

VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERIA HIDRAULICA

TITULO: MODELOS HIDROGEOQUIMICOS APLICADOS A LA HIDROQUIMICA DE LA CUENCA GERONA

AUTORES: MSc. Tamara Leonarte Pérez; Doctor. Juan R. Facundo Castillo.

Dirección: Calle 57 # 812 % 8 y 18. Rpto. Abel S ta María. Nueva Gerona, Isla de la Juventud

País: Cuba.

RESUMEN

Se realiza un estudio de la evolución en el tiempo de la calidad de fuentes subterráneas (pozos) de los acuíferos de Gerona y La Fé, con vistas a evaluar los procesos hidroggeoquímicos 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 hidroggeoquímicos. Varios pozos de la Cuenca Gerona exhiben resultados críticos a través de 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, ellos se complementan entre sí y se fundamentan en modelos estadísticos, químico-físicos, de balance de masa y mezcla de agua.

Considerando la constante amenaza de los cambios climáticos que ocasionan grandes sequías y además que vivimos en una isla donde sería irreversible la recuperación de estas fuentes que se encuentran intrusionadas, los resultados de este estudio permitirán a las entidades involucradas un manejo y control mas racional e inteligente del recurso agua.

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

Palabras claves: intrusión marina, procesos hidroggeoquímicos, calidad del agua.

VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERIA HIDRAULICA

TITULO: MODELOS HIDROGEOQUIMICOS APLICADOS A LA HIDROQUIMICA DE LA CUENCA GERONA

AUTORES: MSc. Tamara Leonarte Pérez; Doctor. Juan R. Facundo Castillo.

Dirección: Calle 57 # 812 % 8 y 18. Rpto. Abel Sta María. Nueva Gerona, Isla de la Juventud

País: Cuba.

INTRODUCCION

Las aguas subterráneas suelen ser más difíciles de contaminar que las superficiales, pero cuando esta contaminación se produce, 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 (Zhang et al, 2004). 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.

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 estas últimas 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, algunas de las fuentes de abasto de la Cuenca Gerona y de la Cuenca La Fé. Otros objetivos más específicos serán: el análisis de fenómenos que afectan las características físico-químicas de estas aguas, contribuir al conocimiento de la situación actual de la hidroquímica de dichas fuentes, estudio del comportamiento de parámetros de contaminación, estimar la composición química mediante modelos de correlación matemática y divulgar el uso práctico de los programas HIDROGEOQUIM, SAMA, MODELAGUA y GEOQUIM.

Ubicación geográfica de la Isla de la Juventud.



Figura 1. Ubicación de la Isla de la Juventud en el contexto del Archipiélago de Cuba. Dicha región abarca un territorio de 2 420 Km², de ellos corresponden a la superficie de tierra firme 2 205 Km² y 215 Km² de área de cayos

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 un grado de salinidad en su parte más extrema de 5g/l de TSS. En la figura 2 se muestran algunas fuentes de la Cuenca Gerona.

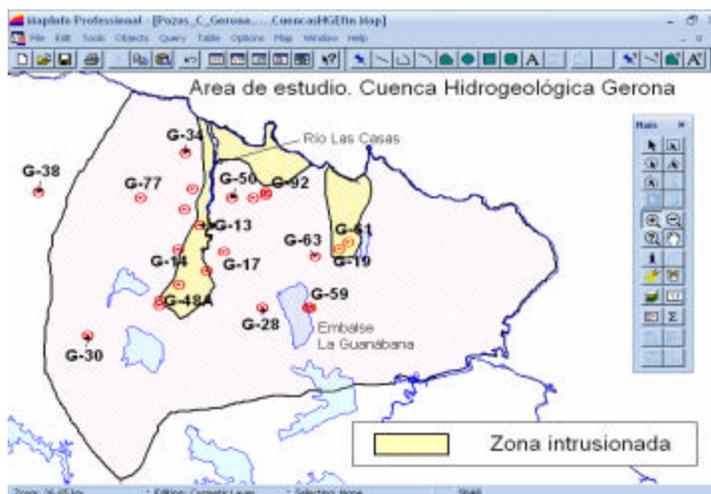


Figura 2. Distribución de los pozos que abastecen la ciudad de Nueva Gerona.

MATERIALES Y METODOS.

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 fuentes 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 seleccionó una fuente (F-20) 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. La distribución espacial de los datos correspondientes a estos pozos fue realizada mediante el empleo de MAPINFOW versión 6.5. 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. Los datos de parámetros químicos y físicos a PRODAT se realizaron en mg/l. Luego se llevaron al EXCEL se convirtieron a meq/l para crear los ficheros de cada fuente en extensiones.txt, .exel y .dbf 4, par ser utilizados luego por los demás SOFTWARE.

Figura 3.1 Forma de presentación de HIDROGEOQUIM

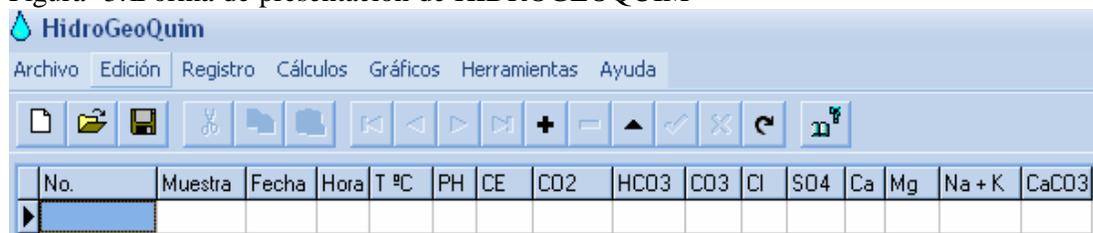


Figura 3.2 Forma de presentación de MODELAGUA

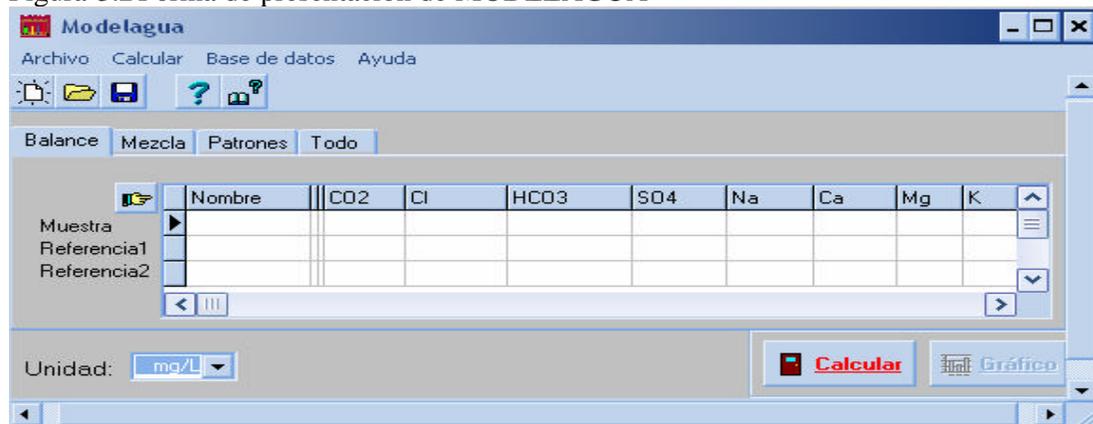


Figura 3.3 Forma de presentación de GEOQUIM



Figura 3.4 Forma de presentación de SAMA



Mediante HIDROGEOQUIM, se determinaron las propiedades químico-físicas de las aguas, se clasificaron y determinaron los tipos de ellas y se estudió la variación temporal de diferentes variables, lo cual permitió la caracterización de las aguas subterráneas, afectadas o no por 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 mayor al 25% de total de miliequivalente de aniones o de cationes (Facundo, 1996).

El programa MODELAGUA está basado de modelos de balance de masas y análisis de mezcla, y fue utilizado para la obtención de los Diagramas de STIFF y la determinación de patrones hidrogeoquímicos.

GEOQUIM se empleó la determinación de la correlación de los diferentes indicadores geoquímicas y de la calidad de las aguas, el cálculo de la matriz de correlación de todos los datos y la determinación de series cronológicas del ión cloruro.

SAMA se utilizó para la determinación de ecuaciones de dependencia matemática entre la correlación iónica y la conductividad eléctrica según polinomio de 1ro y 2do grados.

RESULTADOS Y DISCUSION

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 basto a 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, los pozos G-13, G-19, G-48A, G-61, G-102, G-127 y G-130 poseen una concentración del ión 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 ión cloruro sobrepasan el reportado por la Norma Cubana de 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 mg/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 esta tabla se muestran los valores de principales indicadores geoquímicos de una de las fuentes de la cuenca La Fé y se aprecia la calidad de esta cuenca a través de la baja concentración en sales que contienen sus aguas.

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

Cuenca Gerona

| No | Pozo | N | T | pH | CE | CO2 | HCO3 ⁻ | Cl ⁻ | SO4 ²⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | CaCO3 | 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-17 | 31 | 25 | 6.95 | 288 | 26.4 | 129.3 | 15.3 | 6.4 | 38.5 | 4.3 | 8.9 | 0.0 | 114 | 203 |
| 3 | G-19 | 90 | 25 | 7.01 | 1009 | 29.1 | 145.3 | 209.6 | 28.1 | 60.0 | 15.1 | 103.4 | 2 | 213 | 564 |
| 4 | 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 |
| 5 | 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 |
| 6 | G-59 | 43 | 25 | 6.87 | 224 | 24.2 | 81.2 | 19.3 | 3.1 | 26.7 | 3.5 | 9.5 | 0.2 | 81 | 149 |
| 7 | 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 |
| 8 | 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 |
| 9 | 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 |
| 10 | 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 |

Cuenca La Fé

| No | Pozo | N | T | pH | CE | CO2 | HCO3 ⁻ | CO3 | Cl ⁻ | SO4 ²⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | CaCO3 | TSS |
|----|------|----|----|------|-----|------|-------------------|-----|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------|-----|
| 1 | F-20 | 85 | 25 | 6.59 | 510 | 93.9 | 185.7 | 0.0 | 35.2 | 39.1 | 68.9 | 5.1 | 21.3 | 0.4 | 193 | 356 |

Variación temporal del ión cloruro

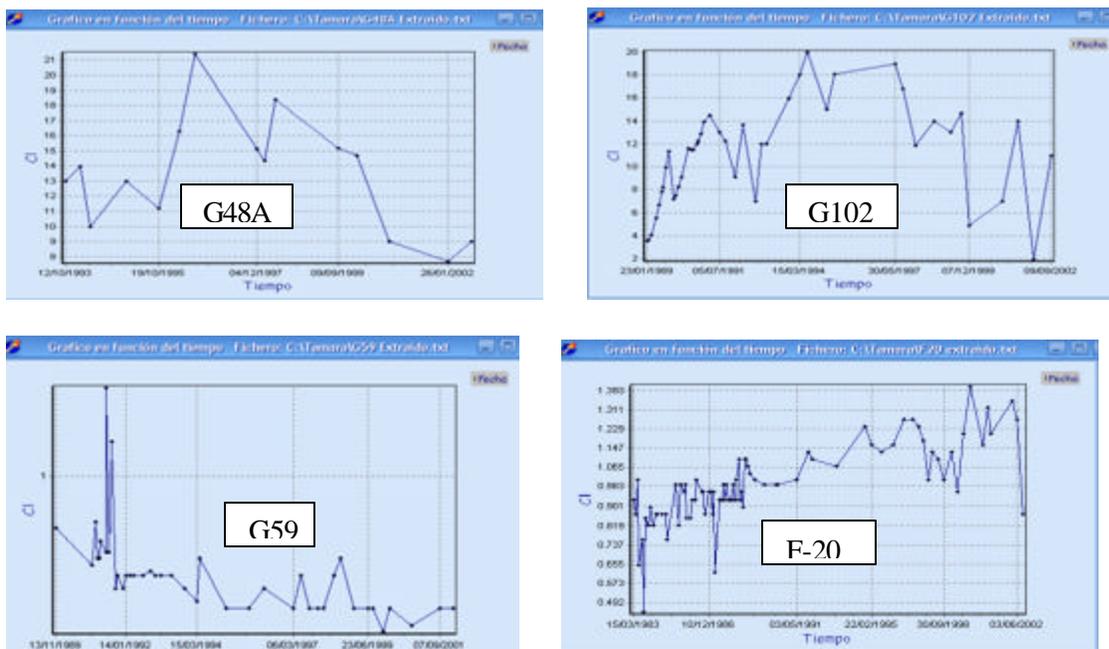
Para una mejor demostración del comportamiento del ión cloruro en el tiempo se procesaron por GEOQUIM los datos seleccionados para las fuentes: G-48 A, G-102 y G-59, por ser ellas importantes en el abasto a la población de la ciudad de Nueva Gerona y para enfatizar la diferencia que existe en las aguas de esta cuenca.

Las tres tendencias fundamentales del comportamiento del ión cloruro están reflejadas en la figura 4, siendo las mismas: ascendente, fluctuacional y decreciente en el tiempo.

En estos gráficos el eje Y muestra los valores en meq/l del ion cloruro y el eje X muestra el tiempo. Aquellos valores que en el eje Y superan los 7 meq/l, indican que el contenido de este ion es superior a los 250 mg/l que reporta la norma cubana, lo cual además supera la concentración máxima admisible. Observe el comportamiento de los pozos G-59 en la figura 4 (c) y F-20 en la figura 4 (d), respectivamente, mostrando ellos buena calidad en sus aguas a través del tiempo. La Figura 4 (a) muestra que para el pozo G48 A, los valores del ion cloruro alcanzaron cifras significativas entre los años 1995 hasta el año 1999, aunque en los últimos años ha disminuido, continúa siendo una fuente sujeta a seguimiento por su salinidad.

La figura 4 (b) muestra las variaciones sufridas por este ion para la fuente G-102, indicando fluctuación en el tiempo y llegando a alcanzar valores de hasta 888 mg/l, lo cual triplica el valor reportado por la norma de referencia.

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



Porcentaje de mezcla, patrones hidrogeoquímicos y tipos de agua

Se muestra a través de la tabla 2 el porcentaje de mezcla con agua de mar de estas aguas objeto de estudio. En general, el valor medio de este indicador varía entre 0.0 y 2.1. 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 se presentan tipos de aguas en una misma cuenca con características diferentes entre ellas y estas variaciones de la composición química pueden ser caracterizadas por patrones hidrogeoquímicos que consisten en relaciones estequiométricas del tipo: $\text{Na}^+ + \text{K}^+ : \text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+} : \text{Cl}^- : \text{Mg}^{2+} : \text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-}$ (facundo,1998), donde la facie hidroquímica predominante depende fundamentalmente de la litología, las condiciones de circulación hídrica, así como de los factores de tipo ambiental.

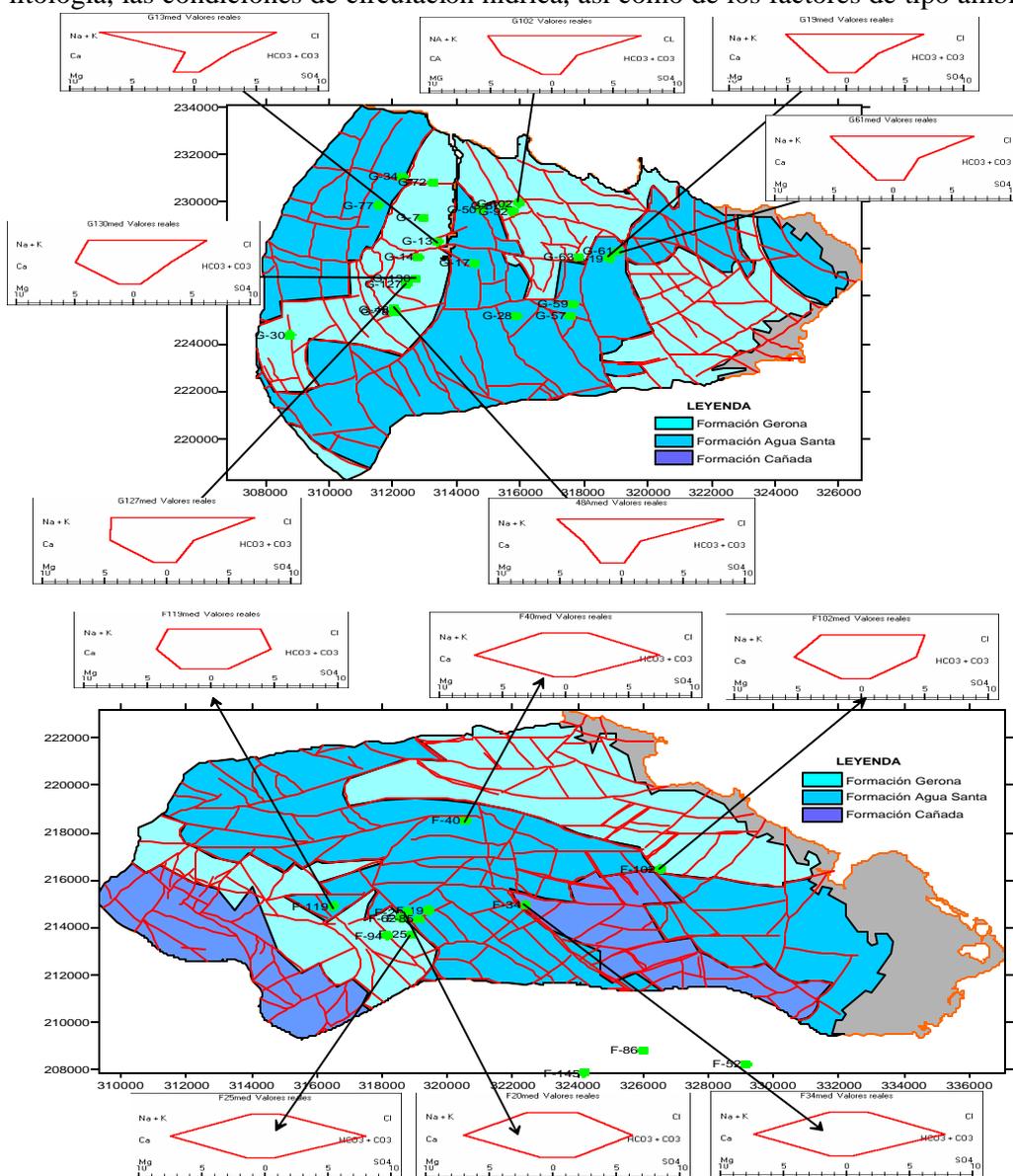


Figura 5. Unidades hidrogeológicas de las Cuencas Gerona y La Fé y sus patrones hidrogeoquímicos representados mediante diagramas de Stiff.

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

Cuenca Gerona

| No | Pozo | Tipo de agua | % de Mezcla | Patrón encontrado (tanto por 10 de meq/l) |
|----|------|-----------------------------|-------------|---|
| 1 | G13 | Cl>HCO ₃ -Na | 0.5 | 7:1:2 - 6:3:1 |
| 2 | G17 | HCO ₃ -Ca | 0.0 | 2:7:1 - 1:8:1 |
| 3 | G19 | Cl>HCO ₃ -Na>Ca | 0.9 | 5:4:1 - 6:3:1 |
| 4 | G48A | Cl-Na>Ca | 2.1 | 5:3:2 - 8:1:1 |
| 5 | G50 | HCO ₃ >Cl-Ca | 0.1 | 5:3:2 - 8:1:1 |
| 6 | G59 | HCO ₃ >Cl-Ca>Na | 0.1 | 1:8:1 - 2:7:1 |
| 7 | G61 | Cl> HCO ₃ -Na>Ca | 1.1 | 5:3:2 - 8:1:1 |
| 8 | G102 | Cl> HCO ₃ -Ca>Na | 1.9 | 5:4:1 - 7:2:1 |
| 9 | G127 | Cl> HCO ₃ -Ca>Na | 1.2 | 4:5:1 - 6:3:1 |
| 10 | G130 | Cl> HCO ₃ -Ca>Na | 0.9 | 4:5:1 - 6:3:1 |

Cuenca La Fé

| No | Pozo | Tipo de agua | % de Mezcla | Patrón encontrado (tanto por 10 de meq/l) |
|----|------|-----------------------------|-------------|---|
| 1 | F-20 | HCO ₃ >Cl- Ca>Na | 0.0 | 2:7:1-2:7:1 |

Procesos Geoquímicas 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 Postma, 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.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la determinación de los procesos geoquímicas que tienen lugar en los acuíferos desarrollados en las cuencas de Gerona y LA Fé. A partir de la información que ofrece la tabla 3, se puede inferir que la composición química de los pozos de las dos cuencas de estudio se explica mediante procesos de disolución de halita y calcita, disolución de dolomita (fundamentalmente en los no salinizados) o dolomitización (por lo general en 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 (Facundo et al, 2002).

Tabla 3. Procesos geoquímicas 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 | CO2 |
|--------|--------|---------|----------|--------|-------|------|-------|
| 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-48 A | 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 |
| F-20 | 44.1 | 140.5 | 33.1 | 12.2 | -1.2 | -0.6 | 132.4 |

La intensidad del proceso de interperismo que origina la composición química de esta agua, 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 con el valor de 101.1 mg/l, también en el pozo G-102 y la disolución de halita, con 61.4 mg/l en el pozo G-48 A.

Modelos Hidrogeoquímicos.

Cuando las aguas son de origen natural adquieren su composición química mediante un complejo proceso donde intervienen factores químico-físicos, geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, edafológicos, climáticos, microbiológicos y ambientales. Por tanto el agua ya no es la misma en cada momento y varía su a través de su trayectoria. En los casos en que se producen cambios de tipo cuantitativo como ocurre con las aguas subterráneas, estas variaciones en la composición pueden ser caracterizadas a través de determinadas relaciones iónicas o patrones hidrogeoquímicos.

Los patrones hidrogeoquímicos consisten en relaciones estequiométricas del tipo $Na^+ + K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+} : Cl^- : SO_4^{2-}$ donde la facies hidroquímica predominante depende fundamentalmente de la litología y el patrón de agrietamiento local, las condiciones de circulación hídrica, la geomorfología del terreno, el tipo de suelo, así como de factores de tipo ambiental. Estos patrones pueden representarse mediante diagramas, expresándose la concentración iónica en forma absoluta (meq/l) o relativa (porcentaje meq/l).

Teoría que fundamenta el empleo de métodos de estimación de la composición química de las aguas mediante mediciones de conductividad eléctrica y el empleo de correlaciones matemáticas.

El uso de relaciones matemáticas entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica de las aguas naturales, se ha propuesto sobre la base de un modelo de adquisición de la composición química, similar al que ocurre en un reactor de laboratorio donde se hace pasar una corriente de CO₂ a un agua y se coloca un mineral carbonatado (Fagundo, 1985, 1990 a; Fagundo y Pajón, 1987; Fagundo, 1996).

Si se determinan las concentraciones iónicas al multiplicar las conductividades eléctricas, en cada momento en que se hizo el experimento, por las correspondientes relaciones matemáticas obtenidas, se encuentra que no existen grandes diferencias entre la composición química real y la obtenida por estos modelos matemáticos. Basado en estos principios se elaboró un sistema automatizado (Alvarez et al, 1990; 1999) capaz de determinar en forma rápida los modelos de correlación matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica, con el objetivo del ulterior control de la composición química de las aguas mediante mediciones en el campo con conductímetros portátiles. En general, cuando uno de los factores es dominante en el modo de adquisición de la composición química de las aguas, las relaciones entre las concentraciones iónicas y la conductividad eléctrica son de tipo lineal. Si más de un factor posee un peso semejante en este proceso, las ecuaciones de segundo grado ajustan mejor. En este último caso se observa, por lo general, más de un patrón hidrogeoquímico.

En el caso de aguas subterráneas que se encuentran estratificadas como resultado de mezcla con el mar o con otro horizonte acuífero, como sucede en los acuíferos carbonatados litorales y en aguas de mezcla en general, la evolución ocurre según una serie de patrones hidrogeoquímicos en el que se va incrementando, de manera progresiva, el contenido relativo de los iones Cl^- , Na^+ y K^+ y en menor medida Mg^{2+} y SO_4^{2-} , así como decreciendo el de los iones HCO_3^- y Ca^{2+} . La actividad del hombre, especialmente la sobreexplotación de los acuíferos para el abasto o el regadío altera los patrones hidrogeoquímicos naturales (Vinardell et al, 1997; Fagundo, Beato y González, 2002)

Estimación de la composición química de las aguas mediante mediciones de conductividad eléctrica y 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-48 A, G-102 y G-59 de la cuenca Gerona y El pozo F-20 de la cuenca La Fé.

| Pozo | $y = b_1X$ | IS | $y = b_1X + b_2X^2$ | IS |
|--------|---|--------|--|--------|
| G-48 A | $\text{HCO}_3^- = 1.4012 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Cl}^- = 7.2114 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{SO}_4^{2-} = 5.9553 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ $\text{Ca}^{2+} = 3.0455 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Mg}^{2+} = 1.3756 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 4.7858 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ | 0.9046 | $\text{HCO}_3^- = 2.9770 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 8.5532 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Cl}^- = 6.4976 \cdot 10^{-3} \text{CE} + 3.4215 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{SO}_4^{2-} = 1.4661 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 4.1429 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Ca}^{2+} = 4.04117 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 4.7747 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Mg}^{2+} = 1.8562 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 2.3037 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 5.0386 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 1.2118 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ | 0.9227 |

| Pozo | $y = b_1X$ | IS | $y = b_1X + b_2X^2$ | IS |
|-------|---|--------|--|--------|
| G-102 | $\text{HCO}_3^- = 1,6943 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Cl}^- = 6,6894 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{SO}_4^{2-} = 6,4000 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ $\text{Ca}^{2+} = 4,1851 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Mg}^{2+} = 7,7997 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 4,1548 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ | 0.9106 | $\text{HCO}_3^- = 3,3268 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 8,0806 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Cl}^- = 5,4756 \cdot 10^{-3} \text{CE} + 6,0067 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{SO}_4^{2-} = -2,6190 \cdot 10^{-4} \text{CE} + 8,7428 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Ca}^{2+} = 5,9193 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 8,5838 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Mg}^{2+} = 5,8376 \cdot 10^{-4} \text{CE} + 9,7122 \cdot 10^{-8} \text{CE}^2$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 2,9234 \cdot 10^{-3} \text{CE} + 6,0953 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ | 0.9395 |

| Pozo | $y = b_1X$ | IS | $y = b_1X + b_2X^2$ | IS |
|------|---|--------|---|--------|
| G-59 | $\text{HCO}_3^- = 6,3288 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Cl}^- = 2,4746 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{SO}_4^{2-} = 2,9780 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ $\text{Ca}^{2+} = 6,0198 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Mg}^{2+} = 1,2713 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 1,8859 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ | 0.8942 | $\text{HCO}_3^- = 7,7224 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 5,8789 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Cl}^- = 5,6961 \cdot 10^{-4} \text{CE} + 8,0361 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{SO}_4^{2-} = 2,1488 \cdot 10^{-5} \text{CE} + 1,1656 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Ca}^{2+} = 4,3460 \cdot 10^{-3} \text{CE} + 7,0607 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Mg}^{2+} = 2,0067 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 3,1024 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 2,2121 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 1,3766 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ | 0.8935 |

| Pozo | $y = b_1X$ | IS | $y = b_1X + b_2X^2$ | IS |
|------|---|--------|---|--------|
| F-20 | $\text{HCO}_3^- = 5,9380 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Cl}^- = 1,9460 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{SO}_4^{2-} = 1,6275 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Ca}^{2+} = 6,7248 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ $\text{Mg}^{2+} = 8,3277 \cdot 10^{-4} \text{CE}$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 1,8600 \cdot 10^{-3} \text{CE}$ | 0.9272 | $\text{HCO}_3^- = 7,8532 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 3,6251 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Cl}^- = 2,0139 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 1,2855 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{SO}_4^{2-} = 8,8114 \cdot 10^{-5} \text{CE} + 2,9137 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Ca}^{2+} = 8,4827 \cdot 10^{-3} \text{CE} - 3,3275 \cdot 10^{-6} \text{CE}^2$ $\text{Mg}^{2+} = 7,1789 \cdot 10^{-4} \text{CE} + 2,1744 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 1,4705 \cdot 10^{-3} \text{CE} + 7,3726 \cdot 10^{-7} \text{CE}^2$ | 0.9383 |

CONCLUSIONES

La caracterización hidroquímica espacial y temporal de las Cuencas Hidrogeológicas Gerona y La Fé, utilizando un conjunto de programas hidroquímicos, estadísticos y geoestadísticos, arrojó como resultado que la calidad de las aguas en la Cuenca Gerona se ha visto afectada por el fenómeno de intrusión marina.

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 diferentes usos (abasto a la población, riego, etc.).

Los procesos geoquímicos que determinan el origen de la composición química del agua en los pozos de abasto en la Cuenca Gerona son, fundamentalmente: disolución de calcita y dolomita, oxidación de piritita e intercambio iónico directo o inverso. Estos mismos procesos geoquímicos determinan el origen de la composición química de las aguas en los pozos de la Cuenca La Fé. La diferencia que existe entre ellas es que la primera posee dos fuentes en la que tiene lugar la precipitación de la dolomita o dolomitización (característico de fuentes intrusionadas) y que en la misma la composición química sufre modificaciones inherentes al proceso de mezcla con el agua de mar.

Dentro de la misma Cuenca Gerona existen pozos intrusionados donde el % de mezcla con agua de mar alcanza el valor de 2.1 (en el G-28A) y otros de excelente calidad donde no existe mezcla con agua marina.

Los análisis de series cronológicas de cloruros muestran tres tendencias fundamentales: una de carácter fluctuacional, una de tipo ascendente en el tiempo y una de tipo descendente.

Se obtuvo muy buen ajuste mediante el empleo de los modelos de la ecuación polinómica de 1ro y 2do grado que pasa por el origen de coordenadas y el de la línea recta presentando en cada uno de ellos índices de similitud (IS) muy similares entre estos dos modelos.

Tomando como base las dos cuencas representadas en este trabajo, se demuestra la aplicabilidad y ventajas de los software 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 método de Shchoukarev)

*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 1ro a 5to grado.

*Representación de la composición química de un agua mediante Diagramas de Stiff

RECOMENDACIONES

Introducir la aplicación de los sistemas informáticos al estudio de la calidad de las aguas para su utilización en la caracterización y control de este recurso.

Se debe tomar medidas en algunos pozos (G-48 A y G-102), de los estudiados para evitar que los cloruros alcancen valores tan altos, que llegan a duplicar y triplicar los reportados en la norma cubana, ya que esta agua se encuentran muy deterioradas y no cumplen con las normas de potabilidad pudiendo influir en la aparición y/o contribución de las enfermedades renales y cardíacas de la población que se abastece de esta cuenca.

Como por efecto de ion salino se produce un incremento de la disolución de calizas, cualquier tendencia al aumento del cloruro produciría un incremento de la cavernosidad del acuífero en el tiempo, lo cual facilitaría el paso del agua a marina al interior del mismo, dando lugar a un creciente deterioro de la calidad del agua. Por tal motivo debe mantenerse el seguimiento del contenido de cloruro en las aguas mediante análisis y mediciones de conductividad eléctrica sistemáticas.

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.

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.

BIBLIOGRAFIA

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.

Alvarez, E, I. Vinardell, J.R. Fagundo, J.E. Rodríguez (1993). Sistemas para el procesamiento de datos hidroquímicos: SAPHIQ, GEOQUIM, SAMA y BATOMET

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.

Fagundo, J.R., P. González, O. Beato (2002). Fundamentos de Hidrogeoquímica. En: Hidrogeoquímica e Hidrología Isotópica. Sexto Curso Internacional de Aguas Subterráneas y Medio Ambiente. Edición CIH – INRH, ISBN 959-261-037-1

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

Vinardell, I., E. Alvarez, M. Iturralde-Vinent, J.R. Fagundo (1991). Aplicación del sistema de programas GEOQUIM a la obtención de criterios para la prospección geoquímica. Revista CENIC Ciencias Químicas 22 (1): 66-68.