2	17.2	2297	291.5	41.6	1310.9	437.1	52.7	157.9	8.4	SO ₄ -Ca>Na
12	30	P1 San DB	FR	40.0	7.20	38.0	39.7	34.2	3042	169.0	33.7	1969.9	636.8	70.4	150.2	12.0	SO ₄ -Ca

Tipo de flujo asignado: FL- Local, FI- Intermedio, FR- Regional o profundo.

En las figuras 2 se muestran, en forma gráfica los patrones hidrogeoquímicos de algunas muestras representativas.

En la figura 2 se ilustra en forma comprensible, mediante diagrama hidroquímicos de Staff, el patrón típico de la calcita en las aguas subterráneas correspondientes a flujos locales que drenan calizas puras (Surgencias cársicas Lucas y Ancón); un patrón que muestra un enriquecimiento en sulfato, en las aguas correspondientes a los flujos intermedios, de tipo bicarbonatadas sulfatadas cálcicas, posiblemente debido a la oxidación de la pirita presente en el propio sedimento (pozo P-10 San Vicente), y el patrón de un agua de tipo bicarbonatada cálcica magnésica sulfhídrica (aguas minerales de Soroa), donde el incremento en magnesio se produce como resultado de la interacción con dolomitas o serpentinitas subyacentes.

Los diagramas hidroquímicos correspondientes a flujos de mayor recorrido subterráneo (flujos de carácter más regional y profundo), poseen principalmente patrones de aguas sulfatadas bicarbonatadas cálcicas (manantial El Templado) y sulfatadas cálcicas y cálcicas sódicas (manantial La Gallina, Pozo P-1 y M1 Bermejales). Estos patrones pudieran originarse como resultado de los procesos de oxidación de piritas y el intemperismo de plagioclasas presentes ambos en los esquistos y areniscas subyacentes.

El incremento del SiO₂ con el TSS (Tabla 1) puede interpretarse como resultado de una trayectoria profunda del agua subterránea, teniendo en cuenta que este componente es más soluble a altas temperaturas y a pH ácidos o básicos (Apelo y Postma, 1993). El aumento del contenido de Cl⁻ con respecto al de carácter meteórico, también es un índice de recorrido de agua a mayor profundidad.

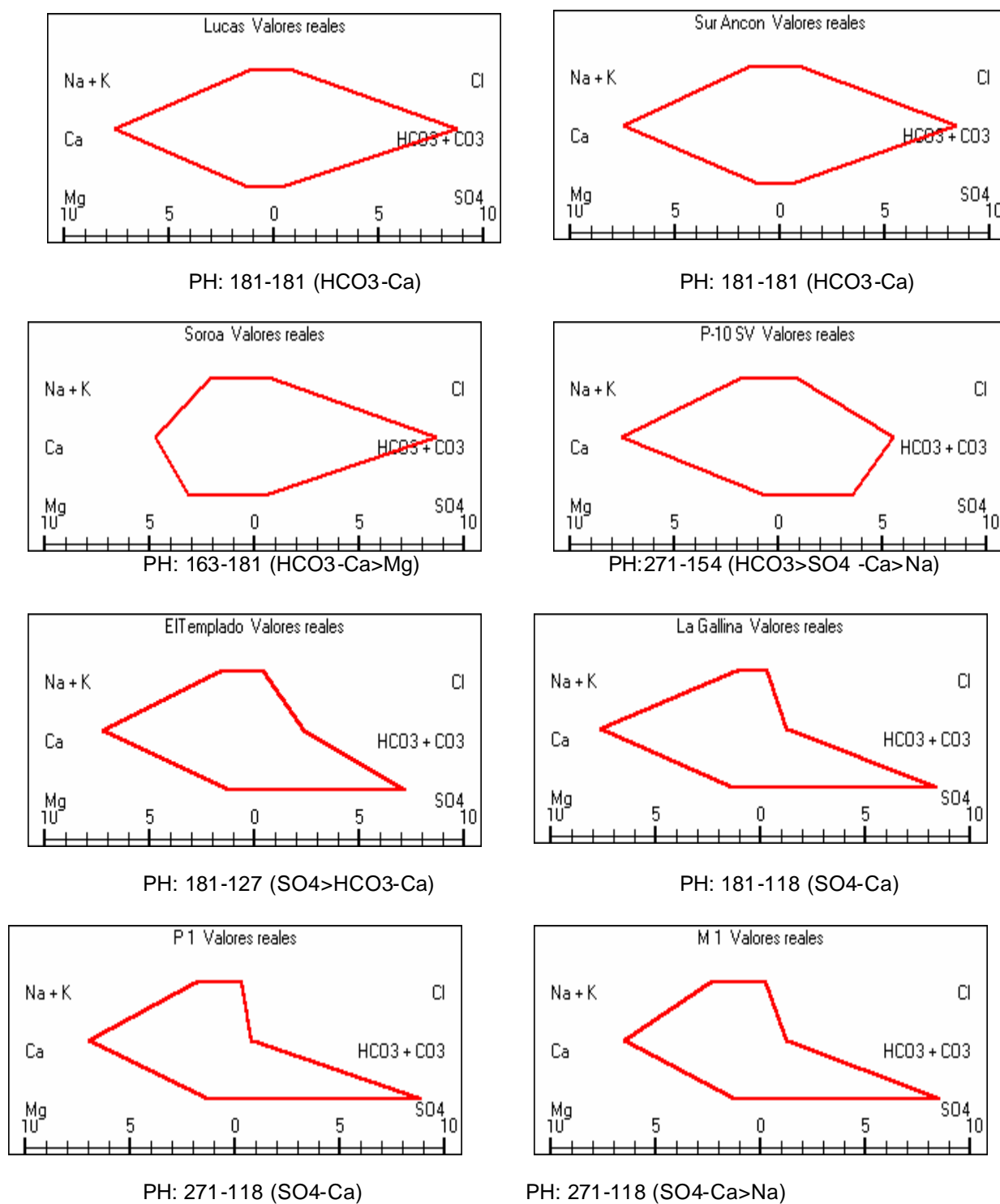


Figura 2. Patrones hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas que drenan carbonatos y areniscas del intervalo Jurásico-Paleógeno.

Del análisis de los resultados que se muestran en la tabla 1 y de los patrones presentados en la figura 2, se puede inferir que la composición química del sistema de flujos que drenan los carbonatos sedimentarios de la Cordillera de Guaniguanico, que interactúan con materiales acuíferos constituidos por minerales calcita, plagioclasa y pirita, tienden a evolucionar aproximadamente de la manera siguiente:

$\text{HCO}_3\text{-Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>SO}_4\text{-Ca} \rightarrow \text{SO}_4\text{>HCO}_3\text{-Ca} \rightarrow \text{SO}_4\text{-Ca}$

$\text{HCO}_3\text{-Ca>Na} \rightarrow \text{SO}_4\text{>HCO}_3\text{-Ca>Na} \rightarrow \text{SO}_4\text{-Ca}$

$\text{HCO}_3\text{-Ca>Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>SO}_4\text{-Ca>Mg} \rightarrow \text{SO}_4\text{>HCO}_3\text{-Ca>Mg} \rightarrow \text{SO}_4\text{-Ca}$

Aplicando el sistema informático MODELAGUA (Fagundo-Sierra et al, 2001), se determinan los procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química de esta agua (Tabla 2).

Tabla 2. Transferencia de masas (mg/l) originada por disolución o reacción química (+) o por precipitación o consumo (-) en los procesos geoquímicos que tienen lugar mediante procesos de interacción lluvia - roca (flujos locales, intermedios y de carácter más regional) en carbonatos del de la Cordillera de Guaniguanico.

Proceso geoquímico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Halita	16.0	20.5	7.5	18.5	28.7	27.4	32.4	47.2	50.0	48.2	59.2	46.2
Calcita	125.6	131.6	382.5	191.6	225.0	148.3	233.8	868.8	1054.1	977.4	828.3	1371.5
Dolomita	32.0	61.9	127.9	35.9	31.3	33.7	101.0	151.9	239.5	222.0	210.8	311.6
Serpentina	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.6	0.0	49.5	74.6	87.3	97.9	116.8
Plagioclasa	14.7	0.0	0.0	55.4	87.6	126.0	65.8	377.6	314.9	995.4	838.8	862.0
Microclino	0.1	6.0	0.0	0.8	8.7	9.7	7.5	32.8	29.1	67.0	58.6	69.6
Pirita	6.3	2.4	65.0	23.1	60.5	56.9	36.8	505.3	836.2	956.6	909.7	1301.3
H ₂ S	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.1	5.4	18.1	17.3	31.8	51.2	39.7
CO ₂	71.5	137.1	-37.8	99.5	133.1	165.2	433.3	-132.5	-422.2	-382.6	-400.0	-706.4

1) Surgencia Ancón; 2) M. Lucas; 3) M. Los Portales; 4) M. Mil Cumbres; 5) PC-10 San Vicente; 6) M. Soroa; 7) M. Pedernales; 8) M. El Templado; 9) M. La Gallina; 10) M-1 Bermejales; 11) P-12 Bermejales; 12) P-1 San Diego de los Baños.

En el caso de los flujos locales de menor recorrido subterráneo, tienen lugar los siguientes procesos geoquímicos: disolución de calcita y dolomita, y consumo de CO₂ en la zona del suelo, seguidos de disolución de halita, transferencia plagioclasa – caolinita y oxidación, de pirita. En los flujos donde el recorrido subterráneo es mayor (flujos intermedios), la transferencia de masa es superior y además se produce H₂S por reducción parcial del sulfato previamente originado por la oxidación de pirita. Como el proceso de oxidación de pirita va acompañado de la generación de CO₂, parte de la calcita disuelta pudiera formarse por consumo de este gas. En ocasiones, el magnesio es aportado principalmente por las serpentinitas.

Calizas sedimentarias del Macizo Cretácico de Las Tunas

En general, una parte de las aguas subterráneas utilizadas para el abasto público y agrícola en la provincia Las Tunas posee en su composición un alto contenido de NaCl disuelto, el cual es adquirido durante la infiltración del agua de lluvia a través de la zona de alimentación, especialmente en la zona del suelo. En experimentos de lavado de suelos

con agua destilada, realizado por el Instituto de Suelos de esa provincia, las aguas llegan a tomar, en uno de estos suelos, hasta 80,7 % de Cl^- y 57,0 % de Na^+ en los primeros 25 cm de profundidad.

En la tabla 3 se muestra la composición química de las fuentes seleccionadas para este estudio, las cuales drenan carbonatos cretácicos en la provincia de Las Tunas. Excepto el pozo P-195, de tipo bicarbonatada cálcica y con bajo TSS, las restantes muestran poseen, por lo general, facies de tipo bicarbonatadas cloruradas y cloruradas bicarbonatadas sódicas cálcicas magnesianas.

Tabla 3. Composición química media en mg/l de las fuentes seleccionadas de la provincia Las Tunas.

No	Pozo	N	T	pH	CO_2	TSS	HCO_3	Cl	SO_4	Ca	Mg	Na+K	Tipo de agua
1	P-195	16	25.0	7.44	25.8	533	232.4	30.5	15.4	92.6	16,0	23.7	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$
2	P-248	60	25.0	7.61	9.1	627	220.2	179.6	49.0	61.2	39	77.5	$\text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Mg}>\text{Ca}$
3	Central Jobabo	23	25.0	7.90	23.0	1438	630.1	335.1	52.8	130.4	54.5	229.5	$\text{HCO}_3>\text{Cl-Na}>\text{Ca}>\text{Mg}$
4	Quinta Planta	17	25.0	7.83	17.1	1481	533.8	329.1	46.1	135.2	47.4	244.7	$\text{HCO}_3>\text{Cl-Na}>\text{Ca}$
5	Edificio Parque	10	25.0	7.80	19.1	1030	605.7	126.7	34.6	124.0	47.4	47.4	$\text{HCO}_3>\text{Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg}$
6	La Siberia	12	25.0	7.82	27.4	1354	720.4	209.8	73.4	150.4	77.5	121.0	$\text{HCO}_3>\text{Cl-Ca}>\text{Mg}>\text{Na}$
7	Circunscrip. 7	11	25.0	7.73	27.7	1968	1008	200.6	214.6	143.8	53.3	345.7	$\text{HCO}_3>\text{Cl-Na}>\text{Ca}$
8	Cab. Colombia	13	25.0	7.54	52.3	1391	808.9	140.9	64.8	132.4	35.6	206.8	$\text{HCO}_3>\text{Cl-Na}>\text{Ca}$

El pozo P-195 posee un patrón hidrogeoquímico típico de una caliza pura (172-181). Las restantes muestran presentan patrones de tipo; 532-471, 532-361 y 532-271 que reflejan el alto contenido de Cl^- y Na^+ (Figura 3). Sin embargo, si a estas muestras se le extrae el contenido del NaCl , se obtienen patrones típicos de las calizas dolomitizadas o de mezcla de caliza y serpentinita (145-181, 154-181, 163-181) o de mezcla de caliza y arenisca (352-181, 532-172).

Del análisis de los resultados de la tabla 3 y la figura 3, se puede establecer que la evolución de la composición química relativa de las aguas que drenan los carbonatos sedimentarios cretácicos de la provincia Las Tunas, a lo largo de su trayectoria subterránea, sigue principalmente las siguientes secuencias:

a) Aguas que interactúan con calizas, calizas dolomitizadas y serpentinitas:

$\text{Cl-Na} \rightarrow \text{HCO}_3>\text{Cl-Ca}>\text{Mg}>\text{Na} \rightarrow \text{HCO}_3>\text{Cl-Na}>\text{Ca}>\text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3>\text{Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg} \rightarrow \text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Mg}>\text{Ca}.$

a) Aguas que interactúan con calizas, calcarenitas y areniscas:

$\text{Cl-Na} \rightarrow \text{HCO}_3>\text{Cl-Na}>\text{Ca}.$

En la tabla 4 se presentan los resultados del procesamiento mediante un modelo de balance de masas, de los datos hidroquímicos correspondientes a las fuentes de abasto de la provincia las Tunas.

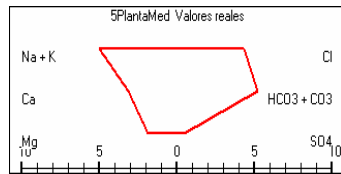
Patrones de valores reales

Patrones de ganancia iónica (extraído el NaCl)

PH: 523-541

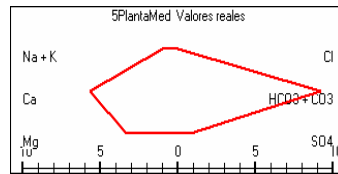
PH: 145-181

Fm. Contra maestre. P-248.

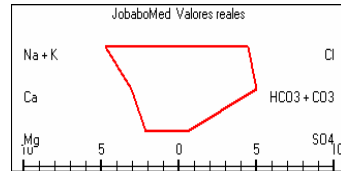


PH: 532-451

Fm. Contra maestre. Quinta Planta.

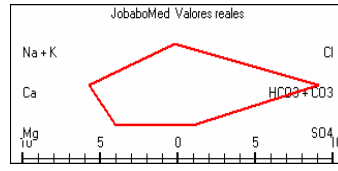


PH: 163-181

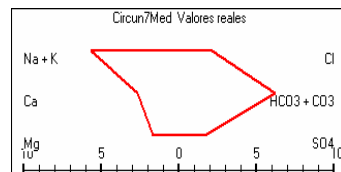


PH: 532-451

Fm. Contra maestre. Central Jobabo.

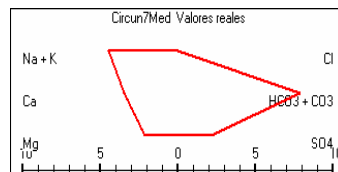


PH: 163-181



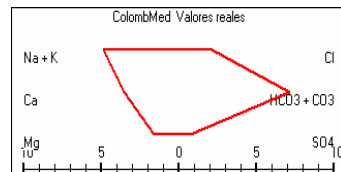
PH: 532-271

Fm. Guaimaro.



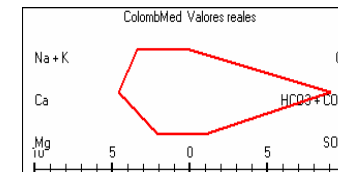
PH: 532-172

Circunscripción 7



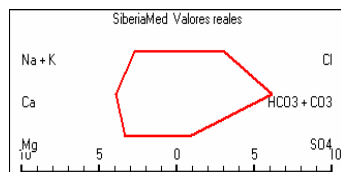
PH: 532-271

Fm. Guaimaro.



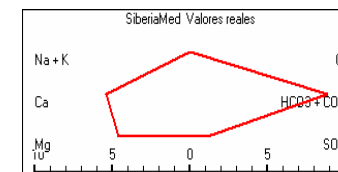
PH: 352-181

Cabecera Colombia



PH: 253-361

Fm. Guaimaro. La Siberia



PH: 154-181

Figura 3. Patrones hidrogeoquímicos reales y extraídos (a los cuales se le eliminó el contenido de NaCl), de las aguas que drenan sedimentos carbonatados del Cretácico con alto contenido de cloruro de sodio en la provincia Las Tunas.

Tabla 4. Transferencia de masas (mg/l) originada por disolución o reacción química (+) o por precipitación o consumo (-) en los procesos geoquímicos que tienen lugar mediante procesos de interacción lluvia - roca con carbonatos del Jurásico de origen sedimentario. Fuentes de abasto de la provincia las Tunas.

Proceso	1	2	3	4	5	6	7	8
Halita	42.0	282.5	565.5	555.0	207.5	207.5	334.3	231.8
Calcita	170.0	-168.0	122.5	127.6	107.5	107.5	52.5	168.0
Dolomita	116.8	335.8	412.2	357.9	357.9	357.9	403.0	267.7
Plagioclasa	0.0	0.0	0.0	395.7	137.5	137.5	2796.7	1489.6
Pirita	9.6	23.4	33.0	28.8	21.6	21.6	134.1	40.5
Ca-Na (Ca)	-12.0	53.0	-9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fc Cl	5.1	28.2	55.5	54.5	21.0	21.0	33.2	23.4

1) P-195; 2) P-248; 3) Central Jobabo; 4) Quinta Planta; 5) Edificio del Parque; 6) La Siberia; 7) Circunscripción 8; Cabecera Colombia.

Como puede apreciarse en la tabla XV, los procesos geoquímicos que en mayor medida aportan a la composición química de las aguas estudiadas en la provincia Las Tunas son calcita y dolomita en P-195 (muestra 1), halita y dolomita (o serpentinita) en las muestras 26, y halita y plagioclasa en las muestras 7-8. Estos resultados se corresponden con los de tipo analítico (Tabla XII) y con los patrones hidrogeoquímicos hallados (Figura 3)

Calizas del Jurásico de origen metamórfico

En la tabla 5 se presentan los resultados de la caracterización hidroquímica de las aguas minerales y potables que drenan los depósitos carbonatados metamórficos de la Isla de la Juventud.

Tal como se aprecia en la tabla XV, las aguas minerales de la Isla de la Juventud son fundamentalmente de tipo bicarbonatadas cálcicas (Santa Rita, Ojitos de Santa Lucía y Ferroso en la Fé), aunque también se presentan facies de tipo bicarbonatadas cálcicas magnésicas (Magnesiana de la Fé y El Rosario en Santa Bárbara) y bicarbonatadas cloruradas cálcicas sódicas (Magnesiana de Gerona), y sus contenidos de iones disueltos medios varían entre 224 y 417 mg/l. Los principales patrones hidrogeoquímicos de estas aguas son: 181-181 y 172-181 (Leonarte y Fagundo, 2005; Leonarte, 2006;).

Las aguas de abasto público de la cuenca hidrogeológica La Fé, son principalmente de tipo bicarbonatadas cálcicas, seguidas de bicarbonatadas cloruradas cálcicas sódicas y excepcionalmente se presenta una muestra de facies clorurada bicarbonatada cálcica sódica, con contenidos de TSS medios que varían entre 132 y 286 mg/l (5). Estas aguas deben su composición al proceso de interacción agua – roca, y la baja mineralización se explica por la poca solubilidad de los materiales acuíferos drenados, mármoles y esquistos. Los principales patrones hidrogeoquímicos de estas aguas son: 181-181, 172-181, 271-181 y 271-271.

En la cuenca hidrogeológica Gerona, la composición química que adquiere el agua subterránea no sólo está controlada por la interacción agua – roca con similares materiales acuíferos, sino también por los procesos de intrusión marina. Así se presentan facies con poco contenido de cloruro y de minerales disueltos (valores medios entre 126-241 mg/l), principalmente de tipo bicarbonatadas cálcicas magnésicas, sino también aguas con mayor

mineralización (valores medios entre 353-1061 mg/l), de los tipos $\text{HCO}_3\text{>Cl}$ - Ca>Na y Cl-Na>Ca . Los principales patrones hidrogeoquímicos (Figura 4) de estas aguas de baja mineralización (126-286 mg/l) son: 271-361 (aguas bicarbonatadas cloruradas cálcicas y cálcicas sódicas), 271-361 (aguas bicarbonatadas cálcicas), 172-181 (aguas bicarbonatadas cálcicas magnésicas); mientras que para las aguas de mediana y alta mineralización (353-1061 mg/l) afectadas por la intrusión salina, los patrones hidrogeoquímicos más típicos varían entre: 271-361 en las aguas menos salinizadas hasta 541-721 en las aguas con mayor contenido de cloruro de sodio.

En la figura 4 se muestran algunos patrones hidrogeoquímicos típicos de las aguas mineromedicinales de La Fé y de aguas de abasto público de las cuencas hidrogeológicas de La Fé y Gerona y su relación con la litología.

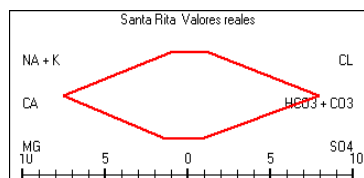
Tabla 5. Composición química de aguas minerales y de abasto de la Isla de la Juventud. Valores medios en mg/l.

N	Pozo	N	T	pH	CO ₂	SiO ₂	TSS	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	Tipo de agua
1	Rosario	1	39.4	7.00	16.9	13.5	224	134.6	22.0	11.4	34.2	8.6	13	0.6	HCO ₃ -Ca>Mg
2	Santa Rita	3	32.0	6.70	40.9	11.5	241	150.1	14.9	14.9	47.9	5.2	7.7	0.4	HCO ₃ -Ca
3	Ojitos SL	2	29.5	6.80	38.6	10.3	282	173.9	17.7	19.2	55.9	4.7	10.4	0.6	HCO ₃ -Ca
4	Ferroso	2	28.0	6.60	63.3	19.0	298	177.0	22.7	20.2	59.7	5.1	13.1	0.7	HCO ₃ -Ca
5	Magnes Fé	2	29.0	6.80	40.2	12.2	299	180.6	20.6	25.0	56.7	6.1	9.4	0.5	HCO ₃ -Ca>Mg
6	Magnes G	1	27.0	7.50	9.0	19.4	417	204.0	81.2	12.0	82.4	6.0	30.0	1.2	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
7	F-15	38	25	7.05	26.2		185	118.8	12.1	8.3	35.2	4.9	6.1	0.0	HCO ₃ -Ca
8	F-94	68	25	7.05	23.3		198	124.4	15.0	8.5	36.9	4.6	8.9	0.0	HCO ₃ -Ca
9	F-25	98	25	6.82	50.6		235	148.1	16.3	11.3	45.3	5.3	8.0	0.8	HCO ₃ -Ca
10	F-85	54	25	6.98	29.9		255	160.0	17.4	12.9	51.2	4.1	9.6	0.2	HCO ₃ -Ca
11	F-52	55	25	7.09	36.6		265	157.8	26.7	11.4	48.2	5.3	15.3	0.3	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
12	F-84	11	25	7.49	12.4		275	186.5	13.8	5.2	56.1	4.6	8.6	0.0	HCO ₃ -Ca
13	F-20	85	25	6.59	93.6		356	185.7	35.2	39.1	68.9	5.1	20.0	1.7	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
14	F-86	25	25	6.98	40.0		365	211.5	37.5	19.6	65.2	7.5	23.5	0.5	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
15	G-57	32	25	6.89	18.2		126	71.1	17.4	3.3	21.3	3.3	9.1	0.0	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
16	G-28	49	25	6.97	31.7		239	141.8	29.3	4.7	43.4	5.7	13.7	0.3	HCO ₃ >Cl-Ca
17	G-77	56	25	7.26	17.0		241	159.5	16.4	5.6	40.2	8.5	10.5	0.0	HCO ₃ -Ca>Mg
18	G-38	75	25	7.03	29.7		286	131	22.0	57.0	51.4	7.5	17.0	0.0	HCO ₃ >SO ₄ -Ca
19	G-87	59	25	6.96	27.8		353	138.7	95.4	12.4	55.8	7.2	42.4	0.9	Cl>HCO ₃ -Ca>Na
20	G-63	30	25	6.99	34.4		394	148.2	111.8	14.5	52.5	10.9	55.8	1.7	Cl>HCO ₃ -Ca>Na
21	G-61	23	25	7.17	15.4		627	141.8	248.1	34.0	69.6	18.9	111.6	3.5	Cl>HCO ₃ -Na>Ca
22	G-48A	15	25	7.13	13.4		1061	170.0	478.1	57.0	116.7	31.8	201.0	6.2	Cl-Na>Ca

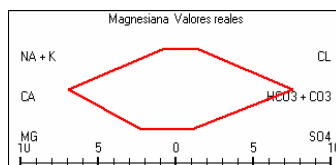
1-M. Rosario (Santa Bárbara); 2- M. Santa Rita (La Fé); 3- M. Ojitos de Santa Lucia (La Fé); 4- M. Ferroso (La Fé); 5- M. Magnesiano (La Fé); 6- M. La Magnesiana (Gerona); 7-14: Fuentes de abasto de la cuenca hidrogeológica La Fé; 15-22: Fuentes de abasto de la cuenca hidrogeológica Gerona.

A partir de la información que presentan la tabla 5 y la figura 4, se puede inferir que la tendencia evolutiva de las aguas que drenan los mármoles y esquistos de la Isla de la Juventud es aproximadamente:

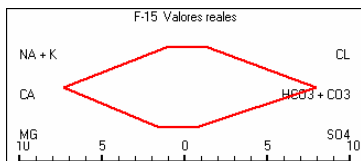
$\text{HCO}_3\text{-Ca (Ca>Mg)} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca>Na} \rightarrow \text{Cl>HCO}_3\text{-Na>Ca} \rightarrow \text{Cl-Na>Ca}$



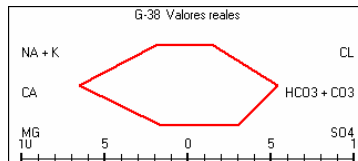
PH: 181-181 (HCO₃-Ca)



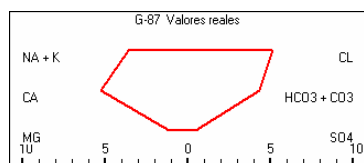
PH: 172-181 (HCO₃-Ca>Mg)



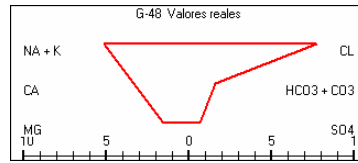
PH: 181-181 (HCO₃-Ca)



PH: 271-253 (HCO₃>SO₄-Ca)



PH: 451-541 (Cl>HCO₃-Ca>Na)



PH: 532-811 (Cl-Na>Ca)

Figura 4. Patrones hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas que drenan esquistos y mármoles.

El hecho de que algunos pozos en la cuenca hidrogeológica de Gerona, adquieren un relativamente alto grado de cloruro de sodio como consecuencia de la intrusión salina debe ser objeto de atención, teniendo en cuenta que este fenómeno se presenta en cualquier tipo de acuífero costeros abiertos e islas oceánicas (Post, 2005). Esto es particularmente grave en los lugares en que las precipitaciones son escasas, aunque también debe ser objeto de control en zonas tropicales de alta precipitación, en las que los acuíferos están sometidos a un uso intensivo.

Aplicando el sistema informático MODELAGUA (Fagundo Sierra et al, 2001) a los datos hidroquímicos de la Isla de la Juventud, se determinaron los procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química de estas aguas. Los datos fueron separados en dos grupos, el primero constituido por las aguas cuya composición se adquiere del proceso de interacción agua – roca (aguas minerales y aguas subterráneas potables de las cuencas hidrogeológica La Fé y Gerona con bajo contenido de cloruro), y el segundo por el grupo de aguas que poseían un alto contenido de cloruro, aportado presumible por la intrusión marina (fuentes afectadas por la intrusión salina en la cuenca hidrogeológica Gerona). Los resultados del procesamiento se presentan en las tablas 6a y 6b respectivamente.

Tabla 6. Transferencia de masas (mg/l) originada por disolución o reacción química (+) o por precipitación o consumo (-) en los procesos geoquímicos que tienen lugar mediante procesos de interacción lluvia - roca con carbonatos del Jurásico de origen metamórfico. Fuentes de aguas minerales y de abasto, Isla de la juventud.

6 a- Procesos de interacción agua de lluvia-roca.

Proceso geoquímico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Halita	14.6	21.6	38.0	23.4	58.5	24.6	31.9	15.2	48.6	19.3	26.9
Calcita	88.0	109.5	93.5	78.5	131.0	87.0	63.0	68.5	145.0	31.5	100.5
Dolomita	32.4	23.4	38.7	73.8	73.8	55.8	27.0	28.8	32.4	18.9	50.4
Pirita	7.5	6.6	6.9	11.1	11.1	6.3	5.1	5.4	24.3	2.1	35.7
Na-Ca (Ca ²⁺)	3.1	3.6	2.4	6.5	6.5	6.5	2.9	1.9	2.4	3.4	-1.9
CO ₂	85.8	122.1	74.8	73.0	73.0	36.5	60.1	74.8	136.6	35.6	44.4

1) M. Santa Rita (La Fé); 2) M. Hierro (La Fé); 3) M. Ojitos de Santa Lucía (La Fé); 4) M. Magnesio (La Fé); 5) M. Magnesio (Gerona); 6) M. Rosario (Santa Bárbara); 7) Pozo F-15 (La Fé); 8) Pozo F-94; 9) Pozo F-20 (La Fé); 10) Pozo G-57 (Gerona), 11) Pozo G-38 (Gerona).

6 b- Procesos de interacción agua de lluvia-roca-agua de mar.

Proceso geoquímico	12	13	14	15	16	17
% de mezcla con agua de mar	0.2	0.4	0.4	1.0	1.3	2.4
Calcita	46.0	11.9	125.7	9.9	-161.1	17.8
Dolomita	-9.8	-187.7	2.2	-13.6	-8.6	-14.5
Sulfato	0.0	-30.6	-4.6	-1.0	-2.5	-1.6
Na-Ca (Ca ²⁺)	35.2	8.1	2.8	9.2	6.3	50.4
CO ₂	54.5	8.9	118.8	20.1	164.3	22.7

Pozos de la cuenca hidrogeológica Gerona: 12) G-50; 13) G-87; 14) G-34; 14) G-19; 16) G-13; 17) G-48 A. Agua dulce: Pozo F-15; Agua de mar: Playa Cajío.

Como puede apreciarse en la tabla 6a tanto las aguas minerales como las de abasto público, de poca mineralización y contenido de cloruro (Tabla XVI), adquieren su composición química, principalmente, mediante proceso de disolución de halita, calcita y dolomita, oxidación de pirita e intercambio iónico directo.

Las aguas de abasto afectadas por la intrusión marina en la cuenca Gerona, con mezcla con agua marina entre 0.2 y 2.4 % (Tabla 6b), adquieren su composición, además del aporte iónico del agua de mar, mediante procesos geoquímicas de disolución de calcita, dolomitización, reducción anaeróbica de sulfato e intercambio iónico inverso.

CALIZAS SEDIMENTARIAS DEL MACIZO CRETÁCICO DEL INTERVALO NEÓGENO-CUATERNARIO.

Los sedimentos carbonatados del intervalo Neógeno-Cuaternario son los que se encuentran más ampliamente distribuidos por todo el país (Figura 1). Con el objetivo de caracterizar las aguas que drenan estos depósitos desde el punto de vista hidrogeoquímico, fueron seleccionados un grupo de pozos ubicados en las cuencas hidrogeológicas M-1 y M-5, al norte de la provincia de Matanzas. En la tabla 7 se presentan los resultados de la caracterización hidroquímica de las aguas de abasto escogidas para este estudio, que drenan los depósitos carbonatados del Mioceno.

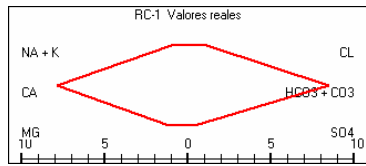
Tabla 7. Composición química de las fuentes de abasto de las Cuencas Hidrogeológicas M-1 y M-5, perteneciente a la Cuenca Norte de Matanzas. Valores medios en mg/l.

No	Muestra	N	T	Cuen -ca	pH	CO2	TSS	HCO3	Cl	SO4	Ca	Mg	Na+K	Tipo de agua
1	RC-18	32	25.0	M-1	7.27	23.8	418	278.6	21.3	12.7	80.0	11.8	13.1	HCO3-Ca
2	RC-7	52	25.0	M-1	7.32	24.0	422	285.9	19.9	8.3	88.8	7.4	12.1	HCO3-Ca
3	RC-5	34	25.0	M-1	7.22	30.3	437	294.9	20.8	10.6	86.7	10.6	13.8	HCO3-Ca
4	RC-25	17	25.0	M-1	7.23	27.7	439	297.5	18.9	10.2	95.3	6.3	10.7	HCO3-Ca
5	RC-3	33	25.0	M-1	7.29	26.0	439	295.5	20.8	11.8	83.9	13.9	13.5	HCO3-Ca>Mg
6	RC-6	30	25.0	M-1	7.26	27.2	443	296.9	23.8	10.7	84.8	13.8	13.3	HCO3-Ca
7	RC-21	14	25.0	M-1	7.59	10.7	444	281.7	33.2	17.1	71.0	21.4	19.7	HCO3-Ca>Mg
8	RC-8	22	25.0	M-1	7.42	18.3	449	301.8	22.4	11.6	88.6	10.9	13.5	HCO3-Ca
9	RC-1	27	25.0	M-1	7.35	21.3	455	302.4	23.7	12.2	94.8	8.3	13.7	HCO3-Ca
10	RC-13	25	25.0	M-1	7.38	22.8	468	324.0	26.5	9.5	61.3	33.5	14.3	HCO3-Ca>Mg
11	RC-39	11	25.0	M-1	7.37	19.6	522	298.4	69.9	14.6	96.2	14.4	28.5	HCO3>Cl-Ca
12	RC-189	55	25.0	M-5	7.09	55.2	524	450.1	72.6	43.1	91.6	44.0	54.2	HCO3-Ca>Mg
13	RC-299	20	25.0	M-5	7.45	18.7	536	378.6	25.4	10.5	72.5	36.6	12.7	HCO3-Ca>Mg
14	RC-348	8	25.0	M-5	7.18	42.0	536	387.0	18.7	9.5	75.0	38.4	7.2	HCO3-Ca>Mg
15	RC-187	37	25.0	M-5	7.15	41.4	555	388.6	25.3	12.3	76.6	37.6	15.0	HCO3-Ca>Mg
16	RC-186	52	25.0	M-5	7.23	36.4	564	395.7	24.4	13.6	76.2	37.9	16.0	HCO3-Ca>Mg
17	RC-225	12	25.0	M-5	7.16	44.1	569	400.5	24.7	11.8	79.1	35.4	17.6	HCO3-Ca>Mg
18	RC-227	13	25.0	M-1	7.47	25.6	614	401.3	33.0	36.5	71.4	41.4	30.0	HCO3-Ca>Mg
19	RC-230	5	25.0	M-5	7.52	20.3	639	370.4	80.4	27.2	78.9	39.5	42.3	HCO3>Cl-Ca>Mg
20	RC-16	26	25.0	M-1	7.29	24.6	715	319.2	153.7	31.6	95.8	26.9	87.8	HCO3>Cl-Ca>Na>Mg
21	RC-23	18	25.0	M-1	7.46	14.7	723	305.3	168.2	37.7	67.5	33.4	110.5	HCO3>Cl-Na>Ca>Mg
22	RC-298	20	25.0	M-5	6.98	7.15	821	494.5	80.9	41.0	92.1	54.4	58.5	HCO3>Cl-Ca>Mg
23	RC-2	41	25.0	M-1	7.24	30.9	852	320.2	236.7	40.2	97.2	29.0	128.6	Cl>HCO3-Na>Ca
24	RC-26	18	25.0	M-1	7.31	24.3	875	337.9	225.5	56.0	68.4	42.4	147.3	Cl>HCO3-Na>Mg>Ca
25	RC-222	10	25.0	M-5	7.27	41.6	1483	463.9	711.4	75.6	115.7	72.1	403.4	Cl>HCO3-Na>Ca>Mg

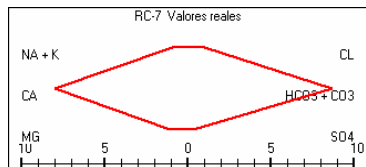
En la figura 3 se muestra, en forma gráfica la evolución con respecto a la salinidad de los patrones hidrogeoquímicos de las aguas de las cuencas hidrogeológicas M-1 y M-5 (Cuenca Norte de Matanzas).

De los resultados que se muestran en la tabla 7 y la figura 3, se puede establecer la presencia de tres grupos de agua, teniendo en cuenta su evolución química.

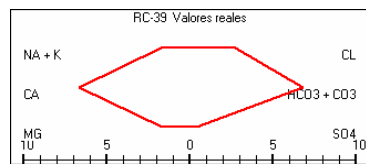
Cuenca M-1



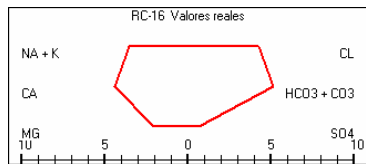
PH: 181-181



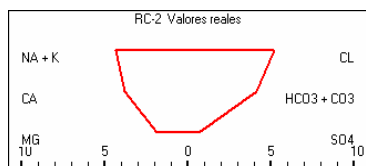
PH: 181-181



PH: 271-271

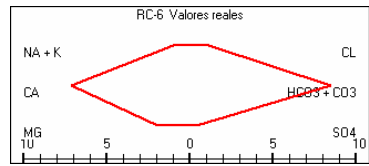


PH: 352-451

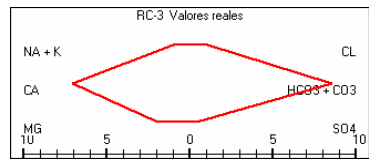


PH: 532-541

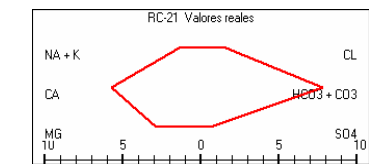
Cuenca M-1



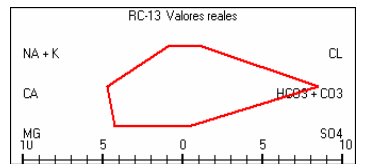
PH: 172-181



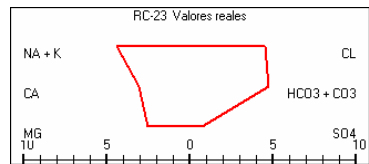
PH: 172-181



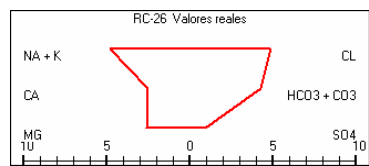
PH: 163-181



PH: 154-181

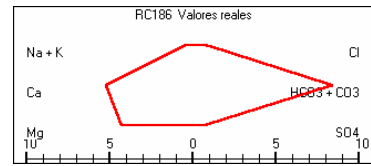


PH: 532-451

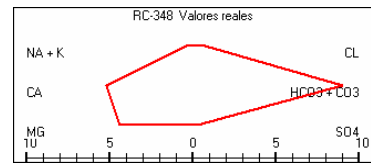


PH: 523-541

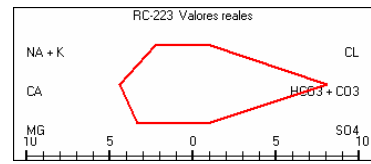
Cuenca M-5



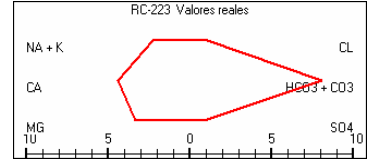
PH: 154-181



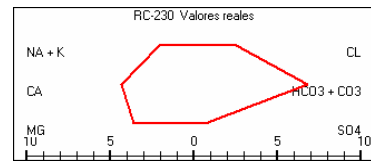
PH: 154-181



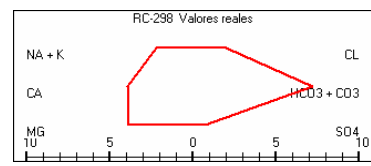
PH: 253-181



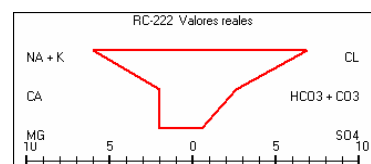
PH: 253-271



PH: 253-271



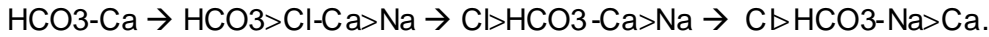
PH: 253-271



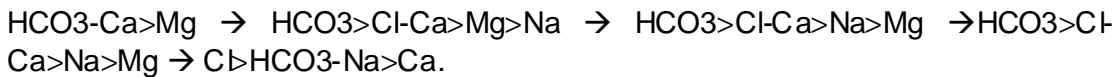
PH: 613-721

Figura 3. Patrones hidrogeoquímicos de pozos de abasto de las Cuenas M-1 y M-5, Matanzas.

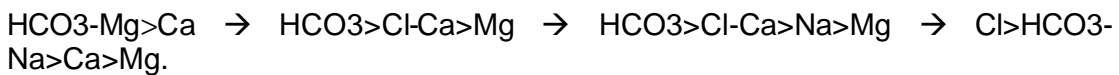
El grupo I está integrado por aquellas aguas que poseen en su composición el más bajo contenido de magnesio. En el se agruparon las fuentes de abasto: RC-18, RC-7, RC-5, RC-25, RC-8, RC-1, RC-39, RC-16, RC-23 y RC-2 (Cuenca M-1). La litología predominante en esta en esta parte del acuífero es la caliza relativamente pura y la facies originada por los procesos de interacción agua-roca en la zona alejada de mar es de tipo bicarbonatada cálcica (patrón hidrogeoquímico 181-181), evolucionando en su interacción con el agua de mar de la siguiente manera:



El grupo II lo forman las aguas que drenan calizas dolomitizadas, siendo las facies hidroquímicas de menor salinidad la bicarbonatada cálcica magnesiana de patrones 172-181 y 163-181. Las fuentes de abasto en este caso son: RC-3, RC-6, RC-21, RC-13, RC-23 y RC-26 (Cuenca M-1). El camino de evolución en este caso es:



El grupo III esta formado por las aguas que poseen mayor contenido de magnesio en su composición, como resultado de interactuar dolomitas. La facies hidroquímica menos salina es de tipo bicarbonatada cálcica magnesiana, con patrón hidrogeoquímico 154-281. Las fuentes de abasto en este caso son: RC-189, RC-299, RC-187, RC-186, RC-225, RC-227, RC-230, RC-298 y RC-222 (Cunca M-5). Sus aguas evolucionan según el siguiente camino:



El origen de la composición química de las aguas de abasto de las cuencas M-1 y M-5 se puede explicar mediante los procesos geoquímicas que se ilustran en las tablas 8 y 9.

6 a- Procesos de interacción agua de lluvia-roca.

Proceso geoquímico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Halita	29.8	23.4	21.6	25.7	23.9	29.8	25.2	45.7	31.0	21.6	32.8	31.6
Calcita	195.5	186.0	206.0	146.5	171.0	146.5	140.0	82.0	152.0	15.0	18.5	52.0
Dolomita	57.0	50.6	41.4	83.7	74.5	99.4	99.4	156.4	285.2	284.3	271.4	262.2
Pirita	7.5	5.1	6.3	8.1	6.6	6.6	7.2	10.8	8.4	6.0	6.6	7.5
Na-Ca (Ca^{2+})	2.4	1.8	2.2	1.6	0.4	2.8	1.0	2.6	-44.8	5.4	4.4	-0.4
CO_2	115.3	113.3	121.0	109.4	121.0	118.4	114.8	-11.4	109.4	167.4	142.6	173.4

1) RC-1(M-1); 2) RC-7(M-1); 3) RC-25 (M-1); 4) RC-18; 5) RC-5; 6) RC-6 (M-1); 7) RC-3 (M-1); 8) RC-21 (M-1); 9) RC-186 (M-5); 10) RC-348 (M-5), 11) RC-299(M-5); 12) RC-225 (M-5).

6 b- Procesos de interacción agua de lluvia-roca-agua de mar.

Proceso geoquímico	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
% de mezcla con agua de mar	0.1	0.3	0.7	0.8	1.0	1.1	0.1	0.3	0.3	3.6
Calcita	-118.7	46.9	-5.7	-8.5	-132.8	-61.6	97.4	-5.6	23.0	12.7
Dolomita	107.8	37.5	90.5	132.1	174.4	66.4	1.3	-20.2	92.7	-74.2
Sulfato	3.5	-0.8	4.2	6.8	14.8	3.8	18.1	6.8	15.2	-6.1
Na-Ca (Ca ²⁺)	-0.8	9.3	-1.9	-14.5	-20.2	3.0	-29.4	-1.1	-14.8	-9.8
CO ₂	5.1	20.6	-5.0	-16.7	2.1	5.7	26.7	-30.4	22.3	48.2

13) RC-21 (M-1); 14) RC-39 (M-1); 15) RC-16 (M-1); 16) RC-23 (M1); 17) RC-26 (M-1); 18) RC-2 (M-1); 19) RC223 (M-5); 20) RC-230 (M-5); 21) RC-298 (M-5); 22) RC-222 (M-5).

De los resultados que aparecen en la tabla 23, se deduce que las fuentes estudiadas en las cuencas M-1 y M-5 presentan buena calidad. Sólo algunas fuentes poseen ligera intrusión marina (0.1 – 1.1 % de mezcla con agua de mar en la cuenca M-1 y 0.1 – 3.6 % en la cuenca M-5). En las aguas cuya composición se origina por procesos de interacción agua-roca, los principales procesos geoquímicos que se producen son la disolución de halita, calcita y dolomita. En las aguas donde hay ninguna intrusión, los principales procesos geoquímicos que originan su composición son: disolución o precipitación de calcita y dolomita. En menor proporción se produce también oxidación de pirita o reducción de sulfato e intercambio iónico de carácter directo o inverso.

CONCLUSIONES

Las principales facies hidroquímicas presentes en las aguas subterráneas que drenan carbonatos sedimentarios del intervalo Jurásico-Paleógeno son: bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas cálcico magnésicas, bicarbonatadas mixtas y sulfatadas cálcicas, en cuencas no costeras, evolucionando con respecto a los aniones en el sentido: $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$. Los cationes presentes depende del tipo de roca drenada a lo largo del recorrido del agua: las calizas aportan principalmente Ca^{2+} y Mg^{2+} (cuando están dolomitizadas); los esquistos y areniscas, Na^+ , y las serpentinitas, Mg^{2+} . Cuando las aguas en su recorrido interactúan con varias litologías, poseen una composición mixta de cationes. Las facies bicarbonatadas están relacionadas con los flujos de carácter más local o intermedio, mientras que las facies sulfatadas corresponden a los flujos de carácter más regional y profundo que interactúan con piritas. En general la concentración tanto de macro como micro constituyentes se incrementa en la dirección del flujo, con el mayor tiempo de contacto agua-roca. Las aguas más profundas y de mayor recorrido se caracterizan por presentar una mayor y más estable temperatura, mayor

contenido de gases (H_2S , CO_2) y minerales disueltos (TSS), y de algunos componentes minoritarios (SiO_2 , F, Sr, Li, As, etc), existiendo correlaciones matemáticas altamente significativas entre SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , CaCO_3 y TSS. En las aguas de menor recorrido subterráneo las mejores correlaciones se presentan entre HCO_3^- , Ca^{2+} , CaCO_3 y TSS.

Los principales procesos geoquímicos que explican la composición química de estas aguas son: disolución congruente de halita, yeso, calcita, dolomita y serpentinita; disolución incongruente de plagioclasa; oxidación de pirita; reducción de sulfato, generación o escape de CO_2 y disolución o precipitación de sílice; así como por mezcla de aguas en diferentes proporciones.

Las aguas subterráneas que en su composición presentan alto contenido de NaCl, debido a que su recorrido adquieren una gran salinidad durante su infiltración por la zona de alimentación del acuífero, especialmente con suelos salinos, se caracterizan por presentar un alto contenido de minerales disueltos y su composición sigue los siguientes caminos evolutivos: $\text{Cl-Na} \rightarrow \text{HCO}_3 > \text{Cl-Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} \rightarrow \text{HCO}_3 > \text{Cl-Na} > \text{Ca} > \text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3 > \text{Cl-Ca} > \text{Na} > \text{Mg} \rightarrow \text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca}$ (en presencia de calizas dolomitizadas o serpentinitas); $\text{Cl-Na} \rightarrow \text{HCO}_3 > \text{Cl-Na} > \text{Ca}$ (en presencia de calizas, calcarenitas y areniscas). En el origen de la composición química de esta agua dominan los procesos geoquímicos de disolución de halita, calcita dolomita (o serpentinita) y plagioclasa.

En las cuencas litorales las facies principales son bicarbonatadas cloruradas cálcicas sódicas o sódicas cálcicas en dependencia del grado de mezcla del agua dulce con el agua de mar. Con respecto a los aniones, evolucionan según: $\text{HCO}_3\text{-Ca} (\text{Ca} > \text{Mg}) \rightarrow \text{HCO}_3 > \text{Cl-Ca} > \text{Na} \rightarrow \text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{Na} > \text{Ca} \rightarrow \text{Cl-Na} > \text{Ca}$. En dirección a la costa las aguas tienden a incrementar su contenido de Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ y TSS, presentándose, por lo general correlaciones altamente significativas entre estos componentes. La dureza del agua suele ser mucho más alta en comparación con las aguas procedentes de las cuencas interiores como resultado del efecto salino. Contenidos extraordinariamente elevados de calcio pueden encontrarse en acuíferos contiguos a humedales a causa de los procesos modificadores de la composición química resultantes de los procesos de mezcla con el agua marina.

En los acuíferos cársicos desarrollados en cuencas interiores, los principales procesos que explican la composición química del agua son: disolución de calcita y dolomita, oxidación de pirita e intercambio iónico directo.

En los acuíferos cársicos litorales la composición química del agua se explica mediante procesos geoquímicos de disolución o precipitación de calcita y dolomita, dolomitización, oxidación de pirita, intercambio iónico directo e inverso y reducción anaeróbica de sulfato.

Las aguas correspondientes a los flujos de mayor recorrido subterráneo, que drenan carbonatos del intervalo Jurásico-Paleógeno, constituidos por calizas, dolomitas y mármoles, de poco caudal, suelen ser útiles para uso terapéutico (aguas mineromedicinales de la Isla de la Juventud, San Vicente, San Diego de los Baños, Soroa, San José del Lago y otras); las que drenan este tipo de depósitos, pero poseen un recorrido menor (flujos de carácter intermedio), son útiles como aguas de mesa embotellada o para abasto público a pequeñas comunidades. Las aguas de más corto recorrido subterráneo, correspondientes

a flujos de carácter más local, generalmente de mayor caudal, se suelen utilizar para el abasto público o con fines agrícolas, aunque en zonas costeras es necesario vigilar la explotación del acuífero para lograr un agua de calidad deseable, debido a los procesos de intrusión marina.

Las aguas subterráneas que drenan carbonatos del intervalo Neógeno – Cuaternario, constituidos por calizas y dolomitas, en cuencas que tienen contacto hidráulico con el mar pueden ser agrupadas en tres grupos acorde a su contenido relativo de calcio y magnesio. Las facies hidroquímicas de estas aguas siguen el siguiente camino de evolución:

Grupo I: $\text{HCO}_3\text{-Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg} \rightarrow \text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na} \rightarrow \text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Ca}$.

Grupo II: $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Mg}>\text{Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg} \rightarrow \text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Ca}$.

Grupo III: $\text{HCO}_3\text{-Mg}>\text{Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-Mg}>\text{Ca}>\text{Na}$

En las cuencas M-1 y M-5 de la provincia de Matanzas, las aguas estudiadas poseen buena calidad, los principales procesos geoquímicos que originan su composición son: disolución de halita, calcita y dolomita. En menor proporción se produce también oxidación de pirita e intercambio iónico. En las aguas que presentan ligera intrusión marina prevalecen los procesos de disolución o precipitación de calcita y dolomita, acompañados de oxidación de pirita o reducción anaeróbica de sulfato y de intercambios iónicos directos o inversos.

BIBLIOGRAFÍA

Academia de Ciencias de Cuba (1989). Instituto de Geología y Paleontología, Mapa Geológico de Cuba. Escala 1: 250 000.

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.

Appelo C. A. J. and D. Postma (1993). Geochemistry, Groundwater and Pollution. Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 536 pp.

Arellano, M, y J.R. Fagundo (1985). Criterio acerca de la zonación geoquímica de un acuífero cársico mediante índices químico-físicos, parámetros hidroquímicos y relaciones iónicas. Voluntad Hidráulica, 66: 2-13.

Armijo-Valenzuela, M. y J. San Martín (1994). Clasificación de las aguas mineromedicinales. En: Curas Balnearias y Climáticas. Talasoterapia y Helioterapia, Ed. Complutense, Madrid, 219-223.

Ergorov, S.V. y J.R. Luge (1967). Hidrogeología de Cuba. INRH, ICRM, La Habana, 84 pp.

Fagundo, J.R. (1990). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. I- Estudio mediante simulación química del efecto de la litología. Voluntad Hidráulica, 82: 28-37.

Fagundo, J.R., J.E. Rodríguez, V. Ferrera y P. González (1997). Geoquímica de acuíferos cársticos de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds.:D.M. Arellano, M.A. Gómez, I. Antigüedad, Universidad del País Vasco, Bilbao (España), 135-149.

Fagundo, J.R. Química del Agua Kárstica (1996). En: Hidroquímica del Karst. Editores: J.R. Fagundo, J.J. Valdés y J.E. Rodríguez. Ediciones Osuna, Universidad de Granada (España), 14-119.

Fagundo, J.R. (1998). Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales. Ingeniería Hidráulica, 19 (2): 62-78, ISSN 0253-0678.

Fagundo, J.R., P. González, G. Benítez, S. Jiménez, V. Ferrera, A. González, E. Romero y D. Orihuela (1999). Geoquímica del acuífero Güira-Quivicán (Cuenca Sur de la Habana). Ingeniería Hidráulica, 20 (3): 34-40, ISSN 0253-0678.

Fagundo, J.R., P. González, S. Jiménez, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, A. González, E. Romero, D. Orihuela (2002). Procesos geoquímicos naturales e inducidos por el hombre en acuíferos kársticos costeros. Caso de estudio: Sector hidrogeológico Güira Quivicán (Cuenca Sur de La Habana). Revista Latinoamericana de Hidrogeología (2): 71-79.

Fagundo, J.R., P. González, S. Jiménez, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, C. Melián, S. jiménez, A. González, E. Romero, D. Orihuela. Procesos geoquímicos en un acuífero costero en contacto con un humedal (2004). En: Humedales de Iberoamérica. Red Iberoamericana de humedales. Programa CYTED, J.J. Neiff (editor), 188-203.

Fagundo J.R., P. González, M. Suárez Muñoz, J. Fagundo-Sierra, C. Melián, E. Alvarez (2005 a). HIDROGEOQUIM. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. ISCTN. Vol 6, Q 58-67. ISBN 959-7136-35-X.

Fagundo, J.R.; J.J. Carrillo-Rivera; I. Antigüedad; P.González; R. Peláez; M. Suárez; C. Melián; R. Hernández y D. Cáceres (2005 b). Caracterización hidrogeoquímica del sistema de flujo local-regional de la Sierra del Rosario (Cuba). Revista Latino-Americana de Hidrogeología, 5: 75-90.

Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González y M. Suárez (2001). Modelación de las aguas naturales. En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, La Habana. Vol. 2, 8 pp, 2001. ISBN 959-7136-09-0

Ferrera, V, .J.R Fagundo, P. González, I. Morrell, A. Pulido-Boch, M.López-Chicano y F. López-Vera (1999). Caracterización Hidrogeoquímica de los acuíferos kársticos de la Cuenca y Zapata, Matanzas, Cuba. Voluntad Hidráulica, (91): 21-27, C. Habana, ISSN 0505-9461.

Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1980). Groundwater. Ed. Prentice-Hall, Englewood, Cliffs, New York, pp. 604.

González, P., M. Suárez, G. Benítez, J. Ramírez y J.R. Fagundo (2000). Caracterización de aguas minerales de algunos yacimientos del país. Le Monde du Thermalisme. Ed. L' Organisation Mondiale du Thermalisme (O.M.Th). Paris (Francia), 14-15.

González P., M Llerena, M. Suárez, J.R. Fagundo, C. Melián, B. Luna, e I. Herrera (2001). Sectorización de las aguas naturales y mineromedicinales de las montañas de la Sierra del Rosario y las Alturas del Mariel. En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN. La Habana. Vol. 2, 7 pp., 2001. 959-7136-09-0

Giménez, E. (1994). Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de salinización en el acuífero detrítico costero de la Plana de Castellón (España). Tesis Doctoral, pp.469.

Gutiérrez (1995). Condiciones geológicas del desarrollo diferenciado de la carsificación en la cordillera de Guaniguanico, Cuba Occidental. En: El Karst y los Acuíferos Kársticos. A. Pulido-Bosch, J.R. Fagundo, J.E. Rodríguez (editores). Universidad de Granada, 11- 26.

Leonarte, T., J.R. Fagundo (2005). Calidad de las aguas subterráneas de Gerona y la Fe. XI Taller Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, Vol 6, Q 45-58. ISBN 959-7136-35-X

Leonarte, T (2006). Calidad de las Aguas Subterráneas de Gerona y La Fé. Tesis de Maestría en Análisis y Tecnología Ambiental. Nueva Gerona, Isla de la Juventud.

Morell, I., E. Giménez, J.R. Fagundo, A. Pulido-Bosch, M.L. López-Chicano, M.L. Calvache, J.E. Rodríguez. Hydrogeochemistry and karstification in the Ciénaga de Zapata aquifer (Matanzas, Cuba).In: Karst Water and Environmental Impacts, Gunay and Johnson (Editors), Balkema, Rotterdam, Brookfield, 191-198, 1997.

N.C. 93-02: 1985 (1985). Norma Cubana de Agua Potable. Oficina Nacional de Normalización (La Habana, Cuba), 8 pp.

N.C-2-1996 (1996). Norma Cubana de Aguas de Bebida Envasada. Especificaciones 5 pp,

N.C. 93-01-218: 1995 (1995). Norma Cubana de Agua Mineral. Oficina Nacional de Normalización (La Habana, Cuba), 8 pp.

Peláez, R., Ma. C. Alvares, R. Nuñez y M. Valdivia (1990). Informe para la búsqueda detallada. Exploración orientativa de las aguas minero-medicinales de San Diego de los Baños. Empresa Pinar del Río.

Peláez. R., A. Reyes y R. Núñez. (1991) Informe de exploración orientativo de las aguas minero-medicinales y peloides de San Vicente, Viñales, Pinar del Río, Empresa Geólogo Minera de Pinar del Río.

Post, V.E.A. (2005). Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problems ahead ?. Hydrogeology Journal, 13 (1): 120-123.

Pulina, M., J.R. Fagundo (1992). Tropical karst and chemical denudation of Western Cuba. Geographia Polonica (Warsow) 60: 195-216.

Rodríguez, M., V., Ruiz, A., Álvarez y R. Ching (1989). Informe Búsqueda y exploración orientativa de aguas minero-medicinales de San José del Lago. Expedición Geológica Villa Clara.

Rodríguez, J.E., J.R. Fagundo, F. Cutié, C. Cruz y E. Franco (1989). Hidrología cársica del macizo del Pan de Guajaibón, Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba, durante el año hidrológico Noviembre de 1984-Octubre de 1985. Monografía. Ed. Academia, La Habana, 60 pp.

Rodríguez, M., R. Ching, S. Borroto (1990). Informe búsqueda y exploración agua mineromedicinales de San José del Lago (aguas mineromedicinales de mesa) MINBAS, Unión de Empresa Geologica, Expedición Geológica Villa Clara.

Rodríguez, J.E., J.R. Fagundo, K. Spassov (1991). Caracterización hidrológica e hidroquímica del curso de la meseta del Guaso (Guantánamo, Cuba). Lapiaz Monografía II, Valencia, 3-21.

Tyc, A. (1992). Action actuelle des processus karstiques dans le karst polygonal du Pan de Guajaibón. En: Karst et évolutions Climatiques. J.N. Salomon et R. Maire (editors), 135, 144.

Shuster, E.T. and White, W.B. (1971). Seasonal fluctuation in chemistry of limestone spring: a possible mean for characterizing carbonate aquifers. J. Hydrology, 14: 93-128.

Tóth, J (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. Boletín Geológico Minero, Madrid: 111(4), 9-25.

Trelles, F. (1948). Análisis de algunas de las aguas minero-medicinales cubanas estudiadas por este Instituto. Archivos del Instituto de Hidrología, Climatología Médicas, Año 2, No 2, 171-184.

Valdés, A.J. e I. García (1993). Evaluación de fuentes tradicionales de aguas minerales en la provincia Ciudad de La habana con vistas a su rescate para la explotación. Expedición Geológica habana – Matanzas, Unión de Geología. MINBAS.

Vinardell, I, E. Alvarez, J.R. Fagundo (1995). Sistema automatizado para el control de las aguas cársicas afectadas por la intrusión marina mediante reconocimiento de patrones, BATOMET. En: "El Karst y los acuíferos Kársticos, ejemplos y métodos de estudio". Ed. A. Pulido-Bosch, J.R. Fagundo, J. Rodríguez, Univ. Granada (España), 251-256.

Wu, Y. (2003). Mechanism analysis of hazards caused by the interaction between groundwater and geo-environment. Environmental Geology, 44 (7): 811 – 819.