

Aplicación del sistema informático HIDROGEOQUIM en la caracterización de flujos de diferente naturaleza hidrogeológica.

M. Suárez Muñoz, J. R. Fagundo Castillo, P. González Hernández, C. Melián Rodríguez, J. Fagundo Sierra.

Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (CENAMENT). 44 esq 5^{ta}. Playa

e-mail: margaret@apache.isctn.edu.cu

Resumen

HIDROGEOQUÍM es un paquete de programas implementado sobre Windows, el cual permite el procesamiento rápido y eficaz de información hidroquímica (datos de análisis físico y químico del agua). Tiene importancia práctica para ser usado en la evaluación de las propiedades de los recursos hídricos y yacimientos de aguas minerales, también con fines docentes en cursos de Hidrogeoquímica, Hidroquímica y Calidad del Agua, Química Ambiental y otros relacionados con la hidrogeología y la hidrogeoquímica. El sistema permite además realizar una caracterización de aguas naturales superficiales o subterráneas, afectadas o no por la acción del hombre o la intrusión salina.

A partir de los valores de los principales parámetros químico-físicos, el sistema expresa las concentraciones iónicas en diferentes unidades (meq/l, mg/l, % meq/l), calcula la dureza, la mineralización en diferentes expresiones, determinando en cada caso los principales estadígrafos del fichero. También determina relaciones iónicas de interés geoquímico; así como los índices de agresividad de las aguas sobre la base de los modelos de Tillman-Trombe (ΔpH , pH de saturación y CO_2 en equilibrio) y de Back y Cols. (RSC, RSD, RSY y CO_2 en equilibrio), basados en el sistema de equilibrios químicos de los carbonatos. Permite además la representación gráfica en función del tiempo y de la temperatura, pH, CO_2 , CE, mineralización (TSS, $\sum\text{C}_i$), CaCO_3 , RSC, RSD y RSY; así como el diagrama Tillman-Trombe de pH vs dureza. Los datos se introducen por teclado mediante el algoritmo HIDROINPUT o a través de las bases de datos TERMADAT y PRODAT.

En el presente trabajo se muestra una aplicación del sistema en la caracterización de aguas captadas en manantiales y pozos en la Sierra del Rosario, en la provincia de Pinar del Río, correspondientes a las descargas de un sistema de flujos (locales, intermedios y regionales) que se desarrolla a diferentes niveles de profundidad.

Mientras que en los flujos locales e intermedios las aguas se encuentran saturadas o insaturadas con respecto a la calcita en dependencia del régimen de lluvia local, las aguas correspondientes a los flujos de carácter más regional y profundo tienden, en todo momento, a la saturación con respecto a la calcita, no manifestando una respuesta significativa al ciclo hidrológico. Las aguas alcanzan el equilibrio químico con menor grado de calcio disuelto en los flujos locales y la máxima concentración en los flujos regionales (más altos valores de TSS).

En el trabajo se analizan las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la región, se presentan los materiales y métodos empleados en el estudio, haciéndose énfasis en el método de empleo del sistema HIDROGEOQUIM, y finalmente se presentan y discuten los resultados.

La metodología empleada puede ser utilizada en la caracterización de otros acuíferos donde ocurran diferentes tipos de aguas asociadas al sistema de flujo presente.

Introducción

Desde la década del 80, se han realizando por el colectivo de autores, una serie de investigaciones relacionadas con la caracterización de acuíferos y cuencas hidrográficas, y para cumplimentar este objetivo se desarrollaron varios software específicos (SAPHIQ, SAMA, BATOMET, GEOQUIM, SACAN y SIMUCIN), que con el paso del tiempo fueron además introducidos en el país, así como en algunas universidades extranjeras. Las primeras versiones de estos programas se desarrollaron en lenguaje TURBO PASCAL y tenían ciertas limitaciones en la ejecución y entrada de datos, por lo cual, ha sido implementado este nuevo sistema denominado HIDROGEOQUIM, en lenguaje DELPHI 3 sobre WINDOWS.

El objetivo de este sistema informático es evaluar las propiedades de las fuentes de aguas naturales (ríos, lagos, embalses, manantiales, pozos, datos de redes de calidad, etc.) para diferentes usos.

Es un Sistema integrador que unifica los sistemas **SAPHIQ** e **HIDROINPUT** e interactúa con las bases de datos **TERMADAT** y **PRODAT**, unión que le permite al sistema de cálculo SAPHIQ tener amplia interacción con bases de datos y facilidades de entrada incorporadas con HIDROINPUT. Es importante considerar que a partir de la elaboración de este paquete se facilita la entrada de datos al sistema provenientes de Excel, Access y otros programas y la exportación de datos, tablas y gráficos a otros sistemas, lo que no era posible en los sistemas anteriores, dando como resultado que el usuario tuviera algunas dificultades en la importación y exportación de la data y en muchos casos llevando a la entrada manual de los datos.

Este sistema informático ha sido utilizado la caracterización de numerosos acuíferos como el de acuífero costero de Matanzas (Fagundo et. Al, 1993, Ferrera et al, 1999), el sector Guira-Quivicán en la Habana (Fagundo et al, 2002), los acuíferos de yeso de Punta Alegre (Fagundo et al, 1994), en la zona del Cauto (Fagundo et al, 1995), y más recientemente en las aguas de la Sierra del Rosario en Pinar del Río.

La subregión natural de las Montañas de la Sierra del Rosario (Gutiérrez y Glean, 1999), situada en la porción oriental de la Cordillera de Guaniguanico, entre la parte oriental de la provincia de Pinar del Río y la parte occidental de la provincia La Habana, (Fig. 1) tiene un gran potencial de aguas naturales y minerales, que pueden tener uso como fuentes de abasto a pequeñas poblaciones rurales, para el regadío en la agricultura, para consumo mediante embotellamiento y para fines terapéuticos. La cantidad y diversidad de las aguas de esta región está asociada a las complejas condiciones geológicas e hidrológicas existentes.

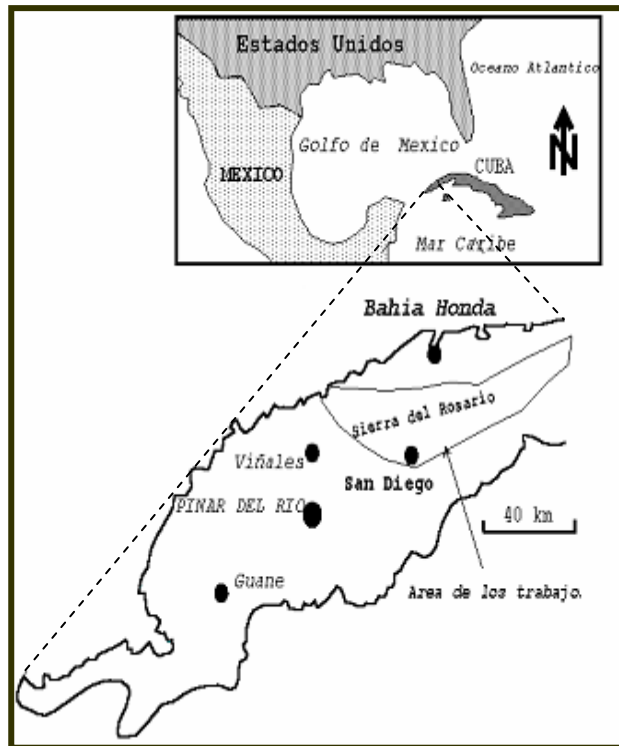


Figura 1. Esquema de ubicación de la Sierra del Rosario.

En este trabajo se realiza una descripción de las posibilidades del sistema informático HIDROGEOQUIM y se muestra una aplicación del sistema en la caracterización de aguas captadas en manantiales y pozos en la Sierra del Rosario, en la provincia de Pinar del Río, correspondientes a las descargas de un sistema de flujos (locales, intermedios y regionales) que se desarrolla a diferentes niveles de profundidad.

Materiales y Métodos

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron 365 datos hidroquímicos, a partir de muestreos realizados entre los años 1984 y 2002 (Pulina y Fagundo, 1984; Franco, Fagundo y Pajón, 1987; Peláez et al, 1990; Fagundo et al, 1993; González et. al, 2001, 2002), con aguas asociadas a las formaciones Manacas, Guajaibón, Sierra Azul, Cacarajícara, Artemisa, San Cayetano, Manacas y a las rocas ultrabásicas de la asociación ofiolítica.

Las mediciones de parámetros físico-químicos se realizaron en el campo mediante medidores de pH y conductímetros portátiles. El contenido de CO₂ y los principales macroconstituyentes se

analizaron en laboratorios de campo y en laboratorios especializados mediante las técnicas analíticas estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1971).

Para la programación se utilizó el programa Delphi 3 para Windows y se trabajó sobre la base del software SAPHIQ, al cual se le hicieron modificaciones y se le unificó el programa nuevo HIDROINPUT.

Resultados y discusión

Este sistema informático consta de varios subsistemas diseñados con el objetivo de evaluar las propiedades químico-físicas de las aguas naturales y minerales con vistas a su utilización en diferentes usos, así como para el monitoreo y control de su calidad de forma automatizada. Es útil para la caracterización hidroquímica espacial y temporal de aguas naturales en general (superficiales y subterráneas de tipo natural acuífera, natural mineral o mineromedicinal). En el caso de aguas estratificadas en profundidad (embalses, acuíferos costeros, etc.), brinda la posibilidad adicional de establecer los patrones hidrogeoquímicos correspondiente a cada estrato u horizonte acuífero.

Las opciones del sistema como resultado de la programación son:

Entrada de Datos

Permite la entrada de datos de un fichero o a partir del teclado.

Los ficheros que son utilizados con esta opción tienen la siguiente estructura: muestra, fecha, hora, temperatura, pH, conductividad eléctrica, CO₂, HCO₃, CO₃, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na+K, Dureza (CaCO₃)

Permite importar datos que se encuentren en los siguientes formatos:

Archivo dbf (*.dbf), Tabla de Paradox (*.db), Base de datos de ACCESS (*.mdb), hojas de cálculo de excel (*.xls).

Permite la entrada de datos directamente de los sistemas de base de datos TermaDat, ProDat y Access

Gráficos

Gráficos en función del tiempo:

Permite obtener las funciones temporales de las siguientes variables: Temperatura, pH, CE, CO₂, Mineralización, Dureza, TSS, RSC, RSD y RSY, en función del coeficiente de variación. Esta magnitud se expresa en porciento y permite conocer el grado de fluctuación estacional de las variables estudiadas, lo cual está relacionado con la respuesta de las aguas a las variaciones del régimen de lluvias y en forma indirecta ofrece información sobre las características del drenaje en la cuenca. Con los gráficos temporales se puede hacer análisis de tendencia en forma cualitativa, lo cual permite hacer pronósticos sobre la evolución de la calidad de las aguas.

Diagrama de Tillman-Trombe:

Permite apreciar el grado de saturación de un agua, para una temperatura dada, en función del pH y la dureza.

Cálculos Numéricos

Concentraciones en mg/l:

Permite obtener los datos originales en mg/l. Además se calcula el Na+K, el TSS (Total de sólidos Solubles), la dureza (CaCO₃) y la mineralización en términos de residuo seco, que se basa en una relación matemática entre la mineralización y la conductividad eléctrica.

Concentraciones en % meq/l:

Muestra los datos originales en %meq/l, lo cual permite realizar estudios geoquímicos.

Conductividad Teórica:

Calcula la conductividad teórica a partir de las concentraciones según el Modelo de Dudley y el Modelo de Miller. Los datos obtenidos entonces a partir de la conductividad teórica, (Figura 2), permitirán establecer la calidad de los datos, de la conductividad real y de la determinación de los iones.

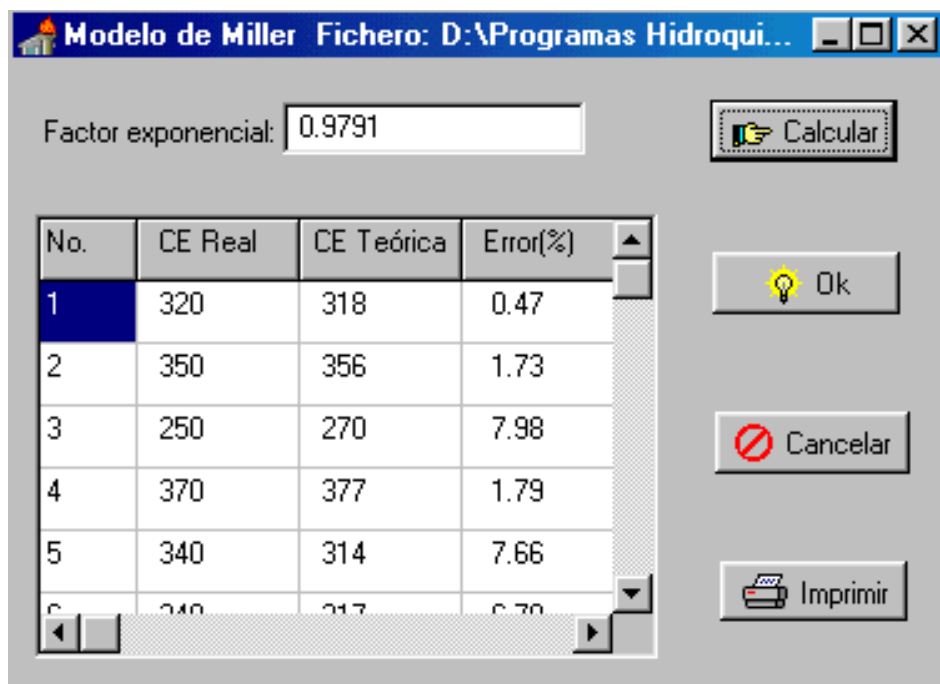


Figura 2. Presentación de los resultados obtenidos en los modelos de conductividad teórica

Relaciones iónicas:

Las relaciones iónicas (Figura 3) permiten definir las propiedades hidrogeológicas de un acuífero y determinar si las mismas están afectadas por elementos ajenos al medio geológico. Este programa permite el cálculo de las relaciones entre cada ion y la suma total de iones, así como otras relaciones iónicas reportadas en la literatura.

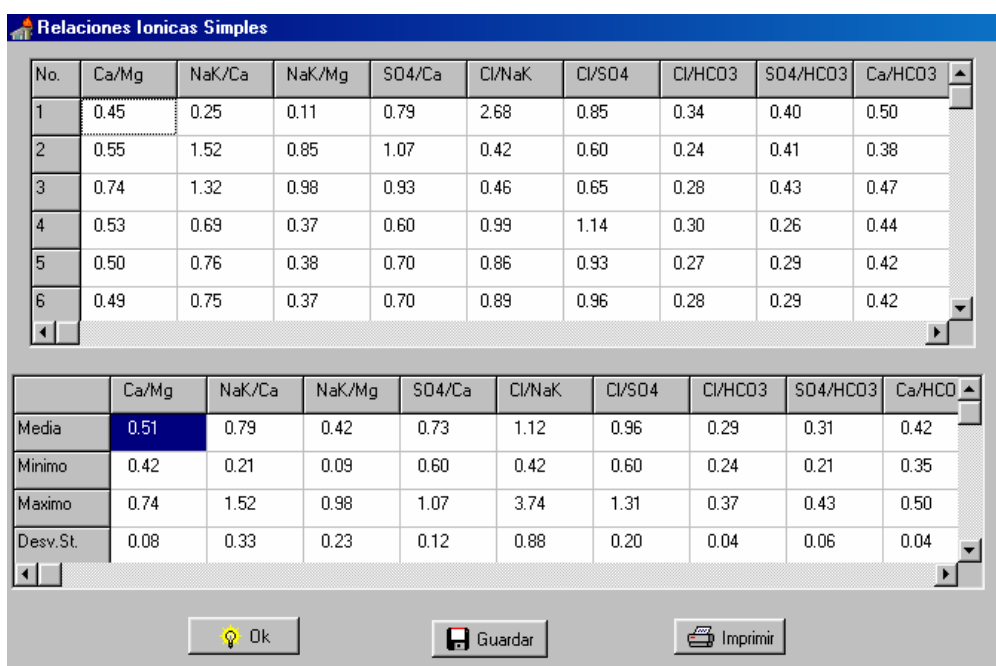


Figura 3. Relaciones iónicas.

Índices químico-físicos:

Relaciones Concentración iónica-Conductividad eléctrica:

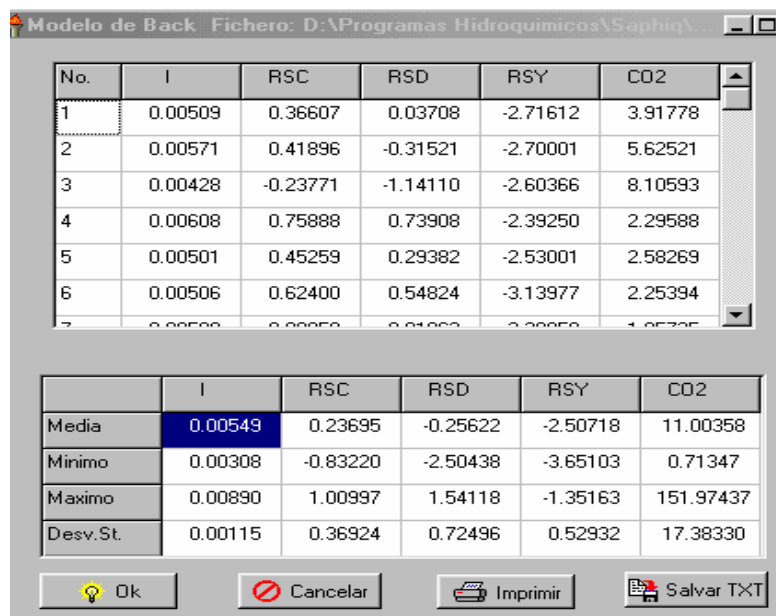
Esta opción permite determinar las relaciones entre la concentración de cada ion y la conductividad eléctrica. Se calculan además las relaciones entre la suma iónica, el TSS y la dureza con la conductividad eléctrica. Estas relaciones pueden utilizarse para caracterizar acuíferos y evaluar la posibilidad de encontrar modelos de correlación para el control de la composición química y la mineralización de las aguas mediante mediciones de conductividad eléctrica.

Modelos de Back y Tillman-Trombe

Permiten determinar en las aguas naturales, la capacidad de un agua de disolución de los minerales calcita, dolomita y yeso, la cantidad de CO₂ disuelto y el pH de saturación.

Modelo de Tillman-Trombe: Se calcula el pH de saturación y el índice de Tillman-Trombe.

Modelo de Back: Se calculan la fuerza iónica y los índices de saturación de la calcita, la dolomita y el yeso (Figura 4).



No.	I	RSC	RSD	RSY	CO2
1	0.00509	0.36607	0.03708	-2.71612	3.91778
2	0.00571	0.41896	-0.31521	-2.70001	5.62521
3	0.00428	-0.23771	-1.14110	-2.60366	8.10593
4	0.00608	0.75888	0.73908	-2.39250	2.29588
5	0.00501	0.45259	0.29382	-2.53001	2.58269
6	0.00506	0.62400	0.54824	-3.13977	2.25394

	I	RSC	RSD	RSY	CO2
Media	0.00549	0.23695	-0.25622	-2.50718	11.00358
Minimo	0.00308	-0.83220	-2.50438	-3.65103	0.71347
Maximo	0.00890	1.00997	1.54118	-1.35163	151.97437
Desv.St.	0.00115	0.36924	0.72496	0.52932	17.38330

Figura 4. Cálculo de los Índices de Saturación respecto a la calcita, la dolomita y el yeso.

Valores de pk a la temperatura del agua:

Se calcula pkB, pk1, pk2, pkC, pkD, pkY, CaHCO₃, MgHCO₃, CaCO₃

Molalidades iónicas:

Se calcula para HCO₃, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, CO₃, H₂CO₃, HSO₄

Coefficientes de actividad:

Se calculan para el Ca, Mg, HCO₃, SO₄, Na, CO₃, CaHCO₃, MgHCO₃, HSO₄, NaSO₄, NaCO₃

Aplicación del HIDROGEOQUIM a la caracterización de flujos de la Sierra del Rosario.

Los datos de análisis de agua utilizados en el trabajo, acorde a las características geológicas (litológicas y estructural) del sitio muestreado y a los tipos de flujos establecidos según el criterio de Tóth (1995), fueron distribuidos en 9 grupos, basados en el procesamiento de los datos por el HIDROGEOQUIM en cuanto a las relaciones iónicas, los índices de saturación respecto a la calcita, (RSC), la dolomita (RSD) y el yeso (RSD) y a la respuesta frente al ciclo hidrológico.

Tabla 1. Indicadores geoquímicos del tipo de flujo y litología: temperatura media anual, potencial redox, oxígeno disuelto, contenidos de sulfhídrico y sílice, sólidos solubles totales (TSS), principales relaciones iónicas.

No	N	T	Eh	O ₂	H ₂ S	SiO ₂	TSS	Ca/ Mg	(Na+K)/ Ca	(Na+K)/ Mg	SO ₄ / Ca	SO ₄ / HCO ₃	Ca/ HCO ₃	Mg/ HCO ₃	(Na+K)/ HCO ₃
1a	5	24.5			0	8.6	134	4.03	0.98	3.38	0.09	0.05	0.55	0.24	0.52
1b	31	22.8			0	14.7	411	3.33	0.65	2.06	0.07	0.04	0.61	0.20	0.38
2	13	23.5	156	8.4	0	18.8	307	0.04	4.63	0.15	0.92	0.03	0.03	0.98	0.14
3a	21	21.7			0	7.4	240	8.11	0.21	1.75	0.05	0.05	0.91	0.14	0.18
3b	14	22.1			0	4.6	365	8.61	0.21	1.47	0.01	0.01	0.82	0.13	0.16
3c	94	22.7			0	4.5	299	7.06	0.23	1.63	0.08	0.07	0.87	0.14	0.19
4a	6	23.1	-174	5.5	0	5.9	424	6.39	0.21	1.32	0.08	0.07	0.86	0.15	0.18
4b	2	23.8	-238	1.6	8.1	12.1	486	5.05	0.63	3.07	0.48	0.40	0.85	0.17	0.53
5a	35	23.4	91.7	5.7	0	5.1	486	11.69	0.24	2.75	0.15	0.14	0.92	0.11	0.21
5b	4	19.2			0	4.1	306	6.45	0.13	0.83	0.13	0.13	0.97	0.15	0.13
6	31	24.5	-228	1.2	10.0	11.3	613	5.49	0.28	1.41	0.11	0.10	0.86	0.18	0.23
7	9	25.6	-327	1.8	106.4	34.6	735	2.70	0.67	1.65	0.26	0.20	0.63	0.28	0.40
8a	1	25.0			0	12.0	345	1.33	9.65	12.87	1.80	0.21	0.12	0.09	1.15
8b	10	27.8	-317	1.2	67.1	26.6	1220	1.05	43.95	10.86	6.71	0.15	0.13	0.12	1.17
9	71	39.5	-300	2.5	24.8	22.0	2280	5.57	0.24	1.31	1.17	7.52	6.22	1.13	1.44

Tabla 2. Índices con respecto a la calcita (RSC), la dolomita (RSD). Flujos de diferente naturaleza hidrogeológica en la Sierra del Rosario

Grupo	RSC	RSD
1	0.49197	0.14375
1	0.35102	-0.57688
2	0.87846	1.54118
2	0.74016	1.30861
3	0.72675	0.56343
3	-0.58043	-1.83259
4	-0.8322	-2.24776
4	0.0898	-0.45543
5	0.49697	0.03345
5	1.09769	1.72223
6	0.52072	0.27808
6	0.55417	0.45828
7	0.8932	1.41013
7	0.46763	1.01758
8	1.54703	2.95403
8	1.28776	2.50259
9	1.01484	1.50969
9	0.93008	1.48614

Del procesamiento de datos por el HIDROGEOQUIM, y por otros software obtenidos, con los criterios analizados, se obtuvieron los siguientes grupos de aguas por tipos de flujos:

1a) manantiales y pozos alimentados por flujos locales (areniscas de la Fm. Manacas), 1b) manantiales de flujos intermedios (areniscas de la Fm. Manacas) (Figura 5). Estas aguas se caracterizan por presentar baja temperatura, baja cantidad de minerales disueltos (TSS). Los flujos locales se encuentran subsaturados con respecto a la calcita y la dolomita mientras los flujos intermedios tienden a la saturación con respecto a ambos minerales (Tabla 2). Con relación al yeso ambos flujos se encuentran insaturados.

2) fuentes de flujos locales e intermedios (rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica) Estas aguas se distinguen por presentar temperaturas frías, y moderado SST. El ambiente en que emergen es oxidante (Eh y O₂ disuelto). En el transcurso de su recorrido, estas aguas alcanzan el equilibrio químico con respecto a la serpentinita (expresada en términos de dolomita), pero no con respecto a la calcita y al yeso dada la poca disponibilidad de estos minerales en el terreno.

3a) aguas de infiltración en las cuevas (calizas de la Fm. Guajaibón), 3b) manantiales alimentados por flujos locales (calizas de la Fm. Guajaibón), 3c) surgencias y resurgencias kársticas-flujos intermedios (calizas de la Fm. Guajaibón). En el primer subgrupo las aguas tienden a presentarse más veces cercanas al equilibrio químico con respecto a la calcita y la dolomita que en el segundo subgrupo (Tabla 2). Con respecto al yeso todas se encuentran insaturadas. La respuesta a la acción de las lluvias sobre los macizos kársticos, tanto de los caudales como de los contenidos iónicos de las aguas en las emergencias, es relativamente rápida al igual que su recuperación.

4a) surgencias kársticas - flujos intermedios (calizas de la Fm. Sierra Azul), 4b) surgencia que drenan calizas de la Fm. Sierra Azul y calcarenitas de la Fm. Cacarajícara. Las aguas más someras son de temperatura fría y moderada concentración de iones disueltos y tal como se aprecia en la tabla 1, tienen potenciales redox negativos. Los parámetros químico-físicos de las aguas más profundas que interactúan con los sedimentos de la Fm. Cacarajícara (flujos intermedios) son superiores a las de los flujos locales (Tabla 1). Constituyen un grupo homogéneo con relaciones iónicas del mismo orden de la Fm. Guajaibón (Tabla 1). Se distinguen de las anteriores por presentar un relativamente alto contenido de CO₂ y un pH más bajo. El comportamiento de los valores de RSC, RSD y RSY es similar al del subgrupo de las emergencias kársticos de la Fm. Guajaibón.

5a) manantiales kársticos - flujos locales e intermedios (calizas de la Fm. Artemisa), 5b) surgencias kársticas – flujos intermedios (calizas de la Fm. Artemisa). Estas aguas tienen temperaturas frías y moderadas concentraciones de iones disueltos. El Eh de estas aguas varía y poseen relativamente altos contenidos de O₂ disuelto. Por lo general las aguas procedentes de manantiales (subgrupo a) tienden a alcanzar el equilibrio químico con respecto a la calcita y la dolomita, mientras que las que emergen a través de grandes conductos (surgencias y resurgencias) suelen encontrarse sobresaturadas con respecto a dichos minerales (Tabla 2). Este comportamiento diferente está relacionado con la mayor facilidad al escape del CO₂ disuelto en el agua en el segundo caso. Con relación al yeso todas las aguas se encuentran insaturadas.

6) manantiales alimentados por flujos intermedios procedentes de un drenaje más profundo (calizas de la Fm. Artemisa). Las temperaturas de estas aguas son ocasionalmente más elevadas que las restantes aguas estudiadas así como valores relativamente más altos de TSS que las anteriores. Estas aguas presentan potenciales redox negativos, bajos contenidos de O₂ disuelto y relativamente altos contenidos de H₂S disuelto. Este grupo es parecido en sus relaciones iónicas y tipo hidroquímico a las aguas del grupo 5, salvo que la magnitud de Ca/Mg (Tabla 1) es ligeramente menor (indicativo de una mayor presencia o disolución de dolomita). Se diferencia de dicho grupo por presentar un mayor contenido de cloruro, del total de iones disueltos (TSS), así como por la presencia de H₂S. Estas características indican un mayor y más profundo recorrido subterráneo de estas aguas hasta su emergencia. Tienden a alcanzar el equilibrio con respecto a la calcita y la dolomita (Tabla 2), pero se encuentran insaturadas con respecto al yeso.

7) manantiales y pozos procedentes de un drenaje más profundo (calizas, areniscas y rocas ultrabásicas). Estas aguas presentan temperaturas moderadamente calientes y generalmente altos contenidos de H₂S disuelto. Los valores de TSS son también relativamente altos. Estas aguas exhiben altos potenciales redox negativos y bajos contenidos de O₂ disuelto. Sus cationes más relevantes son Ca²⁺, Na⁺ y Mg²⁺ en proporciones dependientes del aporte diferenciado de las areniscas, las calizas y las serpentinitas respectivamente. En las emergencias tienden a encontrarse saturadas con respecto a la calcita y la dolomita (Tabla 2) e insaturadas con relación al yeso.

8a) pozo alimentado por flujos intermedios (areniscas de la Fm. San Cayetano), 8b) manantiales y pozos alimentados por flujos intermedios (areniscas de la formaciones Manacas o San Cayetano). Estas aguas poseen relativamente altas temperaturas y altas concentraciones de H₂S. Presentan muy altos valores negativos de potenciales redox y bajos contenidos de O₂ disuelto. Al igual que en el caso anterior, las aguas tienden a la saturación con respecto a la calcita y la dolomita (Tabla 2) y a la insaturación con relación al yeso, lo cual es indicativo de un efecto poco acentuado del ciclo hidrológico sobre las mismas.

9) manantiales y pozos alimentados por flujos intermedios y regionales (drenaje por calizas de la Fm. Artemisa y contactos con capas confinantes de areniscas de la Fm. San Cayetano y rocas ultrabásicas). Las aguas poseen relativamente altas temperaturas, el contenido de gases disueltos es relativamente alto (H_2S). Los contenidos de SO_4^{2-} (relación con el HCO_3) y SST disueltos son los mayores encontrados. El valor de Eh es altamente negativo y el O_2 disuelto es bajo. Este grupo es bastante homogéneo, lo cual se aprecia en la poca variación de sus relaciones iónicas (Tabla 1). En su recorrido alcanzan grandes profundidades, lo cual se evidencia por las relativamente altas temperaturas, así como los elevados contenidos de cloruro, sulfato, magnesio, sodio y potasio. Por lo general se encuentran saturadas con respecto a la calcita y la dolomita (Tabla 2) y muy cerca de la saturación con respecto al yeso.

A partir de los índices de saturación obtenidos en HIDROGEOQUIM, se pueden obtener gráficos en función del TSS (Figura 5) y junto con otras características físico-químicas, agruparlos por tipo de flujo: local, intermedio o regional, como se observa en el ejemplo del grupo 1 en la Figura 5.

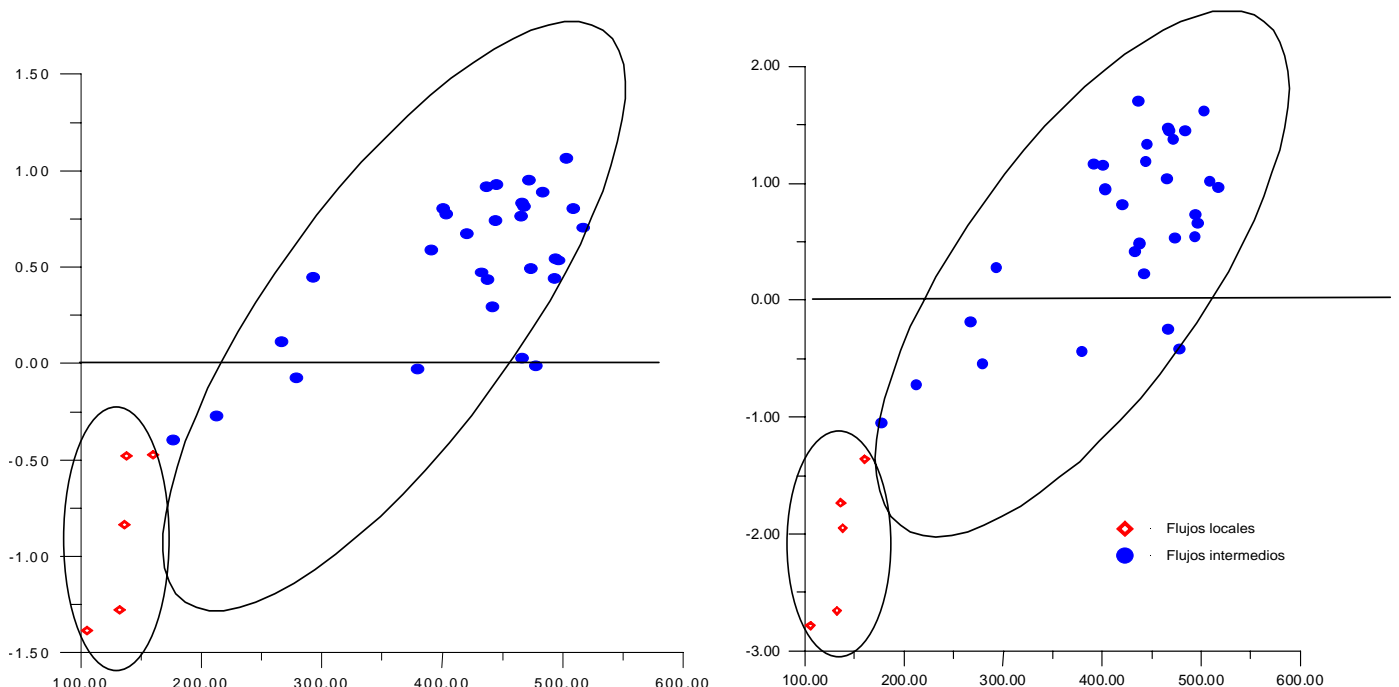


Figura 5. Valores de RSC y RSD en función del TDS. Flujos locales e intermedios que drenan esquistos y areniscas de la Fm. Manacas (Grupo 1).

Conclusiones

Sobre la base de los principios que rigen el proceso de adquisición de la composición química de las aguas naturales, se diseñó e implementó un sistema automatizado (HIDROGEOQUIM) para caracterizar, desde el punto de vista hidrogeoquímico, las aguas subterráneas y superficiales que drenan los que acuíferos y discurren por cuencas hidrográficas respectivamente. Este programa, en conjunto con otros, permite la obtención de diferentes parámetros químico-físicos que han permitido la agrupación de las aguas más significativas de la Sierra del Rosario. Se obtuvieron 9 grupos, a partir de sus características físico químicas más generales, y los índices de saturación respecto a la calcita y a la dolomita fundamentalmente (la generalidad de las aguas se encuentran insaturadas con respecto al yeso) y a la distribución de los mismos contra la mineralización para establecer los tipos de flujo en las aguas de la región de la Sierra del Rosario.

Bibliografía

- Alvarez E., I. Vinardell, J.R Fagundo., E. Reguera y M.E. Cardoso (1990 a). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. II- Sistema Automatizado para el Monitoreo de las Aguas. Voluntad Hidráulica, 83: 15-25.
- Alvarez E., I. Vinardell , J.R Fagundo, J. Vega y E. Reguera (1990 b) Sistema automatizado de tratamiento de datos hidroquímicos para el chequeo de la calidad de las aguas. Estudios Geológicos (Madrid), 45 (5-6): 409-414
- Alvarez E. y , J.R Fagundo (1991). SAPHIQ, un sistema para el procesamiento automatizado de datos hidroquímicos. Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol 22 (1): 59-65.
- Alvarez, E, J.R. Fagundo e I. Vinardell. (1997). Diseño de software para la caracterización de acuíferos y otros cuerpos de agua. Memorias del III Taller de la Cátedra de Medio Ambiente. La Habana, 1997. 5 Págs.
- Alvarez, E, J.R. Fagundo e I. Vinardell. (1999). Control automatizado de la calidad de las aguas y sus variables químico-físicas. Revista CNIC Ciencias Químicas, 30 (1): 21-27.

Fagundo, J.R. (1990). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. Efecto de los factores geológicos, hidrogeológicos y ambientales. *Hidrogeología (Granada)*, 5: 33-46.

Fagundo J.R., E. Alvarez, I. Vinardell y J. Vega (1992). Control automatizado de la calidad de las aguas. *Proceeding. del XXIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. C. Habana 1992, Parte I: 98-103.*

Fagundo, J.R., J.E. Rodríguez, J.M. Pajón, E. Franco, G. Benítez, A.C. Rodríguez, J. Guéron e I. Abelló, (1993). Caracterización hidroquímica de las aguas del Pan de Guajaibón y otras áreas cársticas cercanas a la Sierra del Rosario. *Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas 1992*). Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 43-53, 1993.

Fagundo, J. R., J. Rodríguez, G. Benítez, W. Morera, C. Fernández y J. Vega (1993). Caracterización Hidroquímica y control de la calidad de las aguas del curso de la cuenca Zapata. *Libro de Comunicaciones. Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 73-81.*

Fagundo, J. R., J.E. Rodríguez, J. de la Torre, J.A. Arencibia, P. Forti (1994). Hydrologic and hydrochemical characterization of the Punta Alegre Gypsum Karst Massif, Cuba. *Newsletter of Geology, Climate and Karst Formation, Guilin (China)*, 95-106.

Fagundo J.R., V. Ferrera, E. Alvarez, I. Vinardell, A. Torres y J. Alvarez (1995). Control automatizado de la calidad de las aguas mediante patrones hidrogeoquímico y mediciones de conductividad eléctrica en el ejemplo de la cuenca del Cauto. *Proceeding del II Congreso de AIDIS de Norteamérica y el Caribe y IV Congreso de la Asociación de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Santiago de Cuba 1995. Tomo I, 106-114.*

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

Fagundo, J.R., M. Suárez, P. González, J. Fagundo-Sierra, C. Melián. Aplicaciones de la Química – Física en la Hidrogeología. En: Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, Vol. 4, IX Taller. ISCTN (2003), 351-362. ISBN 959-7136-20-1 (en soporte electrónico), 2003.

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

Franco, E., J.R. Fagundo, J.M. Pajón. Resultados de los estudios hidroquímicos realizados en el Pan de Guajaibón en el período Enero 28 a Febrero 17 de 1986. *Revista Ciencias de la Tierra*, 11, 17 Pags., 1987.

González, P., J.R. Fagundo, G. Benítez, S. Jiménez, V. Ferrera, A. González, E. Romero, D. Orihuela, J. Ramírez, M. Suárez (1999). “Metodología para la caracterización geoquímica de los acuíferos cársicos costeros. I. Muestreo sistemático y caracterización de facies hidroquímicas. En: “Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. Ed. ISCTN (CITMA), 173-181.

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

González, P., M. Llerena, M. Suárez, J.R. Fagundo, C. Melián, B. Luna, I. Herrera. “Sectorización de las aguas naturales y mineromedicinales de las montañas de la Sierra del Rosario y las Alturas del Mariel”. En: *Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente*, ISCTN. La Habana. ISBN 959-7136-13-9, 2001 (en soporte electrónico), 2001.

González, P., B. Peña, J. R. Fagundo, F. R. Delgado, M. Suárez, C. Melián. Aguas mineromedicinales en el occidente de Cuba. En: *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*, 2002. ISBN 959-7136-13-9 (en soporte electrónico), 2002.

Gutiérrez, R. y M. R. Glean (1999). “Regiones Naturales de la Isla de Cuba”. Ed. Científico Técnica. Ciudad de la Habana, 145 Págs.

Melián, C., F.R. Segarte, M. Pérez-Loyola, M. Suárez, P. González, J. R. Fagundo, G. Benítez (2001). Caracterización de aguas minerales de algunos yacimientos del país. IV Congreso de Geología y Minería, Ingeniería Geológica e Hidrogeología, Memorias GEOMIN 2001, ISBN 959-7117-10-X, 9 Págs.

Peláez, R, M. Olivares, M. del C. Núñez, y M. Valdivia. Informe sobre la búsqueda detallada y exploración orientativa de las aguas minero-medicinales San Diego Bermejales. Ministerio de la Industria Básica, Centro Nacional del Fondo Geológico, La Habana, Cuba. 159 Págs., 1990.

Pulina, M. y J.R. Fagundo (ed.). The Dynamic of the Contemporary Karstic Processes in the Tropical Area of Cuba. Preliminary report of the field investigations performed by the Guajaibón'84 Expedition in the winter season, 1984. Univ. Slaski, Sosnowiec (Polonia), 42 Págs., 1984.

Tillán, G., I. Vinardell, J.R. Fagundo, V. Ferrera, P. González y L. Sánchez (1996). SACAN: Sistema Automatizado para la Caracterización de Aguas Minerales. En: "Contribuciones a la hidrogeología y medio ambiente en Cuba". Eds.: J.R. Fagundo Castillo. D. Pérez Franco, A. Álvarez Nodarse, J.M. García e I. Morell, Universidad de Castellón (España), 113-121.

Tóth, J., Groundwater as a geological agent. An overview of the causes, processes and manifestations. Hydrogeology Journal 7, 1-14, 1995.