

VII CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERIA HIDRAULICA
MODELOS HIDROGEOQUIMICOS HERRAMIENTA PARA LA GESTION Y USO
EFICIENTE DEL AGUA

Autores: Ing. Tamara Leonarte Pérez¹; Doctor Juan Reynerio Fagundo Castillo²

Institución: 1- Empresa Integral de Recursos Hidráulicos.

2- Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional

Ciudad: Nueva Gerona. Isla de la Juventud.

País: Cuba

Teléfono: 32 43 27 y 32 40 40 ext-113

Fax: 32 44 28 **E-mail:** tamara@aguasij.co.cu y director@aguasij.co.cu

RESUMEN

Se realiza un estudio de la evolución en el tiempo de la calidad de varias fuentes subterráneas (pozos) de los acuíferos de Gerona y la Fe, con vistas a evaluar los procesos hidrogeoquímicos que condicionan la solubilización de las sales presentes en las rocas por donde circulan estas aguas, mediante la aplicación de software específicos basados en modelos hidrogeoquímicos. Varios de los pozos que se estudian exhiben resultados críticos a través de las series cronológicas que indican la presencia del fenómeno de intrusión marina.

El paquete de programas está constituido por los códigos HIDROGEOQUIM, GEOQUIM, MODELAGUA y SAMA, implementados sobre Windows. Los mismos se complementan entre sí y se basan en modelos estadísticos, químico - físicos, de balance de masas y mezcla de agua.

Considerando la alta repercusión social que reviste el fenómeno de la sequía y el deterioro por intrusión marina que sufren varias fuentes de la cuenca hidrogeológica Gerona, los resultados del trabajo permitirán un manejo y control más inteligente del recurso agua, teniendo en cuenta que el Municipio Especial Isla de la Juventud es una isla y una vez agotadas sus reservas su recuperación es irreversible.

Los software y la metodología empleada pueden ser introducidos en otras áreas del país con características similares, con el objetivo de mejorar el sistema de gestión y monitoreo automatizado de la calidad del agua.

PALABRAS CLAVES: intrusión marina, procesos hidrogeoquímicos, calidad del agua.

INTRODUCCIÓN:

La disponibilidad de un agua con calidad es una condición indispensable para la propia vida, y más que cualquier otro factor, la calidad del agua condiciona la calidad de vida. De ahí podemos deducir que aquellos que son responsables por el abastecimiento de agua son en realidad los responsables por la vida que la población lleva.

Las aguas subterráneas suelen ser más difíciles de contaminar que las superficiales, pero cuando esta contaminación se produce, esta es más difícil de eliminar. Sucede esto porque las aguas del subsuelo tienen un ritmo de renovación muy lento. Se calcula que mientras el tiempo de permanencia medio del agua en los ríos es de días, en un acuífero es de cientos de años, lo que hace muy difícil su purificación. Un proceso preocupante es el de entrada de agua salada en los acuíferos cuando estos son sobreexplotados, en acuíferos cercanos a la costa. Estos acuíferos limitan con aguas subterráneas salinas, situadas bajo el mar, y cuando se retira demasiada agua dulce de ellos, la interfaz se desplaza, penetrando el agua salina en zonas en las que sólo había agua dulce hasta entonces. Cuando pasa esto no sólo se ve amenazado el suministro de agua para las poblaciones y el regadío, sino que también se producen daños en los ecosistemas que dependían de la descarga de aguas de estos acuíferos.

Las principales características de la intrusión marina en los acuíferos costeros pueden resumirse de la manera siguiente: se produce en acuíferos costeros abiertos e islas oceánicas; se presenta en cualquier tipo de acuífero, la frontera entre las aguas dulces del acuífero y las aguas saladas provenientes del mar, es la interfaz; la descarga del acuífero se produce sobre la interfaz.

En presencia de dos líquidos miscibles en contacto, tales como el agua dulce y el agua salada, no existe una interfaz brusca sino que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla, también llamada zona de transición que refleja con intensidad variable las propiedades químicas e hidráulicas de cada uno de los líquidos originales.

El peso específico del agua marina es mayor que el del agua dulce, así mismo, la viscosidad del agua marina es del orden de un 30 % mayor que la del agua dulce a igual temperatura. El movimiento del agua en la zona de mezcla y su posición es inducido por el movimiento del agua dulce, a semejanza de lo que sucede con la interfaz. El movimiento en las proximidades de la interfaz es tanto más rápido cuanto más próximo es este al área de afloramiento (en las proximidades del pie de la cuña el arrastre es menor). Este fenómeno sucede de forma similar en estuarios y desembocaduras de los ríos, con la diferencia de que los caudales por unidad de longitud de costa son mucho mayores, y la influencia de cambio de posición del plano de agua dulce o salada son muy sensibles. Algo similar sucede cuando se trata de descarga de agua subterránea al mar a través de grietas o cavernas.

En el Municipio Especial Isla de la Juventud se han venido realizando varios estudios sobre las aguas para consumo humano, debido a que las mismas provienen en un 100% de fuentes subterráneas. Para este estudio han sido seleccionadas varias fuentes teniendo en cuenta la variabilidad de sus características hidroquímicas en la cuenca Gerona y fuentes subterráneas de la cuenca La Fé, por no poseer diferencias significativas, sirviendo como cuenca de referencia. Se encuentran con frecuencia pozos de la Cuenca Gerona con contenidos de ion cloruro que sobrepasan la Norma Cubana, 93-02 de 1985 "AGUA POTABLE. Requisitos Sanitarios y Muestreo" y que con frecuencia exhiben patrones hidrogeoquímicos que muestran la presencia de intrusión marina, de modo que con el presente estudio se pretende realizar una valoración cuantitativa y cualitativa de la calidad de varias fuentes de los acuíferos de: Gerona y La Fé.

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar desde el punto de vista hidrogeoquímico, mediante un sistema de programas, las principales fuentes de las cuencas hidrogeológicas:

Gerona y La Fé con vistas a la toma de decisiones para el mejor manejo y control del recurso agua y una entrega a la población con la calidad requerida. Los objetivos específicos: analizar los fenómenos que afectan las características físico-químicas de las aguas objeto de estudio; estudiar el comportamiento de los parámetros de contaminación para el período de explotación de las fuentes de interés; contribuir al conocimiento de la situación actual de la calidad hidroquímica de dichas fuentes; aplicar los software HIDROQEOQUIM, GEOQUIM, MODELAGUA y SAMA por parte de los especialistas de la Empresa Integral de Recursos Hidráulicos de la Isla de la Juventud para un uso más eficiente del recurso agua.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.



La Isla de la Juventud (Fig. 1) pertenece al Archipiélago de los Canarreos, limita al norte con aguas del Golfo de Batabanó en la provincia de La Habana, al este con aguas de la plataforma insular de la provincia de Matanzas, al sur con el Mar Caribe y oeste con aguas de la plataforma insular de la provincia de Pinar del Río. El territorio, ocupa un área de 2419km² y cuenta con una superficie poblacional de 59 km² y agrícola de 677 km². La superficie acuosa posee 1309 km².

Figura 1. Mapa de la Isla de la Juventud donde aparece la ubicación de los poblados de Gerona y La Fé.

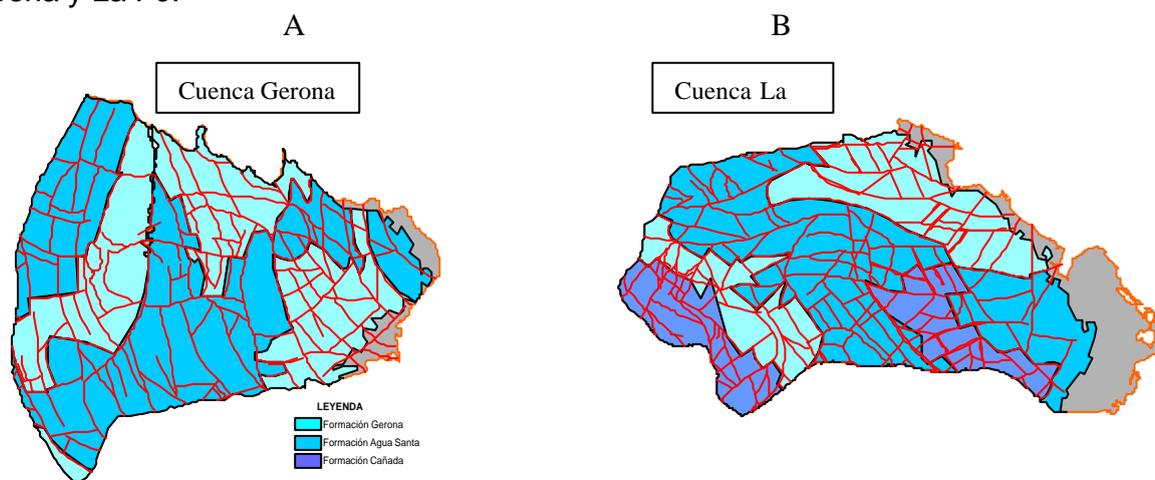
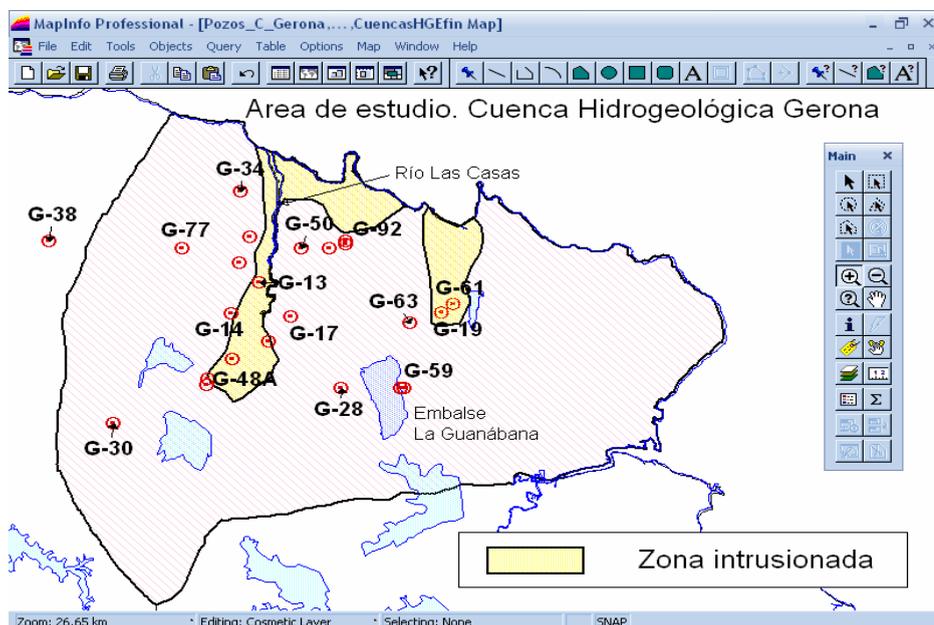


Figura 2. Mapa geológico de las cuencas hidrogeológicas de La Fé (a) y Gerona (b)

A pesar que el estudio esta basado en la comparación de las dos cuencas principales Gerona y La Fe, en ambas aparecen formaciones comunes sin diferencia alguna en cuanto a la disponibilidad especial de sus estratos y contenidos (Fig. 2). En el área aparecen las siguientes secuencias estratigráficas por orden de formación: Fm. Cañada, de edad Jurásico inferior hasta el Jurásico medio ($J_1 - J_2^{cl}$); 1). Fm. Agua Santa que va desde el Jurásico medio hasta el Jurásico superior. ($J_2^{cl} - J_3^{ox}$) y Fm. Gerona que va desde el Jurásico superior hasta el Cretácico ($J_3^{ox} - K$). 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 que erosionados.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Las fuentes estudiadas corresponden a pozos pertenecientes a la red de observación de Calidad de las Aguas del INRH del Municipio Especial Isla de la Juventud. Las mismas fueron seleccionadas atendiendo a los tipos de litología presentes y grado de salinización: 10 fuentes de la Cuenca Gerona que abastecen a la capital del territorio con el mismo nombre, 7 de ellas con altos niveles de contenidos de ion cloruro (G-13, G-19, G-48A, G-61, G-102, G-127 y G-130), y 3 fuentes con agua de buena calidad, que también son muy importantes para el abasto a esta ciudad (G-17, G-50 y G-59). Las fuentes más salinizadas se encuentran ubicadas en la línea de costa o ribera del río Las Casas, que es la zona más industrializada y por ende, donde mayor demanda de agua existe. En la Cuenca La Fé se seleccionaron 2 fuentes (F-20 y F-99) con vistas a realizar una comparación cualitativa y cuantitativa de la calidad de las aguas en una misma cuenca y entre las dos cuencas mencionadas.



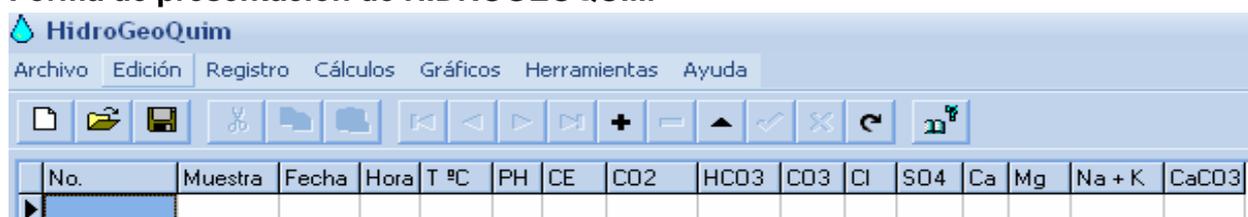
El área de estudio constituye una cuenca abierta con comunicación directa al mar y penetrada por el Río Las Casas con una extensión de 10 km. y con un grado de salinidad en su parte más extrema de 5 g/l de TSS. En la figura 2 se muestran las fuentes de la cuenca hidrogeológica Gerona

Figura 3. Distribución de los pozos que abastecen la ciudad de Gerona.

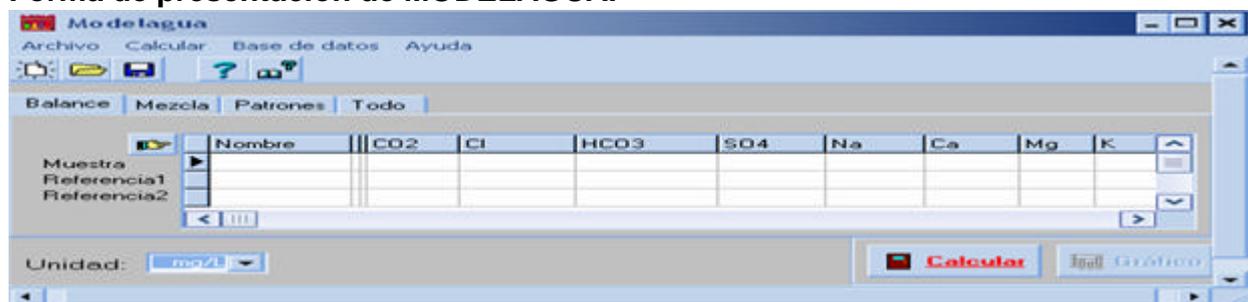
La distribución espacial de los datos correspondientes a la los pozos de cuneca hidrogeológica Gerona fue realizda mediante el empleo de MAPINFOW versión 6.5(Fig. 3).

Las muestras, tomadas en períodos seco y húmedo respectivamente, fueron mediante las técnicas descritas en la 13 edición del Standard Methods (APHA, AWWA, WPCF, 1992). Los resultados de los análisis se almacenan en una base de datos denominada PRODAT que ha sido formulada en Microsoft ACCESS. Luego se crean ficheros con extensión: txt, excel y dbf para utilizar los software HIDROGEOQUIM (que comprende un paquete de subsistemas complementados entre sí), MODELAGUA, SAMA y GEOQUIM.

Forma de presentación de HIDROGEOQUIM



Forma de presentación de MODELAGUA.



Forma de presentación de GEOQUIM



Forma de presentación de SAMA



Mediante HIDROGEOQUIM, se determinaron las propiedades químico-físicas de las aguas, se clasificaron y determinaron los tipos de agua y se estudió la variación temporal de diferentes variables, lo cual permitió la caracterización de las aguas subterráneas, afectadas o no por la acción del hombre o la intrusión marina. Para la clasificación de las aguas se utilizó el método de Shchoukarev, el cual toma como criterio de clasificación los iones que se encuentran en un porcentaje superior al 25% del total de miliequivalentes de aniones o de cationes (Fagundo, 1996).

Los procesos geoquímicos que originan la composición química del agua, fueron determinados mediante MODELAGUA (Fagundo-Sierra et al, 2001), sistema informático basado en modelos de balance de masas y análisis de mezcla. Este código fue también utilizado para la obtención de los diagramas de Stiff y la determinación de patrones hidrogeoquímicos

GEOQUIM fue utilizado para determinar la correlación de los diferentes indicadores geoquímicos y de calidad de las aguas, el cálculo de la matriz de correlación de todos los datos, la frecuencia de distribución de los mismos y la determinación de las series cronológicas cloruro.

Mediante el sistema SAMA (Alvarez et al, 1990), se determinaron las ecuaciones de dependencia matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica según un modelo de regresión polinómica, de 1^{ro} y 2^{do} grados que pasa por el origen de coordenadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición química espacial de las aguas

En la tabla 1 se presentan los valores medios de los principales indicadores geoquímicos utilizados para la caracterización de las fuentes de abasto de las cuencas hidrogeológicas de Gerona y La Fé respectivamente (temperatura, pH, conductividad eléctrica, contenido de CO₂, composición iónica, dureza y total de sólidos disueltos).

Como puede apreciarse en la tabla 1, los pozos G-13, G-19, G-48A, G-61, G-102, G-127, G-130, poseen una concentración del ion cloruro mucho mayor que la reportada para los pozos G-17, G-50 y G-59, indicando de esta forma que esta Cuenca exhibe un comportamiento muy variable en la calidad de sus aguas. Los pozos que presentan una situación más crítica son G-13, G-48 A, G-102 y G-127, cuyos valores medios de cloruro sobrepasan la Norma Cubana Agua Potable (NC 93-02:1985). Esta norma plantea que la concentración máxima admisible (**CMA**) para que pueda ser consumida el agua es de **250 m g/l** para el ion cloruro y de **1000 mg/l Total de Sales Solubles (TSS)**. En la columna de TSS (Total de Sales Solubles) de la tabla 1, se aprecia como sólo dos de las siete primeras fuentes de Gerona sobrepasan los valores de este parámetro y aún, cuando para el resto de las fuentes el TSS no presenta un valor significativo, sus contenidos de cloruro indican el alto grado de salinidad alcanzado. El resto de las aguas presentan excelente calidad debido a su baja mineralización y contenido de cloruro.

En la tabla 1 también se presentan los valores medios en mg/l obtenidos para los macroconstituyentes de dos fuentes representativas (F-20 y F-99) de la cuenca hidrogeológica La Fé. En ella puede apreciarse la buena calidad que presentan estas aguas al mostrar baja mineralización y contenido de cloruro.

Para una mejor demostración del comportamiento del ion cloruro en el tiempo se procesaron por GEOQUIM los datos seleccionados para las fuentes: G-48A, G-102 y G-59, con gastos de instalación de: 45 l/s, 10 l/s y 25 l/s respectivamente, lo cual implica la alta repercusión social de las mismas para el abasto a la población del poblado de Gerona.

La figura 4 (b) muestra las variaciones sistemáticas que ha sufrido el ion cloruro en la fuente G-102, indicando una fluctuación en el tiempo donde alcanzó su valor mas alto de 20 meq/l, en la década del 90, que significa 888 mg/l, lo cual triplica el valor de CMA reportado por norma de referencia.

La figura 4 (c) presenta la variación del ion cloruro a través del tiempo para la fuente G-59. En ella se evidencia la calidad de esta agua, ya que de acuerdo a los valores reportados el valor máximo en meq/l está muy por debajo de los que se mostraron para los pozos G-48 A y G-102. El G-59 es un pozo ubicado en las cercanías del Embalse La Guanábana, el que le sirve de recarga natural, de ahí su calidad. Al igual que esta fuente, existen otras en la cuenca hidrogeológica Gerona con características hidroquímicas similares.

Por último, en la figura 4 (d), se muestra el comportamiento en el tiempo del ion cloruro para la fuente F-20. Se observa en el eje de las y, los bajos valores encontrados, alcanzando un máximo con 1.393 meq/l, lo cual equivale a 47 mg/l. de manera similar se comportan las restantes aguas de la cuenca hidrogeológica la fé, demostrando con ello buena calidad hidroquímica sin contener intrusión marina en ninguna de sus fuentes de abasto a la población.

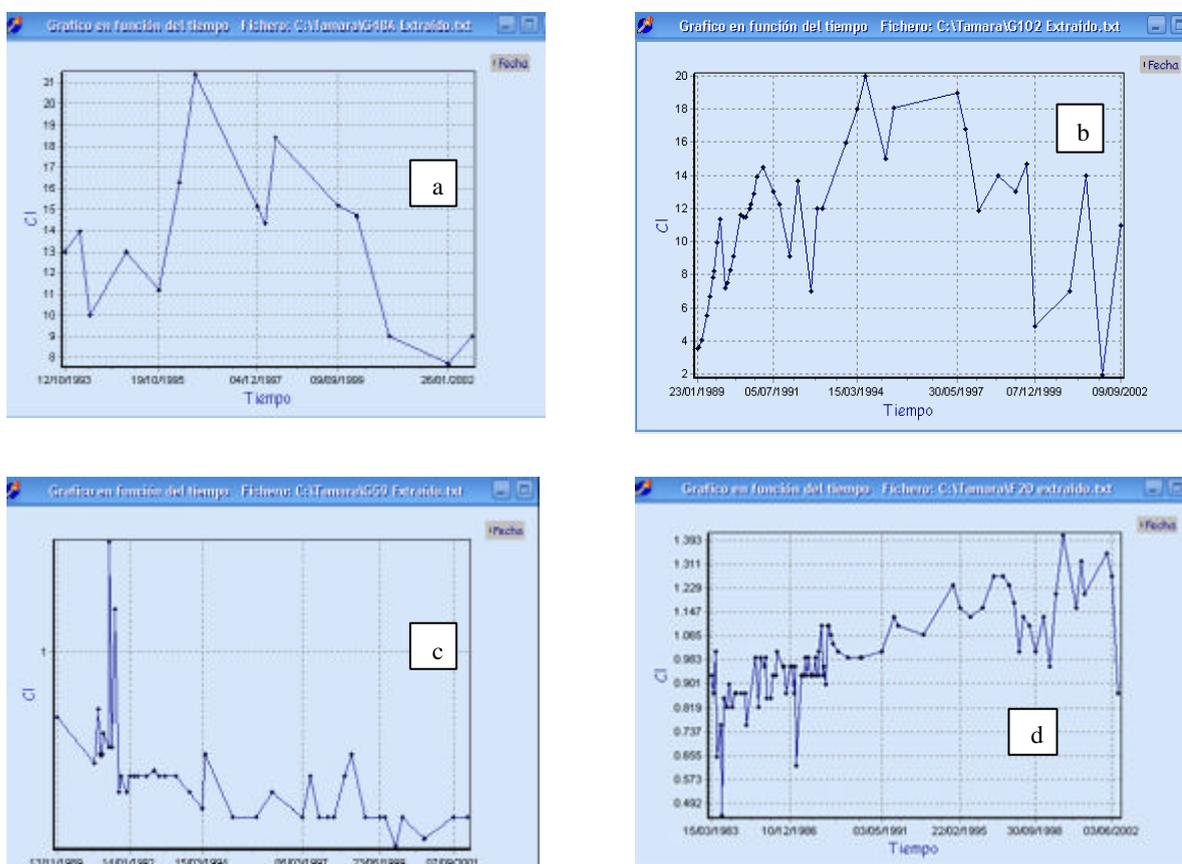


Figura 4. Variación temporal del ion Cl⁻ en los pozos: G-48 A (a), G-102 (b) y G-59 (c), de la cuenca Gerona y en el pozo F-20 (d) de la cuenca La Fé

Tabla 1. Composición química de algunas fuentes de las cuencas hidrogeológicas Gerona y La Fé. Valores medios en mg/l.

Cuenca Gerona															
N o	Pozo	N	T	pH	CE	CO ₂	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	CaCO ₃	TSS
1	G-13	72	25	6.99	1340	40.8	228.2	269.2	32.7	9.4	17.1	122.5	2.5	95	685
2	G-19	90	25	7.01	1009	29.1	145.3	209.6	28.1	60.0	15.1	103.4	2	213	564
3	G-48A	15	25	7.13	1877	18.4	170.0	478.1	57.0	116.7	31.8	203.1	4.1	422	1061
4	G-61	23	25	7.17	1089	15.4	141.8	248.0	34.0	69.5	18.9	112.7	2.3	251	627
5	G-102	44	25	7.01	1670	30.5	192.8	392.6	51.0	145.7	16.0	210.3	4.3	430	1013
6	G-127	19	25	7.28	1245	15.2	205.1	285.8	37.0	110.3	21.6	114.6	2.3	364	772
7	G-130	7	25	7.00	885	55.1	203.2	234.5	26.8	107.3	17.4	83.8	1.7	339	675
8	G-17	31	25	6.95	288	26.4	129.3	15.3	6.4	38.5	4.3	8.9	0.0	114	203
9	G-50	93	25	6.82	540	60.2	169.0	60.1	13.4	69.0	6.3	19.4	0.4	198	337
10	G-59	43	25	6.87	224	24.0	81.2	19.3	3.1	26.7	3.5	9.5	0.2	81	149
Cuenca La Fé															
N o	Pozo	N	T	pH	CE	CO ₂	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	CaCO ₃	TSS
1	F-20	85	25	6.59	510	193.9	185.7	35.2	39.1	68.9	5.1	21.3	0.4	193	356
2	F-99	13	25	6.51	239	31.6	57.8	21.8	12.2	21.5	3.6	12.9	0.3	68	130

Porcentaje de mezcla, patrones hidrogeoquímicos y tipos de agua

En la tabla 2 también se muestra el porcentaje de mezcla con agua de mar de esta agua. En general, El valor medio de este indicador varía entre 0.0 (pozos: G-17, G-28, G-59, F-20 y F-99) y 2.1 % (pozo G-48A).

El análisis anterior refleja los diferentes comportamientos de fuentes subterráneas que pueden aparecer dentro de una misma cuenca, cuando se producen cambios de tipo cuantitativo y cualitativo, lo cual indica que existen diferentes tipos de agua y estas variaciones de la composición química pueden ser caracterizadas por patrones hidrogeoquímicos que consisten en las relaciones estequiométricas del tipo:

$Na^+ + K : Ca^{2+} : Mg^{2+} : Cl^- : SO_4^{2-}$ (Fagundo, 1998), donde la facie hidroquímica predominante depende fundamentalmente de la litología, las condiciones de circulación hídrica, así como de factores de tipo ambiental. Estos patrones se pudieron

representar mediante los diagramas de Stiff, obteniéndose los siguientes resultados por MODELAGUA. Se seleccionaron para la cuenca Gerona las fuentes G-48 A, G-102 y G-59, y la para la cuenca La Fé la fuente F-20 (Fig. 5).

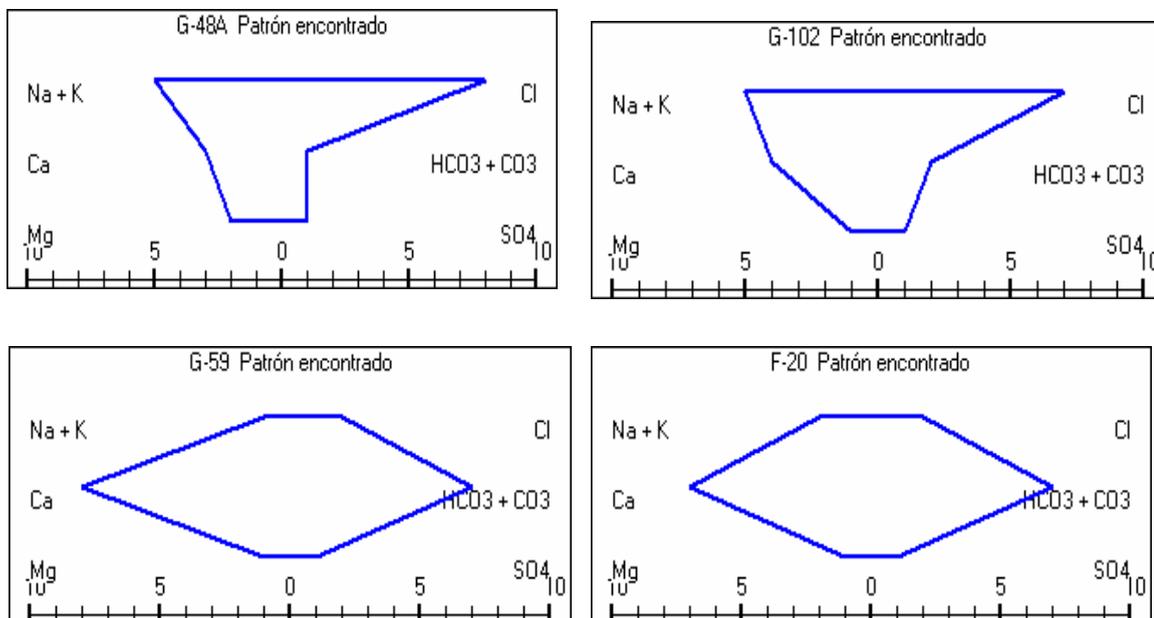
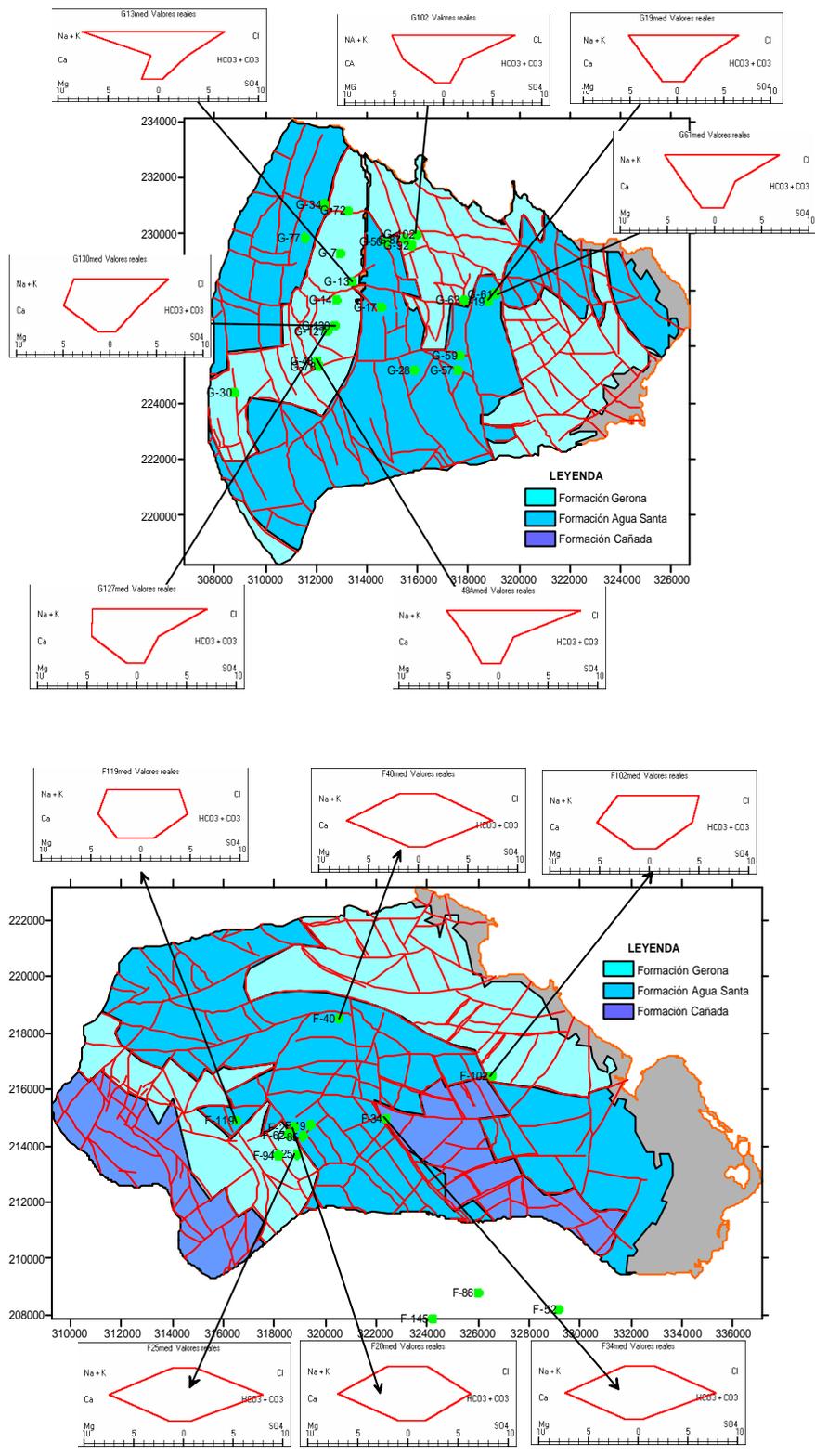


Figura 5. Patrones hidrogeoquímicos de aguas representativas de las cuencas Gerona y La Fé

El ión predominante en los pozos G-59 y F-20, de acuerdo al criterio de los iones más abundantes (Clasificación de Schoukarev), es el bicarbonato. Este mismo comportamiento lo presentan otras fuentes tanto de la cuenca Gerona como de la cuenca la Fé, y se explica por la posible existencia de interacción de esta agua con los carbonatos presentes en los mármoles.

El predominio del ion cloruro para las fuentes G-48 A y G-102 indica la presencia de procesos de interacción marina y otros tipos de salinización.

En la figura 6 se muestran las dos cuencas de estudio y la representación mediante los Diagramas de Staff de los diferentes patrones hidrogeoquímicos que existen en estos dos acuíferos.



Aunque no se han representado todos los diagramas de Stiff, sino los más representativos en la Tabla 2 se relacionan los patrones hidrogeoquímicos encontrados en tanto por 10 de meq/l para las fuentes de estudio. Con respecto a los aniones, las aguas clasifican como bicarbonatadas, cloruradas y mixtas (bicarbonatadas cloruradas y cloruradas bicarbonatadas), mientras que con relación a los cationes clasifican como cálcicas, magnésicas y mixtas (calcicas sódicas y sódicas cálcicas).

Figura 6. Unidades hidrogeológicas de las cuencas Gerona y La Fé y sus patrones hidrogeoquímicos representados mediante diagramas de Stiff.

Tabla 2. Porcentaje de mezcla con agua de mar, patrones hidrogeoquímicos y tipo de agua (según Schukarev) determinados a partir de las concentraciones medias. Pozos de las cuencas hidrogeológicas Gerona y La Fé.

No	Pozo	% Mezcla	Patrón encontrado (tanto por 10 de meq/l)	Tipo de agua
Gerona				
1	G-13	0.5	7:1:2 - 6:3:1	Cl>HCO3-Na
2	G-19	0.9	5:4:1 - 6:3:1	Cl>HCO3-Na>Ca
3	G-48A	2.1	5:3:2 - 8:1:1	Cl-Na>Ca
4	G-61	1.1	5:4:1 - 6:3:1	Cl-Na>Ca
5	G-102	1.9	5:4:1 - 7:2:1	Cl>HCO3-Ca>Na
6	G-127	1.2	4:5:1 - 6:3:1	Cl>HCO3-Ca>Na
7	G-130	0.9	4:5:1 - 6:3:1	Cl>HCO3-Ca>Na
8	G-17	0.0	2:7:1 - 1:8:1	HCO3-Ca
9	G-50	0.1	2:7:1 - 3:6:1	HCO3>Cl-Ca
10	G-59	0.0	1:8:1 - 2:7:1	HCO3>Cl-Ca>Na
11	G-28	0.0	172-271	HCO3>Cl-Ca
La Fé				
1	F-20	0.0	2:7:1 - 2:7:1	HCO3>Cl-Ca>Na
2	F-99	0.0	3:6:1 - 3:5:2	HCO3>Cl-Ca>Na

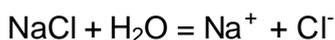
Procesos geoquímicos y origen de la composición química de las aguas.

Mediante modelos de balance de masas y mezcla de agua, se puede determinar el origen de la composición química de un agua. Para estos fines MODELAGUA constituye una herramienta muy valiosa, ya que precisamente permite este tipo de modelación.

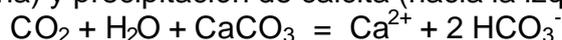
En el caso de un agua no afectada por la intrusión marina, se pueden utilizar dos métodos. El primero, utilizado por Garrels y Mackenzie (1967), que consiste en tomar, para el caso de aguas de corto recorrido, el agua de lluvia como referencia y un ion conservativo, esto es, un ion que no sufra modificaciones en su trayectoria subterránea (por lo general el cloruro), determinándose un factor de concentración por evapotranspiración (Fagundo-Sierra et al, 2001). El segundo método, toma también el agua de lluvia como referencia pero se asume que el factor de concentración es 1 (Appelo y Posta, 1993) y se toma la diferencia de cloruro como NaCl (halita). Este último es el método utilizado en este trabajo.

En el caso de aguas con intrusión marina se toman en cuenta dos muestras de referencia, una representativa del agua dulce y una muestra del agua de mar, no considerándose ningún ion conservativo. Los principales procesos que originan la composición química de un agua en un acuífero costero son los siguientes (Fagundo et al, 2002):

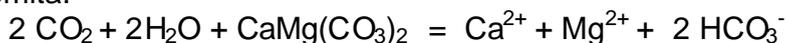
Disolución de halita:



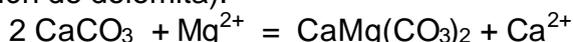
Disolución (hacia la derecha) y precipitación de calcita (hacia la izquierda):



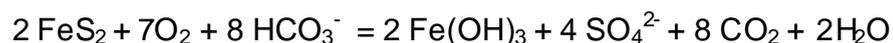
Disolución de dolomita:



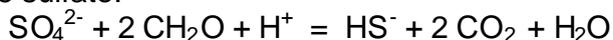
Dolomitización (precipitación de dolomita):



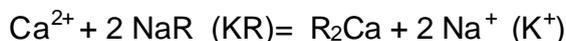
Oxidación de pirita dando hematita:



Reducción anaeróbica de sulfato:



Intercambio iónico directo (hacia la derecha) e inverso (hacia la izquierda) entre Na^+ (K^+) y Ca_2^+ :



En la tabla 3 se presentan los resultados de la determinación de los procesos geoquímicos que tienen lugar en los acuíferos desarrollados en las cuencas de Gerona y La Fé.

Tabla 3. Procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas de las cuencas Gerona y La Fé (concentraciones en mg/l).

Pozo	Halita	Calcita	Dolomita	Pirita	Na-Ca	K-Ca	CO ₂
G-13	0.0	-7.0	-71.9	5.2	-48.4	1.1	241.0
G-19	0.0	5.4	-15.1	1.1	7.5	-0.0	-4.8
G-48A	61.4	27.4	-3.5	2.2	49.3	4.0	-7.4
G-61	0.0	4.9	-7.5	1.6	17.6	3.5	-21.3
G-102	0.0	176.1	-100.1	1.9	-0.6	3.2	-44.3
G-127	44.5	58.9	9.2	2.2	36.2	0.5	-3.9
G-130	48.3	50.1	3.1	0.9	39.0	0.5	2.9
G-17	10.6	68.0	27.6	2.0	-1.8	-0.2	59.0
G-50	13.1	33.5	-7.2	2.0	10.7	-0.1	31.4
G-59	16.7	38.0	21.2	0.9	-0.2	-0.2	42.3
G-28	32.8	66.0	37.7	1.5	2.0	-0.4	69.1
F-20	44.1	140.5	33.1	12.2	-1.2	-0.6	132.4
F-99	21.1	28.5	21.1	3.8	-1.4	-0.4	33.1

A partir de la información que ofrece la tabla 3, se puede inferir que la composición química de los pozos de las cuencas Gerona y la Fé se explica mediante procesos de disolución de halita y calcita, disolución de dolomita (fundamentalmente en los no salinizados) o dolomitización (por lo general los más salinizados), oxidación de pirita y procesos de intercambio iónico directo o inverso. En ningún caso se detectó reducción anaeróbica de sulfato, proceso común en acuíferos cársicos costeros contiguos a un humedal (Fagundo et al, 2002).

La intensidad del proceso de intemperismo que origina la composición química de estas aguas, se mide por la cantidad en mg/l de minerales disueltos o precipitados. Los procesos más significativos son los de disolución de calcita, que llega a alcanzar hasta 176 mg/l en el pozo G 102, la precipitación de dolomita (101.1 mg/l, también en el pozo G 102) y la disolución de halita (61.4 mg/l en el pozo G 48A).

Tabla 4. Modelos de correlación matemática entre las concentraciones iónicas (meq/l) y la conductividad eléctrica (μS/cm)

Pozo	$y = b_1X$	$y = b_1X + b_2X^2$
G-48A	$\text{HCO}_3^- = 1.4012 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Cl}^- = 7.2114 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{SO}_4^{2-} = 5.9553 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ $\text{Ca}^{2+} = 3.0455 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Mg}^{2+} = 1.3756 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 4.7858 \cdot 10^{-3} \text{CE}$	$\text{HCO}_3^- = 2.9770 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 8.5532 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Cl}^- = 6.4976 \cdot 10^{-3} \text{CE} + 3.4215 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{SO}_4^{2-} = 1.4661 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 4.1429 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Ca}^{2+} = 4.04117 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 4.7747 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Mg}^{2+} = 1.8562 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 2.3037 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 5.0386 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 1.2118 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$
IS	0.9046	0.9227
Pozo	$y = b_1X$	$y = b_1X + b_2X^2$
G-102	$\text{HCO}_3^- = 1.6943 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Cl}^- = 6,6894 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{SO}_4^{2-} = 6,4000 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ $\text{Ca}^{2+} = 4,1851 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Mg}^{2+} = 7,7997 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 4,1548 \cdot 10^{-4} \text{CE}$	$\text{HCO}_3^- = 3,3268 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 8,0806 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Cl}^- = 5,4756 \cdot 10^{-3} \text{CE} + 6,0067 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{SO}_4^{2-} = -2,6190 \cdot 10^{-4} \text{CE} + 8,7428 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Ca}^{2+} = 5,9193 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 8,5838 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Mg}^{2+} = 5,8376 \cdot 10^{-4} \text{CE} + 9,7122 \cdot 10^{-8} \text{CE}^2$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 2,9234 \cdot 10^{-3} \text{CE} + 6,0953 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$
IS	0.9106	0.9395
Pozo	$y = b_1X$	$y = b_1X + b_2X^2$
G-59	$\text{HCO}_3^- = 6.3288 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Cl}^- = 2.4746 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{SO}_4^{2-} = 2.9780 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ $\text{Ca}^{2+} = 6.0198 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Mg}^{2+} = 1.2713 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 1.8859 \cdot 10^{-3} \text{CE}$	$\text{HCO}_3^- = 7.7224 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 5.8789 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Cl}^- = 5.6961 \cdot 10^{-4} \text{CE} + 8.0361 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{SO}_4^{2-} = 2.1488 \cdot 10^{-5} \text{CE} + 1.1656 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Ca}^{2+} = 4.3460 \cdot 10^{-3} \text{CE} + 7.0607 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Mg}^{2+} = 2.0067 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 3.1024 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 2.2121 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 1.3766 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$
IS	0.8942	0.8935
Pozo	$y = b_1X$	$y = b_1X + b_2X^2$
F-20	$\text{HCO}_3^- = 5.9380 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Cl}^- = 1.9460 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{SO}_4^{2-} = 1.6275 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Ca}^{2+} = 6.7248 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Mg}^{2+} = 8.3277 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 1.8600 \cdot 10^{-3} \text{CE}$	$\text{HCO}_3^- = 7.8532 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 3.6251 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Cl}^- = 2.0139 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 1.2855 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{SO}_4^{2-} = 8.8114 \cdot 10^{-5} \text{CE} + 2.9137 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Ca}^{2+} = 8.4827 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 3.3275 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Mg}^{2+} = 7.1789 \cdot 10^{-4} \text{CE} + 2.1744 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 1.4705 \cdot 10^{-3} \text{CE} + 7.3726 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$
IS	0.9272	0.9383

Estimación de la composición química de las aguas mediante modelos de correlación matemática

Una vez caracterizadas las fuentes presentes en un acuífero o cuenca subterránea desde el punto de vista hidroquímico y determinados los correspondientes procesos hidrogeoquímicos que originan su composición, se puede proceder a determinar los modelos de correlación matemática que permiten realizar un seguimiento de la calidad de las aguas mediante las simples mediciones sistemáticas de la conductividad eléctrica. Los fundamentos del método han sido publicados por Fagundo y colaboradores en varios trabajos (Fagundo, 1990, 1996, 1998; Hernández, 2002).

Al igual que en casos similares, se procedió a separar los datos para cada pozo y tramo de muestreo, en dos grupos: uno para la determinación de los modelos y otro para su validación. Para el primer objetivo fueron utilizados los datos del intervalo 1982-1999 y para el segundo, los datos del intervalo 2000-2002. Por lo general, los mejores resultados fueron obtenidos mediante el modelo polinómico de segundo grado (que representa una parábola que pasa por el origen de coordenadas) en todos los pozos estudiados, aunque en el caso de las aguas poco salinizadas no se encontraron diferencias significativas con respecto al modelo de la línea recta con intercepto cero. Finalmente fueron agrupados todos los datos y se procedió a obtener nuevos modelos con el total de datos (agrupando el primero y segundo intervalo). En la tabla 4 se muestran las ecuaciones empíricas determinadas para los pozos G- 48A, G-102 y G -59 de la cuenca Gerona y el pozo F 20 de la cuenca La Fé. En todos los casos, las estimaciones realizadas con las mismas arrojaron una similitud superior al 89 % con respecto a los resultados analíticos.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento al Ing. Eugenio Lores por la ayuda y asesoramiento prestado en la confección de mapas, interpretación de aspectos de la geología e hidrogeología de la región pinera.

CONCLUSIONES

En condiciones dinámicas, las aguas presentan una composición media que depende del régimen de lluvia y alimentación del acuífero así como de su explotación, por lo que se hace necesario mantener un riguroso control de esta última con el objetivo de que los índices de calidad (contenidos de cloruro, dureza, TSS y otros) no alcancen valores por encima de lo que establecen las normas para abasto a la población.

Para la cuenca hidrogeológica Gerona, los patrones hidrogeoquímicos encontrados tanto en condiciones estáticas como dinámicas presentan como tendencia la evolución desde patrones semejantes al correspondiente a un agua poco mineralizada originada por el intemperismo de los mármoles ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), hasta patrones que tienden a parecerse al correspondiente al agua de mar ($\text{Cl-Na}>\text{Ca}$).

Los procesos geoquímicos que determinan el origen de la composición química del agua en las fuentes de estudio son fundamentalmente: disolución de calcita y halita; disolución y precipitación de dolomita; oxidación de pirita e intercambio iónico directo o inverso.

Se obtuvo muy buen ajuste mediante el empleo de los modelos de la ecuación polinómica de 2do grado que pasa por el origen de coordenadas y el de la línea recta con intercepto distinto de cero presentando en cada uno de ellos IS muy similares entre estos dos modelos.

Se demuestra la aplicabilidad y ventajas de los softwares utilizados. Algunas de las posibilidades que nos ofrecen estos sistemas computarizados y que fueron utilizadas en el presente trabajo se muestran a continuación: expresión de la composición química de un agua en diferentes unidades (mg/l, meq/l, % meq/l, mmol/l); determinación del tipo de agua

(según los métodos de Alekin, Shchoukarev o Kurlov); variación temporal de las variables hidroquímicas, determinación del origen de la composición química del agua, determinación de las relaciones entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica mediante modelos lineales que pasan por el origen de coordenadas, modelos lineales con intercepto distinto de cero y modelos polinómicos de 1^{ro} y 2^{do} grado, representación de la composición química de un agua mediante Diagramas de Stiff.

RECOMENDACIONES

Con el objetivo de evitar un mayor impacto negativo en las aguas de consumo provenientes de la cuenca hidrogeológica Gerona, y contribuir a que se garantice un agua de mayor calidad a la población, se recomienda realizar estudios encaminados a la disminución del tiempo de bombeo de las fuentes con altos niveles de cloruro y encontrar alternativas para explotar otras fuentes de la misma cuenca que no presenten contaminación por intrusión marina. Además, se recomienda estudiar la evolución de la composición química de las aguas de la cuenca Gerona, especialmente los pozos G 48A y G 102, entre los años 2003 hasta el presente, con el objetivo de comparar con los resultados obtenidos en este trabajo que cubrió la etapa desde la década del 80 hasta el año 2002.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez E.; Vinardell, I., Fagundo, J.R.; Reguera, E.; Cardoso, M.E. (1990). Control de la calidad de las aguas mediante un sistema automatizado. Estudios Geológicos (Madrid), 46 (5-6): 409-414.
- APHA, AWWA, WPCF (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastes.
- Appelo C.A.J. and D. Postma. (1993). Geochemistry, Groundwater and Pollution. A.A. Balkema Publish. Rotterdam, Brookfield, 536 pp.
- 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.. (1996). Química del Agua Kárstica. En Hidroquímica del Karst. Ed. Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental, 11-119, Granada.
- Fagundo, J.R. (1998). Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales. Ingeniería Hidráulica, 19 (2): 62-78, ISSN 0253-0678.
- Fagundo, J.R.; González, P.; Jiménez, S.; Suárez, M.; Fagundo-Sierra, J.; A. González, Romero, E.; Orihuela, D. (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-Sierra, J.; Fagundo, J.R.; González, P.; Suárez, M. (2001). Modelación de las aguas naturales. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. VII Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN. La Habana, Volumen 2.
- Garrels, R.M., Mackenzie, F.T. (1967). Origin of the chemical compositions of some spring and lakes. Equilibrium concepts in Natural Water Systems. Am. Chem. Ser. 67: 222-242.
- Hernández, M. (2002). Caracterización hidrogeoquímica de la cuenca hidrogeológica Sur de Pinar del Río. Tesis de Maestría. Facultad de Geografía, U.H.