

GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS QUE DRENAN CARBONATOS DEL INTERVALO JURÁSICO-PALEÓGENO

Juan Reynerio Fagundo Castillo⁽¹⁾, Vilma Monteagudo Zamaora⁽²⁾, Mónica Rodríguez Piña⁽³⁾, Tamara Leonarte Pérez⁽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. Isla de la Juventud E-mail: danihof@cimex.com.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 las principales regularidades geoquímicas de las aguas subterráneas que drenan depósitos carbonatados del intervalo Jurásico-Paleógeno. Se relaciona la composición de macro y micro constituyentes, así como los patrones hidrogeoquímicos y tipos de aguas con el medio geológico; se establece la evolución de la química del agua en dirección del flujo; se estudia la variación temporal del contenido de minerales disueltos; se determinan los procesos geoquímicos que originan la composición química del agua, y se indica el uso de los diferentes tipos de agua de acuerdo a sus características.

ABSTRACT

The main geochemical regularities of the groundwater which drain limestone deposits of Jurassic - Paleocene interval are shown. The relationships among geological environ and chemical composition of macro and micro compounds, geochemical pattern and water type are found; the chemical evolution throw the flow path are established; the stational variation of the mineral dissolved are studied; the geochemical processes which explain the chemical composition origin are determined, and the use of the different water type according with its characteristics are indicate.

INTRODUCCIÓN

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

Los procesos químico-físicos están regidos por leyes termodinámicas (Fagundo, 1996). 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. En esas interacciones el agua actúa como un agente geológico que origina diferentes fenómenos naturales mediante procesos disolución de gases y minerales, precipitación, hidrólisis, hidratación, oxidación-reducción, mezcla de aguas, intercambio iónico y otros (Tóth, 2000). Como agente geológico, el movimiento del agua subterránea puede cambiar el medioambiente geológico y causar desastres naturales (Wu, 2003).

Entre los factores geológicos que controlan la composición química del agua, son determinantes: la litología, el estado de yacencia de las secuencias estratigráficas, la tectónica, el agrietamiento, y la textura y porosidad de las rocas, entre otros. La litología determina, por lo general, las facies hidroquímicas dominantes en una región determinada, es decir, el tipo de agua, mientras que el resto ejercen su influencia sobre el contenido de minerales disueltos.

Los factores hidrogeológicos están relacionados con la permeabilidad del acuífero, el tipo de flujo, su velocidad, así como la zona por donde se mueve el agua.

Los factores de tipo geomorfológico también influyen en la composición química del agua, en especial, el escarpe de los macizos, el tipo de vegetación, el grado de erosión de los terrenos y la naturaleza de las propias formas del relieve y el tipo de suelo.

Los factores climáticos intervienen de forma activa en la dinámica de la meteorización mecánica y química de los macizos, al permitir en el primer caso la fragmentación, traslado y acarreo de los minerales lejos del lugar de origen, así como facilitar en el segundo caso, la disolución de los minerales de las rocas. Los elementos del clima más determinantes en el modo en que las aguas adquieren su composición química son: la temperatura, humedad relativa, intensidad y duración de las precipitaciones, intensidad y duración de las radiaciones, velocidad del aire, entre otros.

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.

La calidad del agua se refiere a su composición química expresada en términos de uso. Por lo general, la calidad del agua en las cuencas cerradas es superior a la de las cuencas superficiales. Sin embargo, debido al incremento sostenido de las extracciones, en las franjas costeras y en las cuencas abiertas, en ocasiones la calidad de este líquido experimenta una degradación progresiva como consecuencia de la sobreexplotación a que se ven sometidos nuestros acuíferos. Los requisitos para el uso del agua con fines de consumo está regido por la Norma Cubana de Agua Potable (NC. 93-02: 1985).

En particular las aguas subterráneas de tipo mineral se emplean tanto para el consumo como agua de bebida envasada, como en curas termales. A pesar de que estas aguas son menos susceptibles a la contaminación, una vez contaminadas, se hace muy difícil restablecer su calidad original (Giménez, 1994). Los requisitos que debe poseer la composición química para cada uno de estos usos están regidos por la Norma Cubana Aguas de Bebida Envasada (N.C 2: 1996) y la Norma Cubana de Aguas Minerales (NC 93-01-218:1995), respectivamente.

Las aguas minerales poseen una composición química más estable en el tiempo, al igual que su temperatura, caudal y composición química y bacteriológica, propiedades estas que la distinguen de las aguas naturales no minerales, en las cuales varía su composición por el efecto del régimen de lluvia. Debe señalarse, no obstante, que más del 95 % de las aguas minerales son de origen meteórico y por tanto, están relacionadas con el ciclo hidrológico. Estas aguas proceden de acuíferos profundos, que yacen generalmente en condiciones artesianas y su ascenso a la superficie se origina a través de fallas o contactos litológicos. Si este ascenso es rápido, las aguas conservan parte de su temperatura original, adquirida bajo el efecto del gradiente geotérmico, de lo contrario llegan frías. En todos los casos dicha temperatura es constante a menos que se mezcle con aguas más someras afectadas por las oscilaciones del ciclo hidrológico.

A las aguas minerales que poseen una temperatura elevada se les suelen denominar termominerales o termominerales y si poseen propiedades curativas se le llaman mineromedicinales (Armijo y San Martín, 1994). La composición química de estas aguas difiere poco de la de las aguas ordinarias, excepto en una concentración total anormalmente elevada o en contenidos anormales de algunas sustancias disueltas. Por lo general, se considera agua mineral aquella que contiene más de 1 g/l de minerales disueltos o que contiene componentes específicos disueltos en proporciones anormalmente alta (CO_2 , H_2S , Rn, Fe, SiO_2 , Sr, Li, As, etc). En ocasiones las aguas minerales son más radiactivas que el valor medio de las aguas subterráneas, en especial las que discurren por granitos. Su actividad es en su mayor parte asociada al radón

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: $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$. 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 aguas minerales y mineromedicinales están muy distribuidas en todo el territorio, particularmente aquellas que discurren por terrenos carbonatados. En general tienen un origen meteórico y su composición está relacionada con los procesos de interacción agua-roca con los materiales constitutivos del medio geológico drenado, tras un largo recorrido subterráneo, desde que se infiltran en la zona de alimentación del acuífero hasta que emergen por manantiales o son captadas en pozos. En el primer caso las emergencias están asociadas a dislocaciones tectónicas o contactos litológicos locales.

El presente trabajo tiene por objetivo estudiar el origen de la formación las aguas subterráneas de Cuba que drenan carbonatos del intervalo Jurásico-Cretácico (Figura 1), su evolución química a través de su trayectoria, 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 carbonatos del intervalo Neógeno – Cuaternario y 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^{2-} . Sobre esta base se establecen 729 patrones (27 x 27 combinaciones numéricas formadas por números enteros entre 1 y 9).

Distribución de los depósitos carbonatados del intervalo Jurásico-Paléógeno.

Depósitos del Jurásico

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 calcáreas (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).

El relieve en este territorio se caracteriza por la presencia de grandes formas cársicas, las más típicas de las cuales, los mogotes y las grandes cavidades, están representadas en la Sierra de los Órganos en Pinar del Río. Los acuíferos están desarrollados fundamentalmente en fisuras y cavernas. En la Sierra del Rosario, el relieve cársico superficial se caracteriza por la presencia de cerros calcáreos copulares y cónicos, con pendiente en ocasiones abruptas y en otras suaves (Gutiérrez, 1995; Tys, 1992).

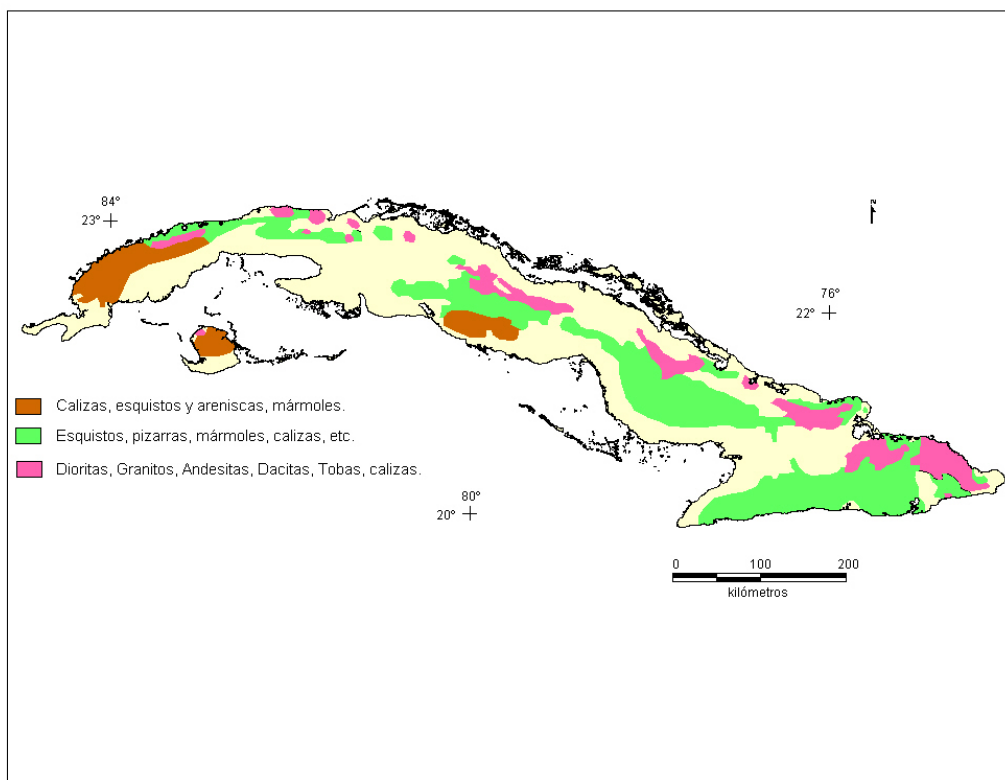


Figura 1. Mapa esquemático de las rocas de Cuba del intervalo Jurásico-Paleógeno (cortesía de M. Iturralde Vinent).

Tabla I. Composición litológica de las formaciones geológicas asociadas a los carbonatos del intervalo Paleógeno-Jurásico.

No	Edad (Símbolo)	Formación	Composición litológica	Muestra representativa	
1	Eoceno medio indiferenciado (P ₂)	Charco Redondo	Calizas	R. Cueva Campanario, M. Bataldó, M. Sierra de Canasta.	
2	Paleógeno-Eoceno Indiferenciado (P ₁₋₂)	Vega	Complejo caótico con bloques, de calizas, serpentinitas y vulcanitas con matriz arcillosa	PC-1 San José del Lago.	
3	Cretácico inferior (K ₁)	Veloz	Calizas con intercalaciones de pedernal, bitúmenes y asphaltita, intercalaciones de esquistos arcillosos, calizas argilíticas, calizas tufticas	Zona de alimentación de los yacimientos de Menéndez y Elguea.	
4	Cretácico inferior Erriasio-Barremiano (K _{1b} -bm)	Lucas	Calizas (biomicritas) estratificadas, argilitas calcáreas.	M. Lucas.	
5	Cretácico inferior y superior Albiano-Cenomaniano (K ₁₋₂ al-cm)	Pan de Guajaibón	Calizas masivas, calcarenitas, biomicritas, a veces dolomitizadas.	Surgencia Ancón; Resurgencia. Canilla; M. Mameyes; M. La Curra.	
6	Cretácico inferior (K ₁₋₂ al)	Palenque	Calizas, calizas dolomitizadas y dolomitas	B. San José del Lago.	
5	Cretácico inferior y superior (K ₁₋₂)	Sierra Azul	Calizas, calizas margosas, argilitas, silicitas	M. Cacarajicara NS.	
7		Fm. Martín Mesa	Calizas masivas y estratificadas (biomicritas), calcarenitas,	M. Martín Mesa.	
8	Cretácico superior (K ₂)	Amaro	Calizas, calizas silificadas, calizas dolomitizadas, silicatos, conglomerados con pedernal	M. Amaro, M. Lobatón.	
9	Cretácico superior Maestrichtiano (K ₂ m)	Cacarajicara	Brechas, calcarenitas, calcilutitas	M. Azufre Cacarajicara.	
		K ₂ m	Jimaguayú	Calizas biógenas, margas, calcirudiras, areniscas	P-195
		K ₂ cn-cp	Contramaetre	Areniscas tefroides, conglomerados, tobas, tuftitas, aleurolitas, argilitas, calizas	P-248; Central Jobabo; Quinta Planta;
10	K ₁₋₂ al-t	Guaímaro	Lavas y tobas basalto-andesíticas, andesito-basaltos, calizas	Edificio de Parque; La Liberia; Circunscripción 7; Cabecera Colombia.	
11	Jurásico superior-Cretácico inferior (J ₃ -K ₁)	Artemisa (Francisco)	Calizas estratificadas (micritas, biomicritas, calcilutitas y calcarenitas) con intercalaciones de silicitas en la parte superior	M. El Perdido; M. Mil Cumbres; M-1 Bermejales; La Gallina (SDBaños); El Templado (SD Baños); Pozo P-1 (SD Baños); M. Sal y Cruz; Pozo Azul; B. Soroa; M. San Juan; M. San Juan; Pozo El Brocal; M. La Pastora; M. Pedernales; M. Aspiro.	
12		Esperanza	Calizas organógenas, pelitomórficas, bituminosas, areniscas cuarzosas, argilitas	M. Zequeira.	
13	Jurásico superior Oxfordiano – Tithoniano (J ₃ ox-t)	Guasasa (m San Vicente)	Calizas masivas, calcarenitas, calciruditas calcáreas fosilíferas	B. Los Portales; PC-10 San Vicente; Balneario San Vicente M. Cueva Portales.	
13	Jurásico superior Oxfordiano y Tithoniano (J ₃ ox-t - K)	Gerona	Mármoles	Pozos de abasto público a la población.	
14	Jurásico medio-superior (J ₂ -J ₃ ox)	Agua Santa	Esquistos meta terrígenos con capas de mármol	M. Santa Rita, M. Hiero, M. Ojitos de Santa Lucía, M, Magnesiano.	

M: Manantial; B: Bañito; R: Resurgencia; P: Pozo

En la provincia de Pinar del Río existen numerosos ríos subterráneos, cuevas y manantiales, cuyas aguas presentan diferente composición en dependencia del carácter del flujo: local, intermedio o regional o profundo (Fagundo et al, 2005 b). En la tabla I se presentan las muestras representativas de manantiales y surgencias cársicas estudiadas en este trabajo, las cuales drenan calizas de las formaciones Guasas, Jagua, Artemisa, Guajaibón, Esperanza y otras e interactúan, en el caso de los flujos intermedios y regionales, con los sedimentos de la Fm. San Cayetano. Los resultados del procesamiento hidroquímico, presentados en la tabla II, serán objeto de discusión con posterioridad.

En la parte norte de la provincia de Villa Clara, en la base del corte, los depósitos del Jurásico superior están representados por una secuencia de limonitas cuarzosas, areniscas y gravelitas (grava cementada), que yacen por encima de los granitoides. Más arriba se encuentran calizas masivas, compactas, localmente dolomitizadas y silicificadas.

En la provincia de Camagüey, los depósitos de referencia tienen un desarrollo limitado en la porción norte, estando representadas por calizas compactas, duras, en algunos lugares, estratificadas y arenosas. A veces se observan intercalaciones de rocas silíceas y areniscas.

Depósitos del Cretácico

Estos depósitos están ampliamente distribuidos en todo el país, estando representados por facies carbonatadas, terrígenas y vulcanógenas (Ergerov y Luege, 1967). Las rocas carbonatadas están representadas por calizas y en menor frecuentemente por dolomitas y margas. Las calizas son generalmente compactas, estratificadas o masivas. A veces en la parte superior del corte se encuentran calizas arrecifales.

Los depósitos terrígenos cretácicos están relativamente poco desarrollados en la provincia de Pinar del Río, están representados por secuencias de limonitas y areniscas que alternan con capas de calizas, conglomerados y rocas silíceas. Son representativas de estos sedimentos las aguas que drenan los depósitos de las formaciones Cacarájicara, Pan de Guajaibón, Sierra Azul, Martín Mesa y Lucas (Tabla I).

En la provincia de La Habana y Matanzas, constituyen conglomerados, areniscas calcáreas, margas, arcillas y calizas esquistosas.

Este tipo de rocas es el que tiene el desarrollo más amplio en las provincias de Villa y Clara Sancti Spiritus, donde se observan calizas arcillosas y dolomitizadas, brechas y conglomerados calcáreos. Las aguas representativas de estos sedimentos, estudiadas en este trabajo son las asociadas a los yacimientos de Amaro (manantiales de de Amaro y Lobatón) y San José del Lago. Este último yacimiento se localiza al sur del pueblo de Mayajigüa, en la región se presentan varias formaciones geológicas: la Fm. Vega, de edad Paleógeno y las formaciones Palenque y Mata del Cretácico (Tabla I).

Las rocas carbonatadas cretácicas se encuentran también en cantidad considerable en la provincia de Camagüey, en cuya parte norte las calizas se presentan muy dislocadas y quebradas por numerosas fallas de diferentes dimensiones. En la Sierra de Cubitas se observa el joven relieve cársico.

Estos depósitos originan acuíferos en fisuras de poca capacidad. El caudal de los pozos existentes es de hasta 1 l/s, aunque en algunos casos (en los límites entre Ciego de Ávila y Camagüey), la presencia de intercalaciones de calizas de espesor considerable, de tobas y de zonas de dislocaciones tectónicas, propician la acumulación de considerable cantidad de agua subterránea.

Depósitos del Paleógeno

Los depósitos del Paleógeno (paleocénicos, eocénicos y oligocénicos) presentan facies terrígenas, carbonatadas y efusivas y se encuentran distribuidos por todo el país (Ergerov y Luege, 1967).

En la provincia de Pinar del Río, los depósitos del Paleoceno y del Eoceno son semejantes, predominan los sedimentos terrígenos, compuestos de areniscas, margas, calizas arenosas y

conglomerados. Los depósitos del Oligoceno contienen calizas, conglomerados calcáreos y alternancia de calizas con areniscas, arcillas y margas.

En la provincia de La Habana y Matanzas las rocas paleocénicas están representadas por arcillas y arena calcárea; las del Eoceno, por margas, areniscas calcáreas arcillosas y calizas, mientras que los depósitos oligocénicos son preferentemente carbonatados, constituidos por calizas y margas.

En Villa Clara las rocas del Paleoceno se componen de calizas microcristalinas, duras y compactas; mientras que los depósitos del Eoceno, que se aprecian en el sureste de la provincia están constituidos por arcillas, conglomerados, gravelitas y areniscas. En la parte norte de la misma provincia, se observan bloques eocénicos calcáreos incluidos en la masa arcillosa. Al norte del sistema montañoso de Guamuaya, en la base del corte, yace una arenisca de grano grueso con guijarros de rocas ígneas, más arriba se sitúan areniscas de grano medio y fino.

Los depósitos terrígenos eocénicos que se encuentran en Cienfuegos, estos sedimentos están compuestos por calizas y areniscas calcáreas.

En el norte y el nordeste de la provincia de Camagüey los depósitos eocénicos están representados por calizas; al sur, por margas y al este de la ciudad, por calizas, margas y en ocasiones por carbonatos magnesianos. Los depósitos oligocénicos se componen de margas, areniscas de grano fino y grueso, conglomerados y arcillas.

En las provincias orientales, los depósitos del Paleógeno están constituidos por calizas arenosas, conglomerados calcáreos, tobas, esquistos tobáceos, calizas y margas. En el extremo oeste de la Sierra Maestra están preferentemente distribuidas las calizas. Los depósitos oligocénicos de estas provincias están representados tanto por facies marinas como terrígenas. Representativas este tipo de aguas, son las que drenan los sedimentos de la Formación Charco Redondo (Tabla I).

Todas estas rocas forman complejos acuíferos de tipo fisurado y cársicos. Los primeros son poco acuíferos, con caudales del orden de 1 l/s; mientras que los últimos pueden ser muy acuíferos. En las provincias de La Habana (Cuenca de Ariguanabo) y Matanzas los caudales de los pozos de explotación perforados en los sedimentos oligocénicos alcanzan entre 30 y 50 l/s.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el objetivo de estudiar el origen de la composición química de las aguas subterráneas de Cuba y su relación con la constitución y disposición de los principales depósitos carbonatados drenados por las mismas, se tomaron datos hidroquímicos de muestras representativas de las diferentes formaciones geológicas de Cuba constituidas por rocas carbonatadas. Teniendo en cuenta la diferente génesis de la composición de las aguas que drenan estos depósitos, 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 del país, calizas de origen sedimentario del macizo cretácico de Las Tunas, y calizas de origen metamórfico de la Isla de la Juventud.

Calizas de origen sedimentario del intervalo Jurásico-Paleógeno.

En la tabla II se presenta la composición química y el tipo de agua de muestras de aguas subterráneas que drenan carbonatos del intervalo Jurásicos - Paleógeno. Los datos corresponden a valores medios y están ordenados en orden creciente con respecto al contenido de minerales disueltos (TSS). En dicha tabla están representados flujos de tipo local, intermedio y de carácter más regional y profundo, correspondiendo a los de carácter más local los de menor mineralización y a los de carácter más regional o profundo los de mayor mineralización.

Los resultados de la tabla II indican que a medida que se incrementa la interacción agua-roca como resultado del recorrido subterráneo del agua (puesto de manifiesto por el incremento de TSS), aumentan en forma proporcional, los contenidos de SiO_2 , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ . Por el

contrario, el contenido de HCO_3^- , tiende a disminuir a medida que se incrementa el TSS y el contenido de SO_4^{2-} .

Tabla II. Composición química de las aguas que drenan calizas de origen sedimentario expresadas en mg/l

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	1	Aspiro	FL	25.0	7.00	18.3	0.0	4.0	197	122.0	14.1	8.4	34.3	3.5	14.7	0.1	HCO ₃ -Ca
2	15	C Campanario	FL	20.9	7.85	5.6	0.0	-	250	176.6	11.7	0.0	54.5	4.8	2.0	0.5	HCO ₃ -Ca
3	2	M. Lobatón	FI	25.0	8.10	2.8	0.0	19.0	269	241.0	19.1	63.4	101.1	4.0	9.0	1.1	HCO ₃ >Cl-Ca>Na>Mg
4	39	R. Canilla	FL	22.6	7.65	6.6	0.0	-	271	178.8	15.0	8.1	48.9	5.5	14.0	0.4	HCO ₃ -Ca
5	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
6	30	M. Bataldó	FL	22.3	7.15	21.6	0.0	-	311	221.6	11.3	0.1	70.4	2.0	5.5	0.6	HCO ₃ -Ca
7	9	SierraCanasta	FI	25.0	7.50	10.8	0.0	6.6	316	198.6	15.3	22.1	66.4	2.4	11.0	0.2	HCO ₃ -Ca
8	4	M. Mameyes	FL	21.4	7.76	8.9	0.0	-	357	244.1	16.3	6.2	70.1	4.8	15.3	0.4	HCO ₃ -Ca
9	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
10	15	M. Amaro	FI	25.0	7.61	10.1	0.0	15.3	388	202.6	89.2	11.2	49.3	16.4	3.0	2.0	HCO ₃ >SO ₄ -Ca
11	1	Los Pedidos	FL	23.3	7.06	35.6	0.0	-	402	274.0	11.0	15.9	76.1	6.1	18.5	0.6	HCO ₃ -Ca
12	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
13	5	M. La Curra	FL	22.3	7.03	24.7	0.0	-	436	292.9	12.9	15.4	84.5	6.7	22.4	0.7	HCO ₃ -Ca
14	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
15	9	Brocal	FI	25.0	7.33	31.3	9.9	-	473	306.1	32.0	14.9	77.7	12.9	28.7	0.9	HCO ₃ -Ca
16	3	Cacarajica NS	FL	23.8	7.18	41.1	0.0	-	487	312.2	24.6	25.8	88.4	10.3	24.5	0.8	HCO ₃ -Ca>Mg>Na
17	24	PC-1 SJ Lago	FI	25.0	7.45	28.8	0.3	18.9	493	324.5	34.2	16.6	69.7	24.5	20.9	2.2	HCO ₃ -Ca>Mg
18	3	San Juan NS	FL	23.8	6.93	27.5	0.0	-	529	332.5	26.4	33.9	103.4	7.9	24.4	0.8	HCO ₃ -Ca
19	2	P-3 SDB	FL	25.8	7.73	24.1	0.0	7.4	567	358.8	22.0	44.0	111.6	7.9	21.8	0.8	HCO ₃ -Ca
20	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
21	2	San Juan S	FI	27.3	7.01	47.8	0.0	-	589	390.2	24.8	31.2	96.1	20.1	25.9	0.8	HCO ₃ -Ca>Mg
22	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>Mg>Na
23	5	BSanJoséLago	FI	30.7	7.26	13.6	0.9	20.6	612	337.8	39.4	69.8	69.8	24.1	68.6	2.6	HCO ₃ -Ca>Mg
24	2	CacarajicaraS	FI	25.8	7.02	50.3	8.1	-	626	364.6	30.3	67.0	101.1	12.3	47.8	2.8	HCO ₃ -Ca>Na
25	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
26	5	La Pastora	FI	24.8	7.15	78.0	10.0	-	731	441.8	46.4	63.2	140.5	15.9	22.0	0.9	HCO ₃ -Ca
27	1	Pozo Azul	FI	30.0	7.20	30.0	1.5	-	527	370.4	8.9	22.1	84.1	20.3	20.2	0.7	HCO ₃ -Ca>Mg
28	1	Zequeira	FI	24.0	7.5	28.4	1.5	-	750	212.3	45.0	294.9	126.9	34.0	35.0	2.0	SO ₄ >HCO ₃ -Ca>Mg
29	1	Matín Mesa	FI	28.0	7.30	32.0	5.9	22.3	766	500.0	54.0	17.8	100.0	24.5	66.3	3.5	HCO ₃ -Ca>Mg
30	1	Sal y Cruz	FI	25.0	7.65	5.0	1.0	12.4	1128	174.0	73.1	558.0	250.0	32.0	39.0	2.0	SO ₄ -Ca
31	1	C Portales	FI	27.0	7.02	30.8	10.0	-	1232	268.4	56.1	556.8	192.0	26.4	125.5	6.5	SO ₄ >HCO ₃ -Ca>Na
32	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
33	2	P-19	FR	45.5	6.78	55.0	7.9	26.3	1475	265.1	20.7	780.5	352.0	29.4	25.9	1.4	SO ₄ >HCO ₃ -Ca
34	38	San Vicente	FR	29.0	6.85	39.5	7.6	25.5	1760	211.8	18.8	1037.0	434.8	37.5	19.4	1.0	SO ₄ -Ca
35	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
36	8	M1Bermejales	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
37	3	P-17	FR	46.0	7.5	33.0	24.7	27.8	2438	215.6	41.4	1492.4	525.3	66.0	95.2	3.9	SO ₄ -Ca
38	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
39	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
40	1	Aguas Claras	FR	-	7.00	66.0	-	38.0	4646	442.0	423.0	2450.0	530.0	229.0	544.0	28.0	SO ₄ -Ca>Na>Mg

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

Composición química relativa y patrones hidrogeoquímicos

En la tabla II 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.

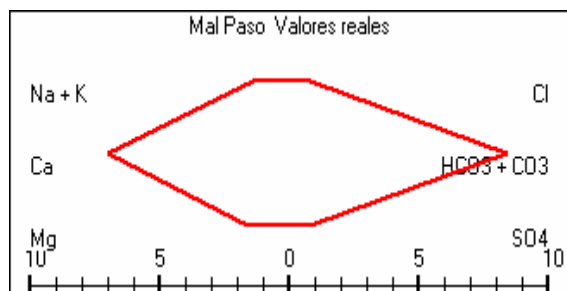
Aguas sulfatadas cálcicas: 181-118, 271-127.

Aguas sulfatadas cálcicas sódicas magnésicas: 352-217.

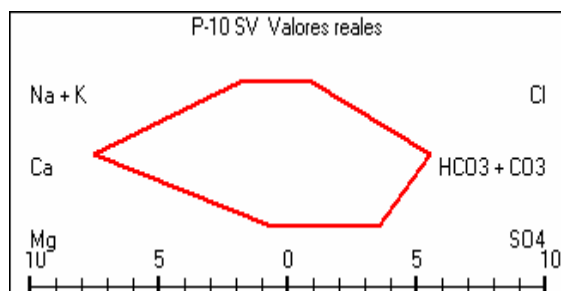
En las figuras 2 a (aguas de tipo bicarbonatadas) y 2 b (aguas de tipo sulfatadas) se muestran, en forma gráfica los patrones hidrogeoquímicos de algunas muestras representativas.

Los diagrama hidroquímicos presentados en la figura 2 ilustran en forma comprensible el enriquecimiento en sulfato de 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) que drenan los carbonatos de la Fm. Guasas (pozos Los Portales y P-10 San Vicente). Con relación a los flujos locales (manantial Mal Paso), el incremento en magnesio de las aguas minerales de los balnearios de PC-1 San José del Lago (de tipo bicarbonatada cálcica magnésica), se produce como resultado de la interacción con dolomitas o serpentinitas subyacentes; así como los típicos patrones de las aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas asociadas a los flujos locales que drenan calizas más puras (manantial Sierra de Canastas).

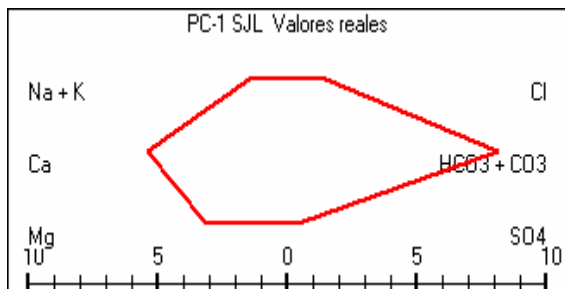
Otros diagramas hidroquímicos presentados (Figura 2), correspondientes a flujos de mayor recorrido subterráneo (flujos de carácter más regional y profundo) que drenan carbonatos de la Fm. Artemisa. Poseen patrones de aguas sulfatadas bicarbonatadas cálcicas (manantiales Zequeira, El Templado), sulfatadas cloruradas mixtas (Aguas Claras), y sulfatadas cálcicas y cálcicas sódicas (Manantiales La Gallina 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 de la Fm. San Cayetano.



PH: 172-181 (HCO3-Ca)



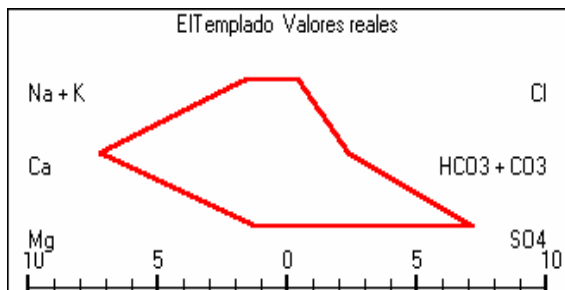
PH: 181-154 (HCO3>SO4-Ca)



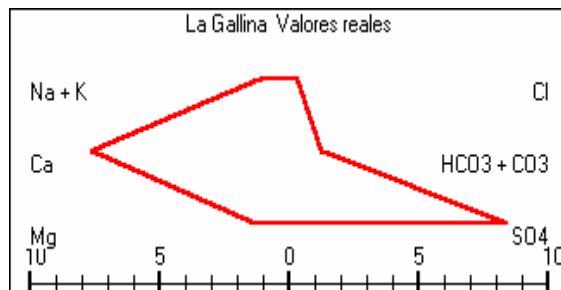
PH: 172-181 (HCO3-Ca>Mg)



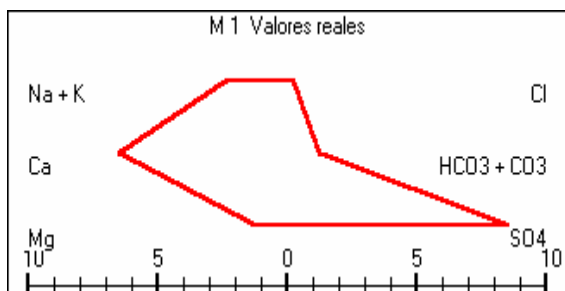
PH: 163-136 (SO4>HCO3-Ca>Mg)



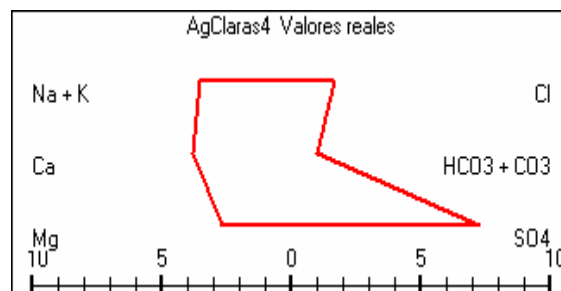
PH: 343-217 (SO4-Ca>Na>Mg)



PH: 181-118 (SO4-Ca)



PH: 271-118 (SO4-Ca>Na)



PH: 343-217 (SO4-Ca>Na>Mg)

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

En la tabla III se presentan los valores de las correlaciones de regresión lineal de las principales variables hidroquímicas.

Tabla III. Matriz de correlación de variables. Aguas subterráneas que drenan carbonatos de origen sedimentario de edades comprendidas entre el Jurásico y el Paleógeno.

N=470	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	TSS
SiO ₂	1	-0.01	0.58	0.79	0.76	0.61	0.78	0.81
HCO ₃ ⁻		1	0.31	-0.11	-0.03	0.05	0.08	0.02
Cl ⁻			1	0.37	0.48	0.48	0.53	0.43
SO ₄ ²⁻				1	0.99	0.93	0.81	0.99
Ca ²⁺					1	0.93	0.76	0.99
Mg ²⁺						1	0.76	0.95
Na ⁺							1	0.84
TSS								1

Para la determinación de los resultados que se muestran en la tabla III fueron procesados 470 datos con todas las variables excepto SiO₂, con solo 27 datos disponibles. De ese modo son altamente significativas aquellas correlaciones cuyo coeficiente de correlación $r > 0.17$ ($\alpha = 0.995$) para todas las variables con excepción del sílice, mientras que son altamente significativas aquellas cuyo $r > 0.49$ para las correlaciones con SiO₂.

Las correlaciones altamente significativas existentes entre TSS y el resto de las variables, excepto bicarbonato, indican que en el proceso de adquisición de la composición química de estas aguas, participan no sólo el calcio y el magnesio aportados por los minerales calcita y dolomita presentes en las calizas, sino también otros componentes como SiO₂, Cl⁻ y SO₄²⁻, lo que demuestra que las aguas en su recorrido subterráneo interactúan con otros minerales presentes en las areniscas y rocas ultrabásicas existentes en el corte.

El incremento del SiO₂ con el TSS 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.

En la Sierra del Rosario se había observado que los flujos de carácter local no contienen H₂S y poseen poco contenido de sulfato (Fagundo et al, 2005 a), resultado análogo al que se presenta en la tabla III. Las aguas correspondientes a los flujos intermedios y de carácter más regional y profundo, presentan en su composición altos contenidos de H₂S y SO₄²⁻ cuando en su recorrido subterráneo interceptan rocas que poseen pirritas en su constitución litológica.

En la tabla III se aprecia, la buena correlación existente entre SO₄²⁻ y Ca²⁺, mientras en la con respecto a HCO₃⁻, tanto SO₄²⁻ como Ca²⁺ decrecen, identificándose dos subgrupos, uno constituido por los flujos locales y otros por los intermedios y regionales. Si los datos de ambos subgrupos se procesan por separados, se encuentra que en el primer subgrupo, Ca²⁺ crece con el HCO₃⁻ mientras que en el segundo subgrupo Ca²⁺ crece con el SO₄²⁻.

En general, las rocas más comunes, presentes en los sedimentos estudiados son las calizas y las calcarenitas, por lo que los resultados de la tabla III demuestran que además del calcio, el magnesio y la sílice, aportados por los minerales constitutivos de estas rocas, otras litologías influyen el contenido que adquieren esta agua en su trayectoria subterránea, tales como pirita, que aportan el ion SO₄²⁻ y las areniscas que aportan el Na⁺.

Variación de la composición químico física de las aguas con la profundidad

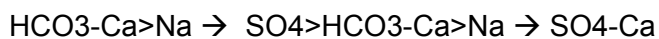
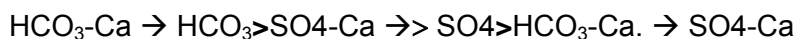
La mineralización de las aguas en las emergencias depende del tipo de litología drenada, del tiempo de recorrido subterráneo del flujo, de la profundidad y temperatura que alcanza el mismo, del contenido de CO₂ disponible en la zona el suelo, de las condiciones en que dicho gas es tomado por las aguas procedentes de las precipitaciones durante su infiltración (condiciones de sistema cerrado, abierto o mixto) y del aporte de otras fuentes, tales como los procesos de oxidación de sulfuros. En las emergencias, las aguas subterráneas por lo general pierden parte de los gases disueltos que poseen y experimentan cambios de pH y potencial redox, por lo que son posibles procesos de recombinación iónica que originan precipitación de minerales y disminución del contenido de iones disueltos.

En la tabla IV se muestra cómo varía la temperatura y algunos contenidos iónicos con la profundidad, en el pozo P-1, perforado en las cercanías del balneario de San Diego de los Baños (Peláez et al, 1990). Como puede apreciarse, estas aguas experimentan un incremento tanto de la temperatura, como de los contenidos iónicos y gases disueltos a medida que las muestras son tomadas a mayor profundidad, mientras que el pH tiende a ser más ácido.

Tabla IV. Variación de la composición química con la profundidad. Pozo P-1(San Diego de los Baños). Concentraciones en mg/l.

Prof (m)	T (°C)	pH	CO ₂ (mg/l)	H ₂ S (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	CaCO ₃ (mg/l)	TSS (mg/l)
0-87	26	8.00	11	0.0	14.0	151.3	14.5	156.1	90.1	10.7	16.8	0.7	269	440
0-122	28	7.89	22	9.0	18.1	254.4	22.0	732.5	333.1	37.1	7.8	0.3	985	1387
120-200	34	7.70	22	9.0	20.0	195.3	29.1	1058.1	400.4	52.8	34.3	1.4	1217	1763
240-281	36	7.60	27	28.5	24.0	155.0	29.1	1731.0	637.4	77.6	27.0	1.1	1911	2657
237-320	46	7.20	38	39.7	26.7	169.0	33.7	197.2	637.4	71.4	156.4	6.4	1896	3045

Del análisis de los resultados que se muestran en las tablas II, III y IV, se puede inferir que la composición química del sistema de flujos que drenan los carbonatos sedimentarios del intervalo Jurásico – Paleógeno, que interactúan con materiales acuíferos constituidos por minerales calcita, plagioclasa y pirita, tienden a evolucionar aproximadamente de la manera siguiente:



Contenido de micro constituyentes

En la tabla V se presenta la concentración en mg/l de los principales micro componentes presentes en algunas las muestras de aguas correspondientes a flujos que drenan carbonatos del intervalo Jurásico-Paleógeno.

Tabla V. Contenido de componentes minoritarios de las aguas que drenan carbonatos.

No	SiO ₂	F	Br	I	As	B	Li	Sr	Ba	Fe	Mn	Ni	Co	Cu	Cr	Cd	Zn	Pb
2	6.0	-	-	-	-	< 0.057	0.01	0.167	< 0.059	0.13	0.01	<0.14	<0.12	<0.077	<0.078	<0.028	0.09	0.16
3	6.0	-	-	-	-	< 0.057	<0.035	0.349	< 0.059	0.40	0.02	<0.14	<0.12	<0.077	<0.078	<0.028	0.09	0.13
7	6.0	-	-	-	-	< 0.057	0.01	0.863	< 0.059	0.10	0.03	<0.14	<0.12	<0.077	0.01	0.0600	0.11	0.24
10	6.0	-	-	-	-	< 0.057	0.02	1.016	< 0.059	0.11	0.01	<0.14	<0.12	<0.077	0.02	<0.028	0.23	0.26
13	20.6	0.40	2.20	0.018	-	-	<0.02	0.47	0.20	0.90	0.06	<0.05	<0.05	0.05	-	<0.05	0.10	0.10
16	15.0	-	-	-	-	0.0379	0.06	1.074	0.228	0.23	0.04	<0.14	<0.12	<0.077	<0.078	<0.028	0.06	0.11
27	11.9	1.11	0.012	0.91	0.0004	--	0.013	1.49	0.012	<0.11	<0.20	0.004	0.0004	0.001	-	0.0001	0.0044	0.0009
29	27.0	1.10	0.01	0.00	0.000	-	0.022	2.38	0.013	0.098	0.076	0.001	<0.01	0.0019	0.01	<0.005	0.011	0.0017
30	30.0	2.40	-	-	-	0.337	0.05	15.66	<0.059	0.32	0.08	<0.14	<0.12	<0.077	0.01	0.03	0.15	0.27
31	34.2	-	-	-	-	0.306	0.06	9.921	<0.077	0.32	0.10	<0.14	<0.12	<0.077	0.02	<0.028	0.75	0.25

2- Resurgencia Canilla; 3- Surgencia Ancón ; 7- El Sitio no Sulfuroso; 10- Mil Cumbres no Sulfuroso; 13- PC-1 San José del Lago; 16- Soroa; 27- El Templado San Diego de los Baños; 29- La Gallina San Diego de los Baños; 30- M-1 Bermejales; 31- Pozo P1- San Diego de los Baños.

Las principales anomalías geoquímicas se aprecian en los flujos de circulación más profunda y de carácter más regional, cuya composición es de tipo sulfatada cálcica (manantiales La Gallina y M-1 Bermejales y pozo P-1 de San Diego de los Baños). Especialmente se destacan con valores más elevados que el resto de las aguas: SiO₂, F, B, Li, Sr, Mn, Zn y Pb.

Variación temporal de la composición química del agua

Las aguas subterráneas de corto recorrido subterráneo difieren de aquellas que poseen un recorrido mayor no sólo en la magnitud del contenido de minerales disueltos alcanzado, sino también en la estabilidad de su composición. Mientras las aguas más someras y de menor recorrido presentan una notable fluctuación de su composición debido a la acción del ciclo hidrológico, las que alcanzan mayor profundidad y poseen una mayor trayectoria poseen una composición más estable.

Uno de los criterios para considerar que un agua es mineral, además de la magnitud de la temperatura, el contenido de los minerales disueltos y la presencia de determinados componentes específicos, es la constancia de su temperatura y composición química. El requisito de estabilidad de la composición química se expresa en las normas de aguas minerales (NC 93-01-218, 1995) para distinguirlas de las aguas naturales ordinarias. Sin embargo, el concepto de que un agua mineral posee una composición constante es ambiguo, pues no existen límites establecidos al respecto.

Un método apropiado para estudiar la fluctuación estacional de la composición química del agua consiste en tomar el valor del coeficiente de variación de los principales componentes o del total de sólidos solubles.

El coeficiente de variación de un componente *i* (CV_{*i*}) se define como el cociente de la desviación

$$\text{estándar (s) entre la media aritmética (X): } CV_i = \frac{s}{\bar{X}} * 100 \%$$

Como esta magnitud se expresa en tanto por ciento, es posible establecer un valor que refleje una variabilidad aceptable de acuerdo al comportamiento de las aguas a lo largo, al menos, de un año hidrológico.

Otras aguas subterráneas también pueden tener un quimismo estable, tal como se ha reportado para las aguas cársicas que circulan a través de sistemas porosos mediante flujos difusos (Shuster y White, 1971). Para diferenciar aguas de diferente tipo, Fagundo et al (1997) han utilizado la

desviación estándar y el coeficiente de variación de la mineralización en términos de Total de Sólidos Solubles (TSS), dureza o conductividad eléctrica (CE), así como el contenido de algunos componentes; Cl⁻, SO₄²⁻, H₂S, CO₂, etc.

Desafortunadamente, no todos los sitios estudiados poseen suficientes datos hidroquímicos, correspondientes a muestreos sistemáticos durante uno o más años hidrológicos, por lo que se decidió tomar en cuenta sólo aquellos donde el número de muestras fuera suficientemente representativo. En la tabla VI se presentan los valores del coeficiente de variación del TSS de algunos sitios.

Tabla VI. Indicadores de la variación estacional de la temperatura y de los sólidos solubles totales (TSS) en aguas que drenan carbonatos del intervalo Jurásico-Paleógeno

No	Tipo de agua	N	TSS	CV _{TSS}
1	Freática	39	271	14.0
2	Freática	38	305	13.1
3	Freática	18	438	7.7
4	Mineral	24	489	5.9
5	Mineral	10	500	4.1
6	Mineromedicinal	12	1527	3.6
7	Mineromedicinal	15	1668	1.6
8	Mineromedicinal	11	2120	4.5
9	Mineromedicinal	30	2811	3.2

1) Surgencia Ancón; 2) Resurgencia Canilla; 3) Manantial Mil Cumbres; 4) Pc-1 (San José del Lago); 5) P-1 (San Vicente); 6) El Templado (San Diego de los Baños); 7) P-3 (San Vicente); 8) La Gallina (San Diego de los Baños); 9) Pozo P 1 (San Diego de los Baños).

TSS: valor medio de los sólidos solubles totales (mg/l); C.V.: coeficiente de variación (%).

Del análisis de la tala 6 se concluye que, de las aguas estudiadas, las que poseen un recorrido subterráneo más corto (aguas freáticas, flujos locales), poseen por lo general un coeficiente de correlación del TSS mayor (entre 7.7 y 14 %); las de recorrido mayor y más profundo (aguas mineromedicinales, flujos de carácter más regional), un coeficiente más bajo (entre 1.6 y 4.5 %), mientras que las de recorrido intermedio (aguas minerales de mesa, flujo intermedio); un coeficiente intermedio (entre 4.1 y 5.9 %)

Origen de la composición química del agua

Con el objetivo de explicar el origen de la composición química de las aguas que drenan carbonatos del intervalo Jurásico-Paleógeno, se aplicaron los métodos de balance de masas y mezcla de agua, mediante el sistema informático MODELAGUA (Fagundo Sierra et al, 2001). Los principales procesos hidrogeoquímicos que se toman en cuenta en este algoritmo se muestran en la tabla VII).

En las tablas VIII, IX y X se exponen los resultados de las transferencias de masas correspondientes a procesos geoquímicos originan la composición química (aguas de tipo bicarbonatada cálcicas o cálcicas magnésicas) de flujos locales de corto y mediano recorrido que discurren por la zona vadosa (epikarst) del sistema cársico de los macizos carbonatados (Formaciones Guajaibón, Lucas, Cacarajícara, Artemisa, Charco Redondo, etc). Estos procesos son los siguientes: 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 (Tabla VIII). 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 (Tabla IX). Como el proceso de oxidación de pirita va acompañado de la generación de este gas, parte de la calcita disuelta pudiera formarse por consumo de CO₂ no procedente de la zona del suelo.

Tabla VII. Principales procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química del agua.

Mineral	Fórmula	PM	Proceso geoquímico y formulación
Halita, Silvita	NaCl, KCl	58.5, 74.5	Disolución – precipitación de halita y silvita $\text{NaCl (s)} = \text{Na}^+ (\text{ac}) + \text{Cl}^- (\text{ac})$ $\text{KCl (s)} = \text{K}^+ (\text{ac}) + \text{Cl}^- (\text{ac})$ Halita Silvita
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	92	Disolución – precipitación de yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O (s)} = \text{Ca}^{2+} (\text{ac}) + \text{SO}_4^{2-} (\text{ac}) + 2 \text{H}_2\text{O (l)}$ Yeso
Calcita	CaCO_3	100	Disolución – precipitación de calcita $\text{CO}_2 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O (l)} + \text{CaCO}_3 (\text{s}) = \text{Ca}^{2+} (\text{ac}) + 2 \text{HCO}_3^{2-} (\text{ac})$ Calcita
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	184	Disolución – precipitación de dolomita $2 \text{CO}_2 (\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O (l)} + \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 (\text{s}) = \text{Ca}^{2+} (\text{ac}) + \text{Mg}^{2+} (\text{ac}) + 4 \text{HCO}_3^{2-} (\text{ac})$ Dolomita
Cuarzo	SiO_2	64	$\text{SiO}_2 (\text{s}) + 2 \text{H}_2\text{O (l)} = \text{H}_4\text{SiO}_4 (\text{ac})$ Cuarzo
Serpentinita	$\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	576	Intemperismo de serpentinita $12 \text{CO}_2 (\text{g}) + 10 \text{H}_2\text{O (l)} + \text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 (\text{s}) = 6 \text{Mg}^{2+} (\text{ac}) + 4 \text{H}_4\text{SiO}_4 (\text{ac}) + 12 \text{HCO}_3^{2-} (\text{ac})$ Serpentinita
Plagioclasa	(x NaAlSi ₃ O ₈ + y CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	274 x + 286 y	Intemperismo de plagioclasas (anortita) $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 (\text{s}) + 2 \text{CO}_2 (\text{g}) + 3 \text{H}_2\text{O (l)} = \text{Ca}^{2+} (\text{ac}) + 2 \text{HCO}_3^{2-} (\text{ac}) + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 (\text{s})$ Anortita Caolinita
Microclino (feldespato potásico)	KAlSi_3O_8	290	Intemperismo de feldespato potásico (microclino) $2 \text{KAlSi}_3\text{O}_8 (\text{s}) + 2 \text{CO}_2 (\text{g}) + 11 \text{H}_2\text{O (l)} = 2 \text{K}^+ (\text{ac}) + 2 \text{HCO}_3^- (\text{ac}) + 4 \text{H}_4\text{SiO}_4 (\text{l}) + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 (\text{s})$ Microclino Caolinita
Pirita	FeS_2	120	Oxidación de pirita $2 \text{FeS}_2 (\text{s}) + 7 \text{O}_2 (\text{g}) + 8 \text{HCO}_3^- (\text{ac}) = 2 \text{Fe}(\text{OH})_2 (\text{s}) + 4 \text{SO}_4^{2-} (\text{ac}) + 8 \text{CO}_2 (\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O (l)}$ Pirita Hematita
$\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ $\text{Ca}^{2+} - \text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+} - \text{N}^+\text{aR}_2$ $\text{Ca}^{2+} - \text{KR}_2$	40	Intercambio iónico Ca-Na y Ca-K $\text{Ca}^{2+} (\text{ac}) + 2 \text{NaR}_2 (\text{s}) = 2 \text{Na}^+ (\text{ac}) + \text{CaR}_2 (\text{s}); \text{Ca}^{2+} (\text{ac}) + 2 \text{KR}_2 (\text{s}) = 2 \text{K}^+ (\text{ac}) + \text{CaR}_2 (\text{s})$ (R = Arcilla, zeolita, carbón u otro material intercambiable)

Las aguas que poseen un recorrido mayor, que además de reaccionar con las calizas, lo hacen con otras litologías (rocas ultrabásicas y esquistos y areniscas), son del tipo bicarbonatada mixtas. El origen de la composición química de estas aguas se muestra en la tabla X. En este caso intervienen procesos hidrogeoquímicos similares a los anteriores, pero además ocurren procesos de intemperismo de serpentinita. En este grupo el aporte de los iones HCO_3^- y Mg^{2+} se debe tanto al proceso de intemperismo de la dolomita como de la serpentinita, lo cual se puede atribuir a la acción de estos flujos sobre los sedimentos carbonatados y las rocas ultrabásicas.

Se debe destacar el comportamiento geoquímico de los flujos de carácter más regional y profundo que, en su recorrido subterráneo drenan calizas de la Fm. Artemisa (principalmente en la zona de alimentación del acuífero), y en profundidad interactúan con sedimentos de la Fm. San Cayetano. Originan aguas de tipos sulfatadas bicarbonatadas cálcicas, sulfatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas sódicas. La composición química de estas aguas altamente mineralizadas se puede explicar, al igual que en el caso anterior, mediante procesos de disolución congruente de halita, calcita, dolomita, serpentinita, disolución incongruente de plagioclasas (albita, anortita) y microclino, así como oxidación de pirita y reducción de sulfato.

Otra forma de explicar el origen de la composición química de las correspondientes a los flujos de mayor recorrido subterráneo, es asumiendo la ocurrencia de procesos de mezcla de aguas. Así las aguas de los tipos $\text{HCO}_3\text{-Ca} > \text{Na}$, $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{SO}_4\text{-Ca} > \text{Na}$, $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3\text{-Ca} > \text{Na}$ y las del tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ con más bajo contenido de minerales disueltos puede explicarse, aplicando modelos de balance de masas y mezcla de aguas, mediante similares procesos previa mezcla de miembros extremos de los tipos $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}$ y $\text{SO}_4\text{-Ca}$ en diferentes proporciones (Fagundo et al, 2001; 2003).

Tabla VIII. Transferencia de masas (mg/) 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 e intermedios) en carbonatos del intervalo Jurásico-Paleógeno.

Proceso geoquímico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Halita	14.0	15.4	16.0	15.8	17.5	20.5	8.8	7.5	11.9	18.5	21.3	31.2
Calcita	70.5	98.3	125.6	154.4	154.3	131.6	328.7	382.5	182.3	191.6	139.5	177.1
Dolomita	21.2	36.6	32.0	12.9	31.3	61.9	88.0	127.9	45.8	35.9	93.4	73.4
Serpentina	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Plagioclasa	23.3	19.2	14.7	0.0	25.0	0.0	60.8	0.0	10.1	55.4	10.0	44.1
Microclino	2.9	0.1	0.1	0.0	0.1	6.0	1.6	0.0	1.6	0.8	3.8	3.0
Pirita	5.4	5.1	6.3	13.8	3.9	2.4	19.9	65.0	3.6	23.1	35.4	16.1
H ₂ S	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.9	0.0
CO ₂	54.2	63.8	71.5	68.9	88.6	137.1	35.6	-37.8	122.8	99.5	268.0	142.3

1) Aspiro; 2) Resurgencia Canilla; 3) Surgencia Ancón; 4) Sierra de Canastas; 5) M. Mameyes; 6) M. Lucas; 7) M. Los Perdidos; 8); Los Portales; 9) M. La Curra; 10) M. Mil Cumbres NS; 11) Pozo Brocal; 12) M. Cacarájicara NS.

Tabla IX. 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 intermedios) en carbonatos del intervalo Jurásico-Paleógeno.

Proceso geoquímico	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Halita	46.8	34.1	26.9	27.4	14.4	28.7	55.6	40.6	32.4	35.1	16.3	79.6
Calcita	67.5	224.6	245.1	148.3	155.5	225.0	39.5	200.5	233.8	264.0	180.7	209.4
Dolomita	182.0	55.0	55.0	33.7	148.6	31.3	211.6	88.8	101.0	116.4	41.1	47.6
Serpentina	0.0	0.0	0.0	95.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.9	71.5
Plagioclasa	0.0	37.2	73.8	126.0	123.3	87.6	0.0	296.7	65.8	265.4	58.4	201.2
Microclino	5.8	1.6	3.0	9.7	3.0	8.7	5.8	13.5	7.5	3.8	1.6	14.9
Pirita	10.5	29.0	27.8	56.9	34.0	60.5	3.1	58.2	36.8	36.5	16.5	21.5
H ₂ S	0.0	0.0	0.0	26.1	10.1	0.0	0.9	8.1	5.4	10.0	1.5	5.9
CO ₂	133.5	131.2	138.1	165.2	354.8	133.1	140.8	150.2	433.3	408.1	183.1	251.7

13) PC-1 San José del Lago; 14) M. San Juan NS; 15) P-3 173 m San Diego de los Baños; 16) B. Soroa; 17) M. San Juan Sulfuroso; 18) PC-10 San Vicente; 19) B. San José del Lago; 20) M. Cacarajicara Sulfuroso; 21) M. Pedernales; 22) M. La Pastora; 23) Pozo Azul; 24) M. Martín Mesa.

Tabla X. 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 de carácter más regional y profundo) en carbonatos del intervalo Jurásico-Paleógeno.

Proceso geoquímico	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Halita	110.9	83.1	47.2	21.6	50.0	48.2	46.2	59.2	58.9	24.8	85.9	688.0
Calcita	472.5	395.2	868.8	962.1	1054.1	977.4	1371.5	828.3	1144.2	776.2	414.8	1090.2
Dolomita	239.8	89.3	151.9	218.6	239.5	222.0	311.6	210.8	259.9	176.3	94.2	247.6
Serpentina	0.0	55.9	49.5	33.1	74.6	87.3	116.8	97.9	125.5	22.7	184.0	783.8
Plagioclasa	0.0	586.1	377.6	38.6	314.9	995.4	862.0	838.8	434.4	73.3	978.4	1759.7
Microclino	4.5	32.0	32.8	71.2	29.1	67.0	69.6	58.6	28.1	7.5	72.9	208.8
Pirita	357.6	365.6	505.3	661.4	836.2	956.6	1301.3	909.7	977.5	501.8	538.3	1531.2
H ₂ S	5.0	10.0	18.1	7.6	17.3	31.8	39.7	51.2	24.7	7.9	23.9	0.0
CO ₂	-216.1	-29.3	-132.5	-380.4	-422.2	-382.6	-706.4	-400.0	-514.2	-211.1	10.7	-150.1

25) M. Sal y Cruz; 26) M. Cueva de los Portales; 27) M. El Templado (San Diego de los Baños); 28) B. San Vicente; 29) M. La Gallina (San Diego de los Baños); 30) M. M 1 Bermejales; 31) Pozo P1 profundo (San Diego de los Baños); 32) Pozo P 12; 33) Pozo P 17; 34) Pozo P 19; 35) Pozo P 4 145-195 m; 36) Aguas Claras.

Calizas sedimentarias del macizo cretácico de Las Tunas

Este grupo de muestras de aguas que drenan carbonatos sedimentares del Cretácico fue procesado por separado con relación al anterior, tomando en consideración su alto contenido de cloruro de sodio. 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 la tabla XI se observa, que en experimentos de lavado de suelos de esa provincia con agua destilada, las mismas 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.

Tabla XI. Experimentos de laboratorio de lavado de suelos con agua destilada. Municipio Puerto Padre, Las Tunas.

H	Profundidad (cm)	TSS (mg/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Suma (meq/l)	CO3 (meq/l)	SO4 (meq/l)	Cl (meq/l)	HCO3 (meq/l)	Suma (meq/l)
A	0 - 25	17 741	6,12	5,89	0,23	16,24	28,48	0,1	5,33	25,35	0,65	31,43
B	25 - 55	26 266	13,76	10,03	6,28	23,72	53,79	0	19,6	28,75	0,4	48,75
C	55 - 87	25 344	11,39	9,22	0,32	25	45,93	0	17,32	28,2	0,35	45,87

H	Profundidad	% Ca	% Mg	% K	% Na	Suma	% SO4	% Cl	% HCO3	% CO3	Suma
A	0 - 25	21,5	20,7	0,8	57,0	100,0	17,0	80,7	2,1	0,3	100
B	25 - 55	25,6	18,6	11,7	44,1	100,0	40,2	59,0	0,8	0,0	100
C	55 - 87	24,8	20,1	0,7	54,4	100,0	37,8	61,5	0,8	0,0	100

H: Horizonte.

En la tabla XII 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, fecies de tipo bicarbonatadas cloruradas y cloruradas bicarbonatadas sódicas cálcicas magnesianas.

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

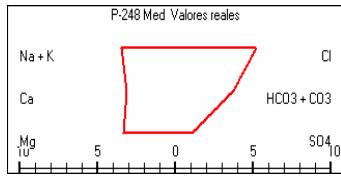
No	Pozo	N	T	pH	CO ₂	TSS	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na+K	Tipo de agua
1	P-195	16	25.0	7.44	25.8	533	232.4	30.5	15.4	92.6	16.0	23.7	HCO ₃ -Ca
2	P-248	60	25.0	7.61	9.1	627	220.2	179.6	49.0	61.2	39	77.5	Cl>HCO ₃ -Na>Mg>Ca
3	Central Jobabo	23	25.0	7.90	23.0	1438	630.1	335.1	52.8	130.4	54.5	229.5	HCO ₃ >Cl-Na>Ca>Mg
4	Quinta Planta	17	25.0	7.83	17.1	1481	533.8	329.1	46.1	135.2	47.4	244.7	HCO ₃ >Cl-Na>Ca
5	Edificio Parque	10	25.0	7.80	19.1	1030	605.7	126.7	34.6	124.0	47.4	47.4	HCO ₃ >Cl-Ca>Na>Mg
6	La Siberia	12	25.0	7.82	27.4	1354	720.4	209.8	73.4	150.4	77.5	121.0	HCO ₃ >Cl-Ca>Mg>Na
7	Circunscrip. 7	11	25.0	7.73	27.7	1968	1008	200.6	214.6	143.8	53.3	345.7	HCO ₃ >Cl-Na>Ca
8	Cab. Colombia	13	25.0	7.54	52.3	1391	808.9	140.9	64.8	132.4	35.6	206.8	HCO ₃ >Cl-Na>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).

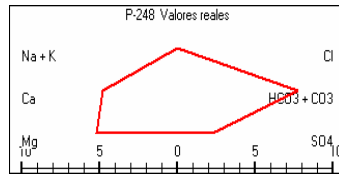
Patrones de valores reales

Patrones de ganancia iónica (extraído el NaCl)

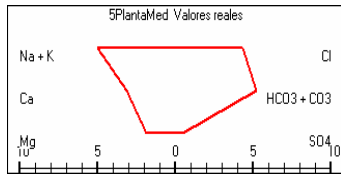


PH: 523-541

Fm. Contra maestre. P-248.

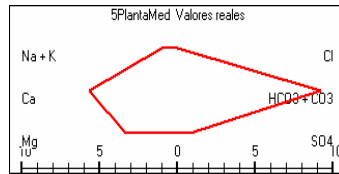


PH: 145-181

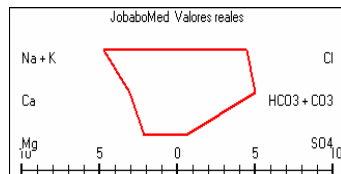


PH: 532-451

Fm. Contra maestre. Quinta Planta.

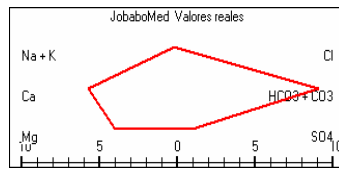


PH: 163-181

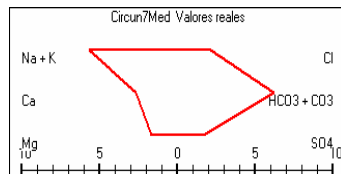


PH: 532-451

Fm. Contra maestre. Central Jobabo.

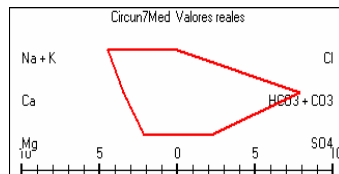


PH: 163-181



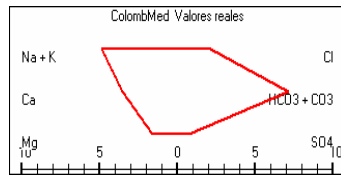
PH: 532-271

Fm. Guaimaro.



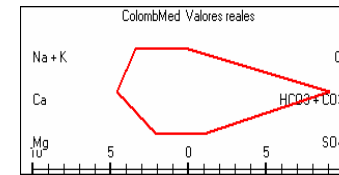
PH: 532-172

Circunscripción 7



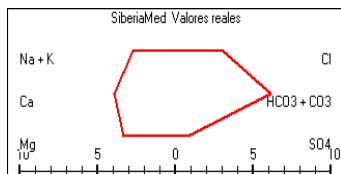
PH: 532-271

Fm. Guaimaro.



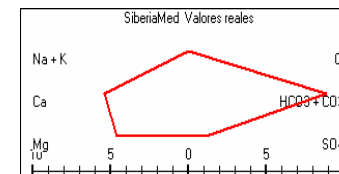
PH: 352-181

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.

El análisis de regresión y correlación lineal a los datos de los pozos seleccionados de la provincia de Las Tunas, puede realizarse a partir de la matriz de los correspondientes datos hidroquímicos (Tabla XIII).

Tabla XIII. Matriz de correlación de variables. Aguas subterráneas que drenan carbonatos del Cretácico de origen sedimentario. Cuenca hidrogeológica del Cretácico, provincia Las Tunas.

N=162	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	TSS
HCO ₃ ⁻	1	0.33	0.55	0.86	0.47	0.82	0.95
Cl ⁻		1	0.17	0.36	0.58	0.65	0.59
SO ₄ ²⁻			1	0.33	0.34	0.64	0.62
Ca ²⁺				1	0.49	0.59	0.81
Mg ²⁺					1	0.40	0.57
Na ⁺						1	0.93
SS							1

De los resultados de la tabla XIII se infiere que las mejores correlaciones con el TSS se obtienen con los iones HCO₃⁻, Na⁺ y Ca²⁺, siendo también altamente significativas las relaciones entre estos iones entre sí.

Del análisis de los resultados de las tablas XI y XII 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:

Cl-Na → HCO₃>Cl- Ca>Mg>Na → HCO₃>Cl-Na>Ca>Mg → HCO₃>Cl-Ca>Na>Mg → Cl>HCO₃-Na>Mg>Ca.

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

Cl-Na → HCO₃>Cl-Na>Ca.

Variación estacional de la composición química

En la tabla XIV se ilustra la variación estacional (en términos de CV_{TSS}) de la composición química de las aguas subterráneas que drenan los carbonatos sedimentarios del Cretácico en la provincia de las Tunas (muestras 1-8), así como una muestra de agua superficial (muestra 9) tomada como referencia comparativa.

Tabla XIV. Indicadores de la variación estacional de los sólidos solubles totales (TSS) en aguas que drenan carbonatos de la Cuenca hidrogeológica del Cretácico. Las Tunas.

No	Tipo de agua	N	TSS	CV _{TSS}
1	Freática	16	537	6.9
2	Freática	60	627	4.1
3	Freática	23	1438	14.3
4	Freática	17	1481	7.4
5	Freática	10	1030	6.1
6	Freática al	12	1354	8.7
7	Freática al	11	1968	7.9
8	Freática al	13	1391	14.5
9	Superficial	147	385	59.6

1) P-195; 2) P-248; 3) Central Jobabo; 4) Quinta Planta; 5) Edificio del Parque; 6) La Siberia; 7) Circunscripción 7; 8) Cabecera Colombia; 9) Presa Cayojo.

En general, las aguas de tipo freáticas, poseen magnitudes de CV_{TSS} que varían entre 4.1 y 14.5 %, del orden de las encontradas anteriormente para este tipo de agua (Tabla VI). En la muestra freática tomada de referencia este estadígrafo posee un valor de 59 %.

Origen de la composición química del agua

En la tabla XV 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.

Tabla XV. 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 Cretácico 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 2-6, 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 XVI 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.

Las aguas minerales y de abasto público de la Isla de la Juventud están asociadas a las formaciones geológicas, mostradas en la tabla I: Cañada, de edad Jurásico inferior hasta el Jurásico medio ($J_1 - J_2$); Agua Santa, que va desde el Jurásico medio hasta el Jurásico superior. ($J_2 - J_3$) y Gerona, del Jurásico superior hasta el Cretácico ($J_3 \text{ ox} - K$). La corteza de intemperismo que cubre a estas secuencias es de edad Neógeno–Cuaternario (Ng – Q) y la conforman los materiales de la secuencia de base erosionados, poco permeables, confiriéndole a los acuíferos características de confinamiento (Leonarte, 2006).

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).

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 (Tabla XVI). 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 $\text{HCO}_3 > \text{Cl} - \text{Ca} > \text{Na}$ y $\text{Cl} - \text{Na} > \text{Ca}$. 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 XVI Composición química de las 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-99	13	25	6.51	31.6		130	57.8	21.8	12.2	21.5	12.8	2.8	0.4	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
8	F-119	14	25	6.4	36.3		132	56.0	22.9	13.8	21.4	3.8	13.9	0.3	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
9	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
10	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
11	F-34	69	25	7.09	31.2		209	131.8	16.1	7.2	40.2	3.9	9.6	0.2	HCO ₃ -Ca
12	F-40	38	25	7.34	15.4		219	134.7	20.3	6.9	41.9	4.7	9.8	0.2	HCO ₃ -Ca
13	F-19	85	25	6.82	54.7		221	139.7	15.9	8.7	43.5	4.0	9.0	0.0	HCO ₃ -Ca
14	F-112	11	25	7.02	31.5		229	140.6	16.8	13.1	39.9	5.9	12.1	0.2	HCO ₃ -Ca
15	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
16	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
17	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
18	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
19	F-62	57	25	6.88	47.1		295	177.2	22.0	19.3	59.8	4.4	12.0	0.2	HCO ₃ -Ca
20	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
21	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
22	F-102	6	25	6.99	22.4		393	149.1	109.5	16.5	62.1	11.0	44.3	0.9	Cl>HCO ₃ -Ca>Na
23	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
24	G-59	43	25	6.87	24.2		149	86.6	19.3	3.1	26.7	3.5	9.4	0.3	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
25	G-30	30	25	7.01	22.9		170	112.5	12.6	3.5	26.1	7.6	2.2	0.2	HCO ₃ -Ca>Mg
26	G-17	31	25	6.95	26.5		203	129.3	15.3	6.4	38.5	4.3	8.6	0.3	HCO ₃ -Ca
27	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
28	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
29	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
30	G-50	91	25	6.81	60.8		339	169.9	60.2	13.4	69.4	6.3	19.2	0.6	HCO ₃ >Cl-Ca
31	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
32	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
33	G-92	33	25	6.94	45.0		422	220.7	80.7	12.9	88.3	6.4	31.5	0.6	HCO ₃ >Cl-Ca
34	G-78	101	25	7.02	27.8		496	175.3	148.4	21.2	71.9	12.2	65.9	1.3	Cl>HCO ₃ -Ca>Na
35	G-34	110	25	6.76	91.8		540	275	99.5	10.8	92.7	10.3	50.7	1.0	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
36	G-19	90	25	7.01	30.5		562	143.7	209.3	28.2	60.1	15.3	103.0	2.5	Cl>HCO ₃ -Na>Ca
37	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
38	G-130	7	25	7.21	16.6		675	203.2	234.6	26.8	107.3	17.4	82.9	2.6	Cl>HCO ₃ -Ca>Na
39	G-13	72	25	6.99	40.8		682	228.2	269.3	32.7	9.4	17.1	121.3	3.7	Cl>HCO ₃ -Na
40	G-72	49	25	6.63	222.3		686	321.7	145.7	16.9	115.8	12.8	71.9	1.5	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
41	G-127	19	25	7.28	15.2		777	205.2	285.8	40.0	110.3	21.6	120.5	3.5	Cl>HCO ₃ -Ca>Na
42	G-102	44	25	7.01	30.6		1013	192.8	392.6	51.0	145.7	16.0	208.2	6.4	Cl>HCO ₃ -Ca>Na
43	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 Lucía (La Fé); 4- M. Ferroso (La Fé); 5- M. Magnésiano (La Fé); 6- M. La Magnésiana (Gerona); 7-22: Fuentes de abasto de la cuenca hidrogeológica La Fe; 23-43: Fuentes de abasto de la cuenca hidrogeológica Gerona.

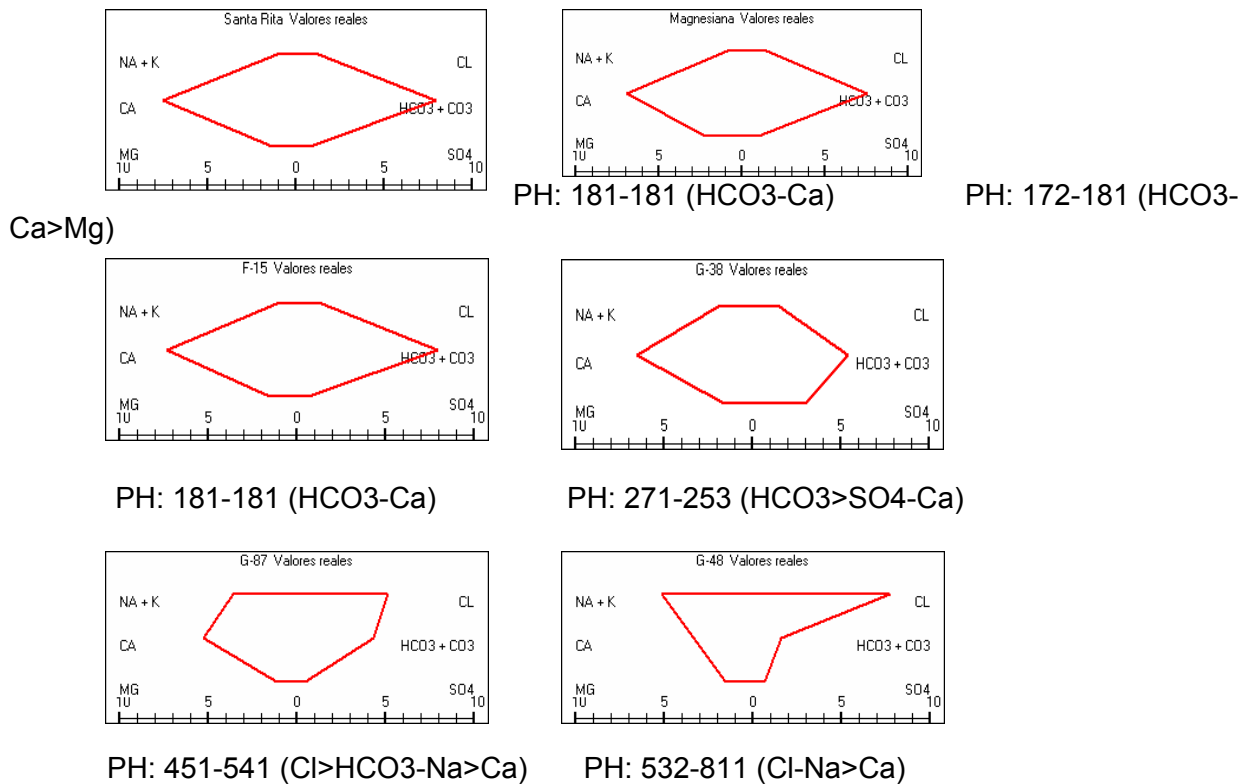


Figura 4. Patrones hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas que drenan esquistos y mármoles.

Con el objetivo de interpretar la tendencia evolutiva de las aguas de estudiadas, se procesaron por separado, mediante modelos de regresión y correlación lineal, los datos correspondientes a las aguas minerales y las aguas de abasto público de las cuencas hidrogeológicas de La Fé y Gerona. Los resultados de este procesamiento se resumen en las matrices de correlación que se muestran en las tablas XVII , XVIII y XIX respectivamente.

Tabla XVII. Matriz de correlación de variables. Aguas minerales que drenan carbonatos del Jurásico de origen metamórfico. Isla de la juventud.

N=13	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	TSS
HCO ₃ ⁻	1	0.40	0.13	0.80	0.18	0.27	0.66
Cl ⁻		1	0.64	0.81	0.44	0.98	0.95
SO ₄ ²⁻			1	0.34	0.56	0.65	0.63
Ca ²⁺				1	0.33	0.72	0.91
Mg ²⁺					1	0.43	0.42
Na ⁺						1	0.89
TSS							1

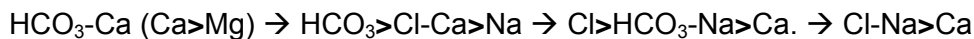
Tabla XVIII. Matriz de correlación de variables. Aguas subterráneas que drenan carbonatos del Jurásico de origen metamórfico. Cuenca hidrogeológica La Fé, Isla de la juventud.

N=727	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	TSS
HCO ₃ ⁻	1	0.41	0.56	0.92	0.34	0.50	0.92
Cl ⁻		1	0.53	0.57	0.45	0.90	0.69
SO ₄ ²⁻			1	0.74	0.25	0.68	0.78
Ca ²⁺				1	0.22	0.63	0.96
Mg ²⁺					1	0.42	0.40
Na ⁺						1	0.76
TSS							1

Tabla XIX. Matriz de correlación de variables. Aguas subterráneas que drenan carbonatos del Jurásico de origen metamórfico. Cuenca hidrogeológica Gerona. Isla de la juventud.

N=1059	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	TSS
HCO ₃ ⁻	1	0.28	0.03	0.54	0.27	0.28	0.56
Cl ⁻		1	0.61	0.49	0.82	0.98	0.95
SO ₄ ²⁻			1	0.31	0.55	0.63	0.60
Ca ²⁺				1	0.31	0.49	0.59
Mg ²⁺					1	0.80	0.79
Na ⁺						1	0.93
TSS							1

A partir de la información que presentan las tablas XVI, XVII, XVIII y XIX, se puede inferir que la tendencia evolutiva de las aguas que drenan los mármoles y esquistos de la Isla de la Juventud es aproximadamente:



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.

Variación temporal de la composición química del agua

En la tabla XX se presentan los resultados del cálculo de los coeficientes de variación del TSS de las aguas subterráneas de las cuencas hidrogeológicas de La Fé y Gerona estudiadas en este trabajo. Se excluyen las aguas minerales por no poseer un número suficiente de datos para el procesamiento estadístico.

Tabla XX Coeficientes de variación del TSS y tipo de agua de las fuentes de abasto público de las cuencas hidrogeológicas de La Fé y Gerona.

Cuenca hidrogeológica La Fé

Pozo	Tipo de agua	CV _{TSS}
F-19	HCO ₃ -Ca	3.1
F-34	HCO ₃ -Ca	3.5
F-40	HCO ₃ -Ca	4.6
F-84	HCO ₃ -Ca	5.4
F-94	HCO ₃ -Ca	5.9
F-85	HCO ₃ -Ca	6.1
F-62	HCO ₃ -Ca	6.8
F-25	HCO ₃ -Ca	8.8
F-15	HCO ₃ -Ca	9.6
F-112	HCO ₃ -Ca	12.8
F-52	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	4.3
F-99	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	10.0
F-119	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	10.5
F-20	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	13.6
F-86	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	20.3
F-102	Cl>HCO ₃ -Ca>Na	15.9

Cuenca hidrogeológica Gerona

Pozo	Tipo de agua	CV _{TSS}
G-30	HCO ₃ -Ca>Mg	2.3
G-77	HCO ₃ -Ca>Mg	3.6
G-17	HCO ₃ -Ca	4.2
G-38	HCO ₃ >SO ₄ -Ca	7.3
G-28	HCO ₃ >Cl-Ca	5.8
G-50	HCO ₃ >Cl-Ca	11.5
G-92	HCO ₃ >Cl-Ca	15.2
G-72	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	9.4
G-34	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	11.5
G-59	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	20.8
G-57	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	33.7
G-130	Cl>HCO ₃ -Ca>Na	13.4
G-63	Cl>HCO ₃ -Ca>Na	21.9
G-78	Cl>HCO ₃ -Ca>Na	28.2
G-87	Cl>HCO ₃ -Ca>Na	34.6
G-102	Cl>HCO ₃ -Ca>Na	30.1
G-127	Cl>HCO ₃ -Ca>Na	47.2
G-19	Cl>HCO ₃ -Na>Ca	7.6
G-61	Cl>HCO ₃ -Na>Ca	9.6
G-13	Cl>HCO ₃ -Na	20.2
G-48A	Cl-Na>Ca	19.7

Del análisis de la tabla XX se deduce que existe un grupo numeroso de pozos, cuyas aguas poseen una composición química relativamente estable (valores del CV_{TSS} por lo general entre 3.1 y 9.6 %), originadas en mediante procesos de interacción agua – roca, cuya composición relativa es principalmente de tipo: HCO₃-Ca, HCO₃-Ca>Mg y HCO₃>SO₄-Ca. Las aguas que poseen en su composición relativamente altos contenidos de Cl⁻ y Na⁺, como consecuencia principal de la intrusión salina, presentan mayormente valores de CV_{TSS} superiores a 10 %. La composición de esta agua corresponde a las facies hidroquímicas: HCO₃>Cl-Ca, HCO₃>Cl-Ca>Na, Cl>HCO₃-Ca>Na, Cl>HCO₃-Na y Cl-Na>Ca.

Las aguas cuya composición presentan una menor fluctuación estacional (menores valores de CV_{TSS}) están más representadas en la cuenca La Fé que en la cuenca Gerona. Por el contrario, en la cuenca Gerona, son más abundantes las aguas con mayores valores de CV_{TSS}.

Origen de la composición química del agua

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 XXI y XXII.

Tabla XXI. 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.

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);.

Tabla XXII. 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 abasto afectadas por la intrusión marina, Isla de la juventud.

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

Como puede apreciarse en la tabla XXI, 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 XXII), 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.

CONCLUSIONES

Las principales facies hidroquímicas presentes en las aguas subterráneas que drenan carbonatos sedimentarios del intervalo Jurásico-Paleógeno, en cuencas no costeras, son: bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas cálcico magnésicas, bicarbonatadas mixtas y sulfatadas cálcicas, 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 dependen 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 piritas; 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: $\text{Cl-Na} \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} \rightarrow \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca}$ (en presencia de calizas dolomitizadas o serpentinitas); $\text{Cl-Na} \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na} > \text{Ca}$ (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: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca} > \text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Ca} > \text{Na} \rightarrow \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{Na} > \text{Ca} \rightarrow \text{Cl}^- > \text{Na} > \text{Ca}$. 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.

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 piritas 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 piritas, 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.

BIBLIOGRAFÍA

- Academia de Ciencias de Cuba, 1989. Mapa Geológico de Cuba Escala 1: 250 000. Instituto de Geología y Paleontología. Edición: Instituto de Geología de la Academia de ciencias de la URSS.
- APHA – AWWA – WPCF., 1992. Métodos Normalizados para el análisis de Aguas Potables y Aguas Residuales, Am. Public Assoc., Edición 17th. Editorial, Madrid: Grijalbo, 4-1 – 4-235 p.
- Appelo C.A.J., D. Postma, 1993. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Rotterdam, Netherlands: Ed. Balkema, 536 p.
- Armijo-Valenzuela, M. y J. San Martín, 1994. Clasificación de las aguas mineromedicinales. En: Curas Balnearias y Climáticas. Talasoterapia y Helioterapia, Madrid: Ed. Complutense, 219-223 p.
- Ergorov, S.V. y J.R. Luge, 1967. Hidrogeología de Cuba. La Habana: Ed. INRH, ICRM, 84 p.
- 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, P. González, 1997. Geoquímica de acuíferos cársicos de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Editores: D.M. Arellano, M.A. Gómez, I. Antigüedad. Bilbao, España, Edición: Universidad del País Vasco, 135-149 p.
- Fagundo, J.R., 1996. Química del Agua Kárstica. En: Hidroquímica del Karst. Editores: J.R. Fagundo, J.J. Valdés y J.E. Rodríguez. España: Ediciones Osuna, Universidad de Granada, 14-119 p.
- Fagundo, J.R., 1998. Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales. Ingeniería Hidráulica, 19 (2): 62-78.
- Fagundo J.R., P. González, M. Suárez Muñoz, J. Fagundo-Sierra, C. Melián, E. Alvarez, 2005 a. HIDROGEOQUIM. En: Contribución a la Educación y Protección Ambiental, La Habana, Edición: ISCTN, 6: Q 58-67.
- Fagundo, J.R.; J.J. Carrillo-Rivera; I. Antigüedad; P. González; R. Peláez; M. Suárez; C. Melián; R. Hernández, 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, M. Suárez, 2001. Modelación de las aguas naturales. En: Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, La Habana, Edición: ISCTN, 2, 8 p.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1980. Groundwater, Englewood, Cliffs, New York: Ed. Prentice-Hall, 604 p.
- González, P., M. Suárez, G. Benítez, J. Ramírez, J.R. Fagundo, 2000. Caracterización de aguas minerales de algunos yacimientos del país. En: Le Monde du Thermalisme. Paris (Francia) : Ed. L' Organisation Mondiale du Thermalisme (O.M.Th), 14-15 p.
- González P., M Llerena, M. Suárez, J.R. Fagundo, C. Melián, B. Luna, I. Herrera, 2001. Sectorización de las aguas naturales y mineromedicinales de las montañas de la Sierra del Rosario y las Alturas del Mariel. En: Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, La Habana, Edición: ISCTN, 2, 7 p.
- Giménez, E., 1994. Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de salinización en el acuífero detrítico costero de la Plana de Castellón. Tesis Doctoral, Universidad de Castellón, España: 469 p.
- Gutiérrez, R., 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). Edición: Universidad de Granada, 11- 26 p.
- Leonarte, T., J.R. Facundo, 2005. Calidad de las aguas subterráneas de Gerona y la Fe. En: Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, La Habana, Edición: ISCTN, 6: Q 45-58 p.
- 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, 91 p.
- N.C. 93-02, 1985. Norma Cubana de Agua Potable. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba, 8 p.
- N.C-2, 1996. Norma Cubana de Aguas de Bebida Envasada. Especificaciones. La Habana, Cuba, 5 p.

- N.C. 93-01-218, 1995. Norma Cubana de Agua Mineral. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba, 8 p.
- Peláez, R., Ma. C. Alvarez, R. Nuñez, M. Valdivia, 1990. Informe para la búsqueda detallada. Exploración orientativa de las aguas minero-medicinales de San Diego de los Baños. Empresa Geólogo Minera de 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, 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-October de 1985. Monografía. La Habana, Editorial Academia, 60 p.
- 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 Geológica, Expedición Geológica Villa Clara.
- Rodríguez, J.E., J.R. Fagundo, K. Spassov, 1991. Caracterización hidrológica e hidroquímica del carso 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 (editores), Universidad de Bordeaux, Francia, 135-144 p.
- 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 (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.
- Wu, Y., 2003. Mechanism analysis of hazards caused by the interaction between groundwater and geo - environment. *Environmental Geology*, Springer-Verlag: 44 (7): 811 - 819.