

Caracterización hidrogeoquímica de la subcuenca Najasa, cuenca Costera Sur de Camagüey

Gladis Yera Digat. SUM Carlos M. de Céspedes. Universidad de Camagüey. Cuba.
email: gladis.yera@reduc.edu.cu.

Constantino de Miguel Fernández. Fac. Geología-Minería. Dep. Geología ISMM, Moa, Holguín.
email: cdemiguel@ismm.edu.cu.

Juan R. Fagundo Castillo. Facultad de Química. Universidad de la Habana. Cuba.
email: Juan_fagundo@quimica.uh.cu.

RESUMEN

En la subcuenca Najasa, cuenca Costera Sur de Camagüey, el agua subterránea ha presentado deterioro en su calidad como resultado de malas prácticas agrícolas, sobreexplotación, malos diseños de las obras de captación y la ocurrencia de períodos secos prolongados. Hasta el momento las investigaciones hidrogeoquímicas no han permitido un conocimiento integrado de la subcuenca ni del proceso de intrusión salina que la afecta. En esta investigación se presenta su caracterización hidrogeoquímica, lo que permitió establecer las reacciones químicas que dan origen al agua que se presenta como agua propia del acuífero y agua mezclada con diferentes cantidades de agua de mar (hasta el 9%). Los cambios en la composición química del agua en el tiempo no han sido homogéneos pero en sentido general han mejorado sus características de calidad.

Palabras clave: acuífero cársico costero, hidrogeoquímica, intrusión salina, modelación hidrogeoquímica inversa, sobreexplotación.

Hydrogeochemical characterization of Najasa subbasin in Camagüey south coastal basin

ABSTRACT

In Najasa subbasin, Camagüey south coastal basin, groundwater has exhibited deterioration in its quality as a result of agricultural bad practices, overexploitation, bad designs in abstraction works and occurrence of extended dry periods. Until now, hydrogeochemical investigations have neither been able to give an integrated knowledge of the subbasin nor of the process of saline intrusion that affects it. In this research its hydrogeochemical characterization is presented which permitted to establish chemical reactions giving origin to the water which appears as proper aquifer water and as mixed water with different amounts of seawater (until 9%). Changes of chemical composition of water in time have not been homogenous, but in a general sense its quality characteristics have been improved.

Keywords: coastal karstic aquifer, hydrogeochemistry, saline intrusion, inverse hydrogeochemical modeling, overexploitation.

INTRODUCCIÓN

Los acuíferos cársicos en Cuba contienen gran parte de los recursos hídricos subterráneos de que se dispone para desarrollar la vida económica y social del país, estos acuíferos, por su parte, se encuentran notablemente afectados por los procesos de intrusión salina. En la provincia de Camagüey el 20 % del volumen de agua cuantificada es aportado por los acuíferos cársicos costeros, siendo el de cuenca Costera Sur el más importante por su extensión y la magnitud de sus recursos (82% del volumen total de aguas subterráneas extraídas en la provincia).

La cuenca puede describirse como una franja paralela a la línea costera de ancho variable, entre 15 y 20 km (fig. 1) y se divide, según criterios administrativos, a lo largo de la línea de costa en 4 subcuencas y 16 sectores de explotación: Florida (sectores CI-1 al CI-4), Vertientes (sectores CI-5 al CI-13), Sierra Maestra (sectores CI-14 y CI-15), Najasa (sector CI-16).

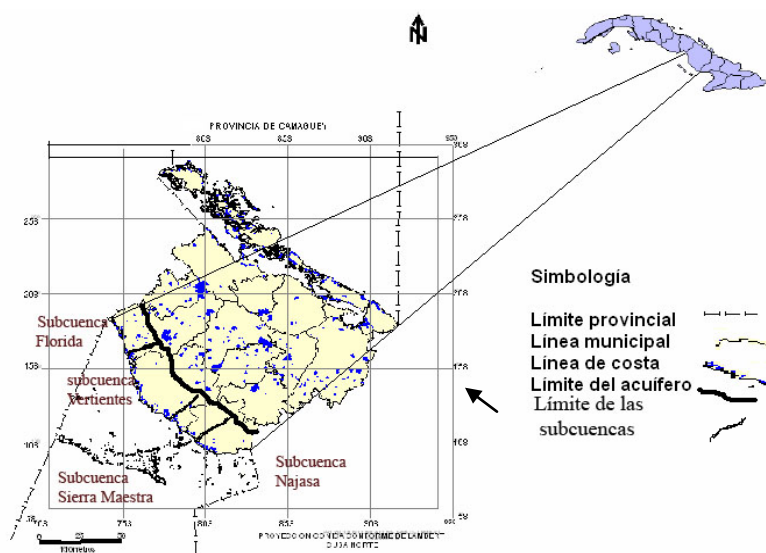


Figura. 1. Ubicación geográfica del área de estudio

La potencia acuífera media de la cuenca es de 50 m, con un gradiente hidráulico medio de 0,0006 con un volumen explotable de recursos cercano a 280 hm³. Las reservas de agua subterráneas de la subcuenca Najasa ascienden a 41,7 hm³ y han sido destinadas, fundamentalmente, al riego de arroz, pastos y caña, y en algunos casos se combina con la explotación de agua superficial.

En atención a la importancia económica y social de la subcuenca Najasa se hace necesario caracterizar su hidrogeoquímica, para realizar una explotación sostenible de sus recursos, mediante el empleo de distintos métodos hidrogeoquímicos, con énfasis en la modelación hidrogeoquímica inversa, por lo que se proponen los siguientes objetivos: caracterizar el proceso de evolución hidrogeoquímica del agua subterránea en el espacio y el tiempo y caracterizar la situación actual del proceso de intrusión salina y su perspectiva de evolución.

CONDICIONES GEOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el área de estudio, sobre el basamento, se desarrolla la cobertura platformica del Neógeno, de carácter neot autóctono del Mioceno temprano. La cobertura yace discordante sobre

el substrato, la componen las formaciones Arroyo Palma y Güines que pueden alcanzar espesores entre 250 y 300 m.

La formación Arroyo Palma, de edad Mioceno inferior-medio, se presenta en forma de pequeños afloramientos de aleurolitas blancuzcas hasta amarillo cremoso, arcillas y margas muy calcáreas (sin estratificación clara) y calizas arcillosas cavernosas con distribución regular tanto en dirección vertical como horizontal. El ambiente de sedimentación se supone de agua nerítica, platafórmica, en condiciones de bahía tranquila, con predominio de la sedimentación lodosa-carbonatada, en algunos lugares las calcarenitas transicionan hacia la facies periarrecifal. Puede estar cubierta por la formación Güines o por depósitos del Cuaternario.

La formación Güines se descubre en muchos pozos o calas del territorio, se compone de calizas fuertes, masivas, cristalinas, blancas hasta rosadas, muy cavernosas, con organismos marinos y lentes de arcillas. Las rocas de esta formación se encuentran fuertemente recristalizadas o dolomitizadas y en la parte inferior se intercalan calizas arcillosas hasta margas; este fenómeno también ocurre en la cercanía de las transiciones laterales hacia la formación Arroyo Palma. Casi siempre yace concordante sobre la formación Arroyo Palma y raramente discordante y transgresivamente sobre rocas paleogénicas (Eoceno medio). Es probable que el ambiente de sedimentación fuera de bahía somera, cálida, tranquila, hasta moderadamente agitada.

Los depósitos del Cuaternario, por su parte, están pobremente estudiados y en la vertiente sur de Camagüey están divididos en depósitos de formaciones insulares (representados por depósitos rojos, aluviales y aluviales-diluviales) y depósitos intermedios acumulados en áreas laterales costeras, bajo la influencia combinada de agentes marinos e insulares (entre ellos marismas y pantanos).

INFORMACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y SU PROCESAMIENTO

Para interpretar correctamente los procesos que determinan las características de calidad del agua subterránea en la cuenca Costera Sur de Camagüey se hace imprescindible contar con suficiente información hidroquímica y realizar un adecuado tratamiento numérico de los datos; con este objetivo el INRH creó, a partir de la década del 70, una red de monitoreo de pozos (distribuida de forma relativamente homogénea) que quedó totalmente conformada a comienzos de la década del 80 y se mantiene hasta la actualidad. La red de observación hidroquímica contiene muestreo en la superficie de los pozos y en profundidad, con frecuencia de observación semestral o anual.

En el estudio hidrogeoquímico de la subcuenca Najasa, notablemente afectada por los procesos de intrusión salina, se utilizan como herramientas fundamentales la clasificación del agua según criterios químico-físicos, los índices hidrogeoquímicos, los patrones y gráficos de Stiff y la modelación hidrogeoquímica inversa, que serán detallados a continuación.

Información hidrogeoquímica y precisión de los análisis

Las muestras hidrogeoquímicas recolectadas, según las normas establecidas (NC-93-02 de 1985), son conservadas y trasladadas al laboratorio, donde se realizan las mediciones de los macroconstituyentes y los parámetros químico-físicos fundamentales. Los análisis químicos de las muestras fueron realizados por la empresa provincial del INRH, mediante los métodos estándares (APHA, AWWA, WPCF 1989).

Reviste gran importancia garantizar la precisión de los análisis químicos realizados a las muestras y en ello son empleados dos métodos de control: al comparar las sumas de aniones y cationes (en meq/L), la diferencia no debe exceder el 6% y al comparar la conductividad eléctrica real y la conductividad eléctrica teórica, calculada según Dudley (1972), el error calculado no debe exceder el 10%; en los casos en que se sobrepasan los errores permisibles, las muestras son desechadas.

Después de examinar la cantidad y calidad de la información hidroquímica en la superficie de los pozos de la subcuenca Najasa, se decidió incorporar al estudio 18 pozos de observación, que tienen la característica de poseer los mayores registros de observación y una distribución espacial más o menos homogénea, por lo que serán analizadas un total de 538 muestras. En cada una de las muestras fueron determinados los macroconstituyentes (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), las SST (sales solubles totales), el pH y la conductividad eléctrica. En la tabla 1 se presentan los pozos incluidos en el estudio de la subcuenca, sus coordenadas geográficas, el período de observación y el número de muestras superficiales tomadas en cada uno de los períodos hidrológicos.

Clasificación del agua según criterios químico-físicos

Los criterios químico-físicos se basan en destacar el contenido de los iones más abundantes en el agua analizada. Existen varios métodos de clasificación propuestos por distintos autores (Alekhine, Shchoukarev, Kurlov, entre otras). En este estudio se seleccionó el método propuesto por Kurlov, que toma en cuenta los iones que se encuentran en una proporción superior al 20%, del total de aniones o cationes.

Índices hidrogeoquímicos

En el estudio de los acuíferos cársicos afectados por los procesos de intrusión marina son ampliamente usados los índices hidrogeoquímicos y dentro de ellos se destacan las relaciones iónicas. Las relaciones iónicas permiten caracterizar las propiedades hidrogeológicas de un acuífero y determinan si están afectadas por elementos ajenos al medio geológico. Para determinar el grado de contaminación salina se utiliza la relación iónica de Simpson que parte de la relación $\text{Cl}^- / (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ en meq/L, y da lugar a la clasificación que aparece expresada en la tabla 2.

Patrones y gráficos de Stiff

El uso de relaciones matemáticas entre las concentraciones iónicas y la conductividad eléctrica se propone como base de un modelo de adquisición de la composición química del agua, lo que permite agrupar las muestras analizadas a partir de las relaciones entre ellas. Sobre la base de estos principios se elaboró el sistema automatizado BATOMET (Vinardell et al. 1995, 2001), el cual fue utilizado en este trabajo; este sistema agrupa los datos en patrones hidroquímicos y luego para cada patrón se pueden determinar las relaciones entre las concentraciones de cada ión y la conductividad eléctrica. Este programa ha sido muy usado en la caracterización y control de los acuíferos cársicos afectados por los procesos de intrusión salina.

Otra de las formas más sencillas y útiles a la hora de caracterizar el agua es a través de los gráficos hidrogeoquímicos, en este sentido se destaca el diagrama propuesto por Stiff (1951), que consiste en un sistema de ejes horizontales paralelos y un eje vertical; a la izquierda del gráfico se ubican las concentraciones de los cationes $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} y Mg^{2+} , a la derecha los aniones Cl^- ,

HCO₃⁻ y SO₄²⁻, en ambos ejes el ordenamiento es de arriba hacia abajo, expresadas en % de meq/L (ver fig. 2 y siguientes). En la confección de los gráficos de Stiff se emplea el software MODELAGUA, desarrollado en Borland Delphi 4 sobre Windows.

Tabla 1. Red de pozos de observación incluidos en el estudio de la subcuenca

no.	Pozo	Coordenadas		Observación		Nº de observaciones		
		Este	Norte	Inicio	Final	Seco	Húmedo	Total
1	B10-N	397,600	233,04	abr-90	oct-98	8	8	16
2	B8-N	393,415	232,917	abr-90	may-07	18	10	28
3	L3-N	379,417	245,732	abr-82	oct-89	8	7	15
4	6734	382,100	240,50	abr-81	may-07	21	8	29
5	8595	377,950	234,40	abr-81	oct-00	17	11	28
6	B5-N	377,492	238,016	abr-84	abr-07	23	13	36
7	B3-N	391,070	235,80	abr-84	abr-07	23	19	42
8	B4-N	386,750	233,85	abr-84	abr-07	24	19	43
9	L2-N	386,297	238,403	abr-83	abr-07	24	12	36
10	B6-N	371,400	240,05	abr-84	abr-07	23	13	36
11	613	392,207	237,896	abr-81	abr-07	24	19	43
12	761	383,920	237,30	nov-84	abr-07	20	14	34
13	611	390,390	240,50	nov-81	abr-00	17	12	29
14	C2-N	386,450	248,95	abr-81	abr-98	14	7	21
15	220	380,900	236,100	abr-81	may-07	19	9	28
16	L1-N	374,527	244,456	nov-85	may-07	15	8	23
17	B7-N	396,688	237,398	abr-90	may-07	18	12	30
18	B1-N	385,260	243,185	abr-84	may-07	16	5	21
Total						332	206	538

Tabla 2. Clasificación del agua por su grado de contaminación salina

Resultados de la relación	Denominación del agua
< 0,5	Agua normal
0,5-1,3	Agua ligeramente contaminada
1,3-2,8	Agua moderadamente contaminada
2,8-6,6	Agua bastante contaminada
6,6-15,5	Agua altamente contaminada
>15,5	Agua de mar

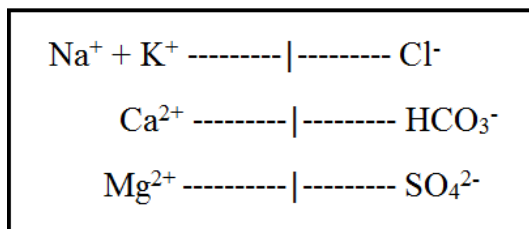


Figura 2. Esquema del diagrama propuesto por Stiff

Modelación hidrogeoquímica inversa

La modelación hidrogeoquímica consiste en aplicar los principios físicos-químicos a la interpretación de sistemas geoquímicos, su objetivo es crear o idear un modelo teórico de reacción capaz de explicar lo observado en el agua y las rocas. Se emplea un modelo de balance de masas y mezcla de agua. A partir de la información obtenida en la clasificación de agua en patrones hidrogeoquímicos y dos muestras como referencias, se determina qué proporción de cada una de las muestras de referencia interviene en la conformación del patrón, los procesos que tienen lugar en una determinada región pueden ser detectados con el empleo del delta iónico.

La modelación hidrogeoquímica inversa parte de: ecuaciones de balance de masa para cada elemento, ecuaciones derivadas de la ley de acción de masas y sus constantes de equilibrio para formación de complejos, ecuaciones que definen coeficientes de actividad de iones individuales. La modelación hidrogeoquímica inversa calcula, con base en concentraciones analíticas de iones, el estado de saturación de la solución con respecto a un determinado número de fases sólidas. A continuación se describen los programas usados para la modelación.

El sistema automatizado BATOMET (Vinardell et al. 1995, 2001) se elaboró sobre la base de las relaciones matemáticas entre las concentraciones iónicas y la conductividad eléctrica. Este programa ha sido muy usado en la caracterización y control de los acuíferos cársicos afectados por los procesos de intrusión salina. Es un sistema que agrupa los datos en patrones hidrogeoquímicos (mediante relaciones iónicas) y luego, para cada patrón, determina la relación entre la concentración de cada ión y la conductividad eléctrica; programa los rangos de conductividad eléctrica correspondientes a los diferentes patrones y se estiman entonces las concentraciones.

HIDROGEOQUIM es un sistema implementado en Windows, su objetivo es procesar datos hidroquímicos con vista a encontrar las propiedades químico-físicas del agua, que permitan su caracterización desde el punto de vista hidroquímico y obtener relaciones o índices hidrogeoquímicos que faciliten la interpretación de los procesos de interacción del agua con el medio físico-geográfico y geológico por donde se mueven; conseguir información de carácter hidrológico e hidrogeológico y evaluar la variación temporal de diferentes variables, brinda información sobre el drenaje en la cuenca.

El software MODELAGUA, desarrollado en Borland Delphi 4 sobre Windows, permite determinar el origen de la composición química del agua mediante modelos de balance de masa y mezcla de agua, así como precisar los procesos geoquímicos que originan dicha composición. Este programa permite graficar tanto los datos reales como los patrones mediante diagramas de Stiff (Fagundo-Sierra et al. 2001) y calcular la proporción de agua de mar en la mezcla agua dulce-agua de mar. El primer paso en el cálculo es la determinación del factor de concentración o el factor de mezcla según el caso, para lo cual es necesario seleccionar un ión conservativo, posteriormente se calcula el delta iónico y finalmente, determina los procesos geoquímicos que explican la composición química del agua y su cuantía.

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LA SUBCUENCA

En la subcuenca Najasa se observa un alto nivel de variabilidad en el comportamiento de las variables hidrogeoquímicas y en el cumplimiento de las condiciones químicas de potabilidad. El contenido de SST varía considerablemente, en áreas próximas al límite costero oriental se presentan los valores más elevados, en la medida en que se aleja de la costa descende su valor

hasta alcanzar las condiciones de potabilidad establecidas; le corresponde al pozo B10-N el valor medio más alto (alrededor de 3200 mg/L), en observaciones aisladas el pozo ha llegado a superar los 6200 mg/L. La posición de la isolínea 1000 mg/L ha retrocedido en el tiempo (hacia la costa), por la mejora progresiva de las características de calidad del agua en poco menos de dos décadas.

El agua de la subcuenca muestra contenidos medios de Cl^- con altos niveles de variabilidad, en áreas cercanas a la zona costera puede sobrepasar ampliamente las CMA (concentraciones máximas admisibles); los pozos B10-N, B8-N, B6-N y 613 muestran los valores más altos (hasta seis, tres, dos y dos veces las CMA, respectivamente), el pozo 613 muestra, a partir de 1993, descensos considerables en los valores reportados, comportamiento que se extiende a los pozos 611, B3-N y B4-N. En las áreas alejadas de la costa los contenidos del ión Cl^- descienden hasta valores inferiores a 100 mg/L, en el centro de la subcuenca.

La relación $\text{Cl}^- / (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ muestra que en algunas áreas de la subcuenca el agua ha estado bastante o hasta altamente afectada por el proceso de contaminación con agua de mar, los pozos B10-N, B8-N reportan las situaciones más críticas. Los pozos B7-N, B6-N y 613, más alejados de las costas, muestran un grado de contaminación menor por lo que llegan a presentar agua moderada o ligeramente contaminada con agua de mar. Los pozos B3-N y el 611, en la medida en que descendía la explotación, mostraban una disminución en la contaminación con agua de mar; en los años 80 presentaba contaminación moderada, a finales de los 90 pasó a ser ligeramente contaminada, hasta que a mediados de la década del 2000 llegó a mostrar agua de tipo normal, con valores de la relación inferior a 0,5. En la parte central de la subcuenca, hasta sus límites, el agua es generalmente de tipo normal.

Los pozos de la subcuenca muestran agua de composición química muy diversa, en las zonas costeras generalmente son de tipo clorurada; en la medida en que se avanza tierra adentro el agua generalmente es de tipo clorurada o clorurada hidrógenocarbonatada con proporciones de los cationes muy variables. A partir de principio de la década del 90 las proporciones de los aniones cambian drásticamente y muchos de los pozos comienzan a presentar agua de tipo hidrógenocarbonatada clorurada. En áreas alejadas de la zona costera, sometidas a escasa explotación, el agua es de tipo hidrógenocarbonatada clorurada, con contenidos variables de los cationes. En los límites del acuífero, o fuera de las áreas de explotación, el agua llega a ser de tipo hidrógenocarbonatada cálcica sódica ($\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$) o hidrógenocarbonatada cálcica magnésica ($\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$).

Aplicación de la modelación hidrogeoquímica inversa

La modelación hidrogeoquímica inversa fue desarrollada como una estrategia determinista para la interpretación de la composición química del agua subterránea, consiste en utilizar los datos del sistema (mineralogía, composición de gases, físico-químicos) para determinar: qué reacciones químicas han ocurrido, en qué medida han tenido lugar, las condiciones bajo las cuales ocurrieron, cómo cambiará la calidad del agua en respuesta a los procesos naturales y a las perturbaciones del sistema. Para la modelación fueron seleccionadas dos muestras referencias: agua de mar propiamente dicha y agua dulce del acuífero.

Como resultado de la modelación se pudo determinar que algunas áreas de la subcuenca presentan agua subterránea de buena calidad (alejadas de zonas costeras o de alta explotación) con muy bajos contenidos de Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} y SO_4^{2-} , como ejemplo se tiene el pozo L1-N

(fig. 3); otras áreas presentan agua con determinado nivel de afectación por los procesos de intrusión marina.

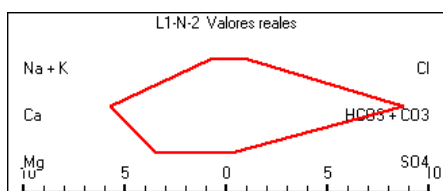


Figura 3. Gráficos de Stiff del patrón 2 del pozo L1-N

Se pudo precisar que la composición química del agua en el acuífero está determinada por las siguientes reacciones:

- ✚ Halita equivalente a cloruro de sodio (disolución) $\text{NaCl}_{(ac)} \leftrightarrow \text{Na}^+_{(ac)} + \text{Cl}^-_{(ac)}$
- ✚ Dolomita (disolución) $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(s) + 2\text{CO}_2(g) + 2\text{H}_2\text{O}(l) \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}_{(ac)} + \text{Mg}^{2+}_{(ac)} + 4\text{HCO}_3^-_{(ac)}$
- ✚ Calcita (disolución) $\text{CaCO}_3(s) + \text{CO}_2(g) + \text{H}_2\text{O}(l) \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}_{(ac)} + 2\text{HCO}_3^-_{(ac)}$
- ✚ Albita-caolinita $2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(s) + 2\text{CO}_2(g) \leftrightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(s) + 2\text{Na}^+_{(ac)} + 2\text{HCO}_3^-_{(ac)}$
- ✚ Sulfato (reducción) $2\text{CH}_2\text{O}_{(ac)} + \text{SO}_4^{2-}_{(ac)} \leftrightarrow \text{H}_2\text{S}_{(ac)} + 2\text{HCO}_3^-_{(ac)}$
- ✚ CO_2 (biogénico) $2\text{CH}_2\text{O}_{(ac)} + \text{O}_2(g) \leftrightarrow \text{CO}_2(g) + \text{H}_2\text{O}(l)$
- ✚ $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ (intercambio) $\frac{1}{2} \text{Ca}^{2+}_{(ac)} + \text{NaR}_{(s)} \leftrightarrow \text{Na}^+_{(ac)} + \frac{1}{2} \text{CaR}_{2(s)}$
- ✚ $\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-$ $\text{CO}_2(g) + \text{H}_2\text{O}(l) \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3(ac)$

La modelación fue aplicada a los 18 pozos en estudio, lo que ha permitido corroborar que esta subcuenca es la más afectada por los procesos de intrusión salina en la cuenca Costera Sur Camagüey y que estos procesos no han afectado todas las áreas por igual. A continuación se profundiza en los resultados de la modelación en los pozos más afectados por la intrusión marina.

Pozo B10-N

El pozo presenta agua de muy mala calidad. Como resultado de la modelación fueron detectados dos patrones hidrogeoquímicos, con proporción de agua de mar de 7 y 8,9%, respectivamente, en los que no se observa, en su aparición, una sucesión en el tiempo. La proporción de los macroconstituyentes en los patrones muestra que el ión Cl^- aumenta, la cantidad de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ aumentó considerablemente, sin embargo su proporción en relación con los cationes disminuye, la concentración de Mg^{2+} se incrementa cerca de dos veces y el HCO_3^- disminuye (tabla 3). Los gráficos de Stiff de los patrones presentan gran similitud, altos contenidos de Cl^- y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ y bajos los demás macroconstituyentes (fig. 4).

Tabla 3. Composición química de los patrones del pozo B10-N

Pozo B10-N		CE	CO_2	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$
Patrón # 9	meq/L	4733	2,21	7,67	37,67	3,80	6,73	5,80	36,60
	%			15,62	76,77	7,60	13,77	11,74	74,49
Patrón # 10	meq/L	5409	1,36	5,54	50,84	3,89	8,98	10,02	41,72
	%			9,51	84,25	6,24	14,73	16,31	69,76

Al estudiar las reacciones químicas que dan origen a los patrones se debe señalar que en el patrón 9 ocurre la precipitación de cantidades considerables de dolomita, junto a la disolución de

la calcita; el patrón 10 se explica por la disolución de gran cantidad de halita (cloruro de sodio), intensos procesos de transformación de la albita a caolinita y de intercambio $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ inverso.

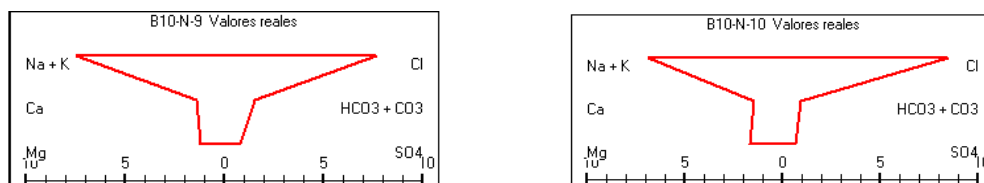


Figura 4. Gráficos de Stiff de los patrones 9 y 10 del pozo B10-N

Pozo B8-N

El pozo presenta agua de mala calidad. Las muestras tomadas se corresponden con cuatro patrones hidrogeoquímicos, resultado de la mezcla del agua dulce del acuífero con agua de mar, en proporción que varía entre 1,6 y 2,5%. No se observa en el tiempo una tendencia determinada en la aparición de los patrones. Al comparar las proporciones de los macroconstituyentes en los distintos patrones (tabla 4) se destaca el aumento del ión Cl^- y la disminución del HCO_3^- . Para ejemplificar estas variaciones se presentan los gráficos de Stiff de los patrones 7 y 10 (fig. 5).

Tabla 4. Composición química del patrón del pozo B8-N

Pozo B8-N		CE	CO_2	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$
Patrón # 7	meq/L	1463	2,18	6,05	10,38	1,00	4,20	5,40	8,31
	%			34,71	59,34	5,95	23,99	30,88	48,08
Patrón # 8		2246	1,45	5,87	14,49	1,98	5,19	4,99	12,23
	%			23,36	64,85	8,80	23,61	22,22	54,49
Patrón # 9		2083	0,42	3,37	14,58	2,15	4,47	4,30	11,92
	%			16,66	72,73	10,60	22,18	21,26	59,56
Patrón # 10		1893	0,12	1,95	16,80	2,67	5,55	5,28	10,81
	%			8,65	76,95	14,40	26,40	20,58	53,78

Las reacciones químicas que dan origen a los distintos patrones revelan el incremento gradual del contenido de halita disuelta, que en el caso del patrón 10 es 5 veces superior al patrón 7; la calcita que estaba en forma de precipitado en el patrón 7, pasa a la disolución en el patrón 10.

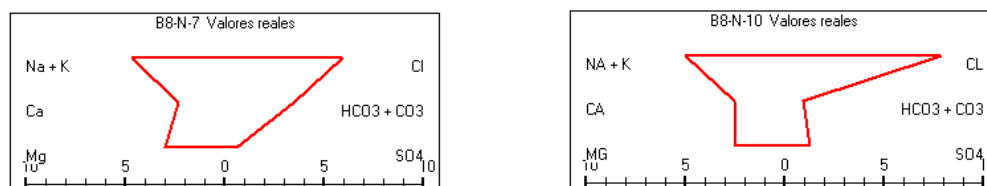


Figura 5. Gráficos de Stiff de los patrones 7 y 10 del pozo B8-N

Pozo B6-N

El pozo B6-N presenta agua de mala calidad. Como resultado de la modelación fueron determinados dos patrones hidroquímicos, con proporciones de agua de mar que varía de 1,7 a 1,8% y ciertas diferencias en las proporciones de los aniones HCO_3^- y Cl^- (tabla 5).

Las reacciones que dan origen a los patrones hidroquímicos destacan que en el patrón 8 se han incrementado las cantidades de halita (cloruro de sodio) y dolomita disueltas, junto al incremento de la precipitación de calcita y la intensificación del proceso de intercambio iónico

($\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$) inverso. Los gráficos de Stiff de los patrones 7 y 8, presentan mucha similitud (fig. 6).

Tabla 5. Composición química de los patrones del pozo B6-N

Pozo B6-N		CE	CO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺
Patrón # 7	meq/L	1770	1,77	6,04	10,26	1,44	4,44	4,51	8,84
	%			34,06	57,88	8,06	24,99	25,45	49,84
Patrón # 8	meq/L	1810	1,06	4,95	11,44	1,36	4,16	4,82	9,05
	%			27,83	64,47	7,70	23,64	27,23	50,84

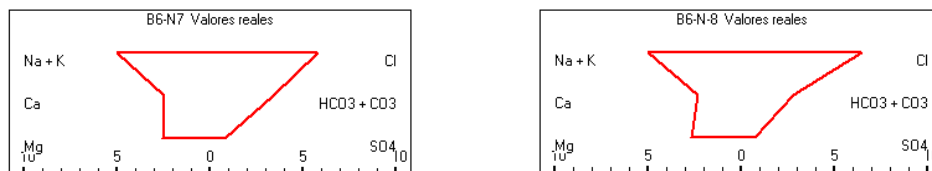


Figura 6. Gráficos de Stiff de los patrones 7 y 8 del pozo B6-N.

Pozo 613

En este pozo fueron determinados 4 patrones hidroquímicos, con proporción de agua de mar entre 0,7 y 1,8%. Al comparar las proporciones en lo distintos patrones (tabla 6, fig. 7) se destaca el incremento de los iones Cl⁻ (de 46,5 a 72,3%), aparejado a un descenso del ión HCO₃⁻ (de 46,1 a 19,5%).

Al analizar las reacciones químicas que dan origen a los distintos patrones hidroquímicos se aprecia el incremento de la cantidad de halita (equivalente a cloruro de sodio) disuelta en agua, el incremento de dolomita disuelta y la activación de los procesos que posibilitan la transformación de la albita a caolinita.

Tabla 6. Composición química de los patrones del pozo 613

Pozo 613		CE	CO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺
Patrón # 6	meq/L	1183	0,70	5,30	5,30	1,03	3,98	3,68	4,18
	%			46,11	46,53	7,36	30,79	33,15	38,63
Patrón # 7	meq/L	1740	6,96	6,59	10,24	1,13	6,13	4,65	7,25
	%			36,80	57,29	5,91	34,46	26,49	39,69
Patrón # 8	meq/L	1541	1,20	4,35	9,97	1,07	4,73	3,34	7,38
	%			28,37	65,26	6,37	28,57	22,76	49,22
Patrón # 9	meq/L	1675	0,67	3,30	11,98	1,33	4,16	4,36	8,33
	%			19,46	72,33	8,21	23,95	26,79	50,92

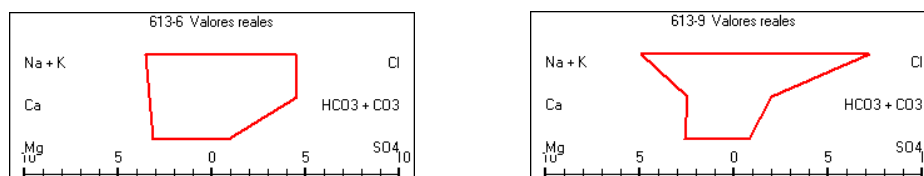


Figura 7. Gráficos de Stiff de los patrones 6 y 9 del pozo 613

Pozo B7-N

En este pozo fueron determinados cuatro patrones hidroquímicos, producto de la mezcla del agua dulce con agua salada, en proporción de agua de mar que varía entre 0,1 y 1,4%. Al comparar las proporciones de los macroconstituyentes se debe destacar el incremento de los Cl⁻,

junto al descenso de HCO_3^- y Ca^{2+} (tabla 7). En la figura 8 se presentan los gráficos de Stiff de los patrones 6 y 8, lo que permite ejemplificar los cambios en los patrones.

Tabla 7. Composición química de los patrones del pozo B7-N

Pozo B7-N		CE	CO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺
Patrón # 5	meq/L	1032	1,65	6,29	4,27	1,28	5,56	1,15	5,26
	%			53,16	36,02	10,82	46,83	9,81	44,51
Patrón # 6	meq/L	1265	1,18	5,48	5,92	1,14	5,19	1,61	6,12
	%			44,00	46,77	9,23	42,71	12,18	48,38
Patrón # 7	meq/L	1214	0,65	4,45	6,61	1,28	4,28	2,24	5,86
	%			35,79	53,61	10,60	34,17	18,21	48,00
Patrón # 8	meq/L	1283	1,18	3,78	8,91	1,25	4,15	2,50	7,28
	%			27,26	63,73	9,00	30,23	18,10	51,67

Las reacciones que dan origen a los patrones destacan la inversión del sentido de algunas reacciones químicas, en el patrón 8 se presentan la disolución de determinadas cantidades de halita y CO₂ biogénico, junto a la intensificación del proceso de disolución de la calcita.

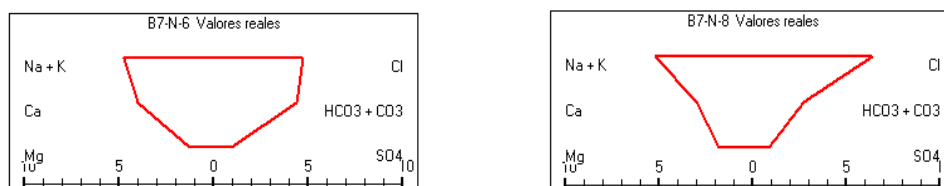


Figura 8. Gráficos de Stiff de los patrones 6 y 8 del pozo B7-N

Pozo 611

Las muestras tomadas en el pozo se agrupan en seis patrones hidroquímicos, en dependencia de la proporción de agua de mar (0, 0,1, 0,5, 0,7, 1,0 y 1,6%). Al comparar las proporciones de los macroconstituyentes destaca el incremento de los iones Cl⁻, el descenso de HCO₃⁻, junto al comportamiento prácticamente estable de las demás especies químicas (tabla 8).

Tabla 8. Composición química de los patrones del pozo 611

Pozo B7-N		CE	CO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺
Patrón # 5	meq/L	1032	1,65	6,29	4,27	1,28	5,56	1,15	5,26
	%			53,16	36,02	10,82	46,83	9,81	44,51
Patrón # 6	meq/L	1265	1,18	5,48	5,92	1,14	5,19	1,61	6,12
	%			44,00	46,77	9,23	42,71	12,18	48,38
Patrón # 7	meq/L	1214	0,65	4,45	6,61	1,28	4,28	2,24	5,86
	%			35,79	53,61	10,60	34,17	18,21	48,00
Patrón # 8	meq/L	1283	1,18	3,78	8,91	1,25	4,15	2,50	7,28
	%			27,26	63,73	9,00	30,23	18,10	51,67

La aparición en el tiempo de los patrones muestra una marcada tendencia a la disminución de la proporción de agua de mar en la mezcla agua dulce-agua salada; en la década del 80 y principios de los 90 (años de más explotación) alcanza hasta 1,6% (patrones 7 y 8), a partir de este fecha se produce la mejora progresiva de la calidad del agua, hasta no presentar mezcla con agua de mar (patrón 3). En la figura 9 se destaca la notable variación de las proporciones de los macroconstituyentes.

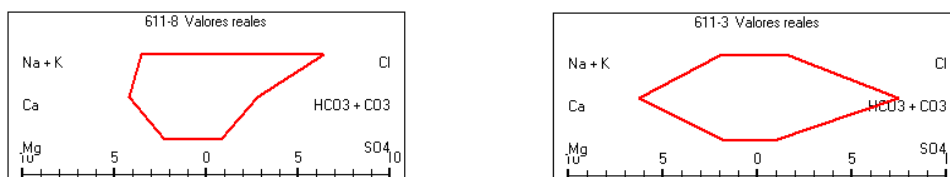


Figura 9. Gráficos de Stiff de los patrones 8 y 3 del pozo 611

Las reacciones químicas que dan origen a los patrones hidroquímicos 8 y 3 evidencian el debilitamiento de las reacciones de intercambio ($\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$) inverso, junto a cambios respecto a la halita y la dolomita, en el patrón 8 se presentaba en disolución y en el patrón 3 precipita; en relación con la calcita el proceso es contrario al descrito anteriormente.

Pozo B3-N

En el pozo se presentan seis patrones hidroquímicos, con proporción de agua de mar que varía entre 0,1 y 1,4%. La aparición en el tiempo de los patrones está vinculada a una marcada tendencia de disminución de la proporción de agua de mar, a partir de comienzo de la década del 90. En la figura 10 se muestran los gráficos de Stiff de los patrones 8 y 4, donde se observan notables cambios en las concentraciones de los macroconstituyentes.

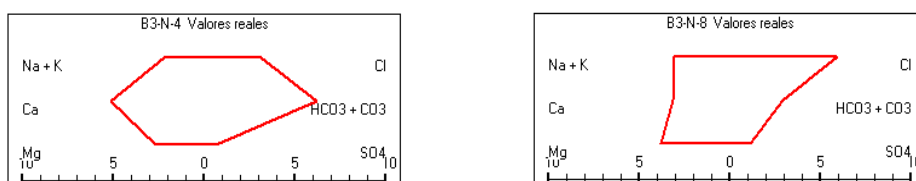


Figura 10. Gráficos de Stiff de los patrones 8 y 4 del pozo B3-N

Al examinar el comportamiento de los distintos patrones se destaca el aumento de los iones Cl^- y el descenso del HCO_3^- junto al comportamiento estable de los demás (tabla 9). Vinculados a la intensa explotación del agua subterránea en la zona (década del 80 e inicio del 90), aparecen en el pozo los patrones 8, 7 y 6; con la disminución de la explotación a partir de 1993 aparecen los patrones del 5 al 3. Las reacciones químicas que dan origen a los patrones permiten valorar que la cantidad de halita disuelta en el agua disminuye, al igual que la cantidad de calcita que precipita.

Tabla 9. Composición química de los patrones del pozo B3-N

Pozo B3-N		CE	CO_2	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$
Patrón # 3	meq/L	545	0,10	3,88	1,05	0,10	2,92	1,43	0,91
	%			77,25	20,67	2,08	58,37	27,89	18,20
Patrón # 4	meq/L	631	0,89	3,59	1,81	0,38	3,07	1,61	1,32
	%			61,90	31,19	6,91	53,81	28,70	22,02
Patrón # 5	meq/L	747	0,82	4,04	2,87	0,51	3,58	1,77	2,40
	%			54,50	38,52	6,98	49,99	24,21	31,07
Patrón # 6	meq/L	1113	0,86	4,89	5,16	0,81	4,00	2,98	4,09
	%			45,13	47,17	7,70	36,81	28,57	36,80
Patrón # 7	meq/L	1677	2,12	5,85	9,10	1,59	7,03	3,95	5,56
	%			35,46	55,02	9,52	42,98	23,50	33,52
Patrón # 8	meq/L	1829	1,13	5,10	10,35	1,96	5,50	6,60	5,31
	%			29,42	59,67	10,91	32,02	38,39	29,59

Pozo B4-N

En el pozo se presenta agua de buena calidad. Como resultado de la modelación fueron determinados tres patrones hidroquímicos, el primero no muestra contaminación con agua de mar, en los demás esta proporción es baja (0,1 y 0,2%); los patrones reflejan el incremento de los aniones Cl^- , de 20,0 a 37,3%, y el descenso de los aniones HCO_3^- , de 75,3 a 56,8% (tabla 10). Los patrones se han sucedido en el tiempo, en la década del 80 y principios de los 90 se presentan los patrones 5 y 4, después de 1993 se presenta el patrón 3. En la figura 11 se muestran los gráficos de Stiff de los patrones 5 y 3, que permiten ejemplificar los cambios en las concentraciones de los macroconstituyentes.

Tabla 10. Composición química de los patrones del pozo B4-N

Pozo B4-N		CE	CO_2	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$
Patrón # 3	meq/L	505	1,23	3,75	1,01	0,28	2,68	1,37	1,26
	%			75,32	19,96	4,72	54,30	27,12	23,71
Patrón # 4	meq/L	676	1,19	4,01	1,77	0,40	3,38	1,59	1,31
	%			65,15	28,73	6,13	56,27	4,20	21,22
Patrón # 5	meq/L	684	0,38	3,51	2,29	0,36	2,95	3,06	1,18
	%			56,79	37,29	5,93	49,66	32,51	18,56

Al examinar las reacciones que dan origen a los patrones 5 y 3, se detecta el incremento de la precipitación de la halita y el aumento de la disolución de la calcita; la dolomita que en el patrón 5 se encontraba en disolución, en el patrón 3 se presenta en forma de precipitado; en el patrón 5 ocurre el proceso inverso del intercambio ($\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$), que se hace directo en el patrón 3.

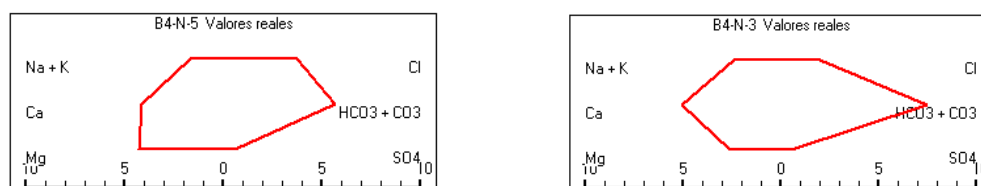


Figura 11. Gráficos de Stiff de los patrones 5 y 3 del pozo B4-N

Variación temporal de la proporción de agua de mar en la mezcla y de los plus (+ Δ) o déficit iónicos (- Δ) de Ca^{2+} y Na^+ originados por intercambio iónico

Las reacciones de intercambio catiónico pueden presentarse en los acuíferos costeros cuando existen en el terreno sólidos que poseen una gran superficie específica, capaces de absorber iones, tales como las formaciones de arcilla, minerales arcillosos y oxihidróxidos presentes. Estas reacciones tienen lugar durante la recarga, cuando el agua dulce fluye hacia el agua de mar desde el acuífero costero, lo que provoca desplazamiento de la interfaz agua dulce-agua de mar hacia el océano.

En ese proceso se libera el Na^+ intercambiable desde la superficie intercambiadora, la cual capta el Ca^{2+} o el Mg^{2+} presente en el agua subterránea. Durante la recarga el Na^+ es liberado al agua subterránea porque la relación $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ en la superficie de intercambio es mayor que la del agua dulce del acuífero.

La reacción inversa ocurre, por lo general, durante la intrusión del agua marina al acuífero, cuando el flujo de agua dulce que se mueve hacia el mar se reduce y la cuña de agua marina

avanza hacia el interior del terreno. En este caso la relación $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ en la superficie de intercambio, en la porción del agua dulce del acuífero, es más pequeña que la del agua de mar.

Los procesos de intercambio catiónico entre el agua y la superficie intercambiadora en el acuífero son significativos cuando las concentraciones relativas de los cationes son diferentes a lo largo de la línea de flujo. Los cationes de baja selectividad para el intercambio con la superficie sólida intercambiable son primeramente transportados, seguidos de los de aquellos con alta afinidad, y así sucesivamente. Este proceso es conocido como cromatografía de intercambio catiónico (Appelo y Postma 1993). Este proceso es controlado por las diferencias en el comportamiento iónico respecto a la capacidad de absorción de la superficie sólida intercambiable, la dispersividad del acuífero y el contraste entre la composición de la solución que se desplaza y la solución que es desplazada.

El término desplazamiento cromatográfico se aplica cuando la solución que ocupa los poros de un material posee iones con más baja selectividad para intercambiar con la superficie sólida que los iones de la solución reemplazante, condición que se da cuando el agua dulce con baja relación $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, desplaza al agua marina con mayores relaciones $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ y $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$. En estas condiciones, el Ca^{2+} es ofrecido con preferencia al medio por la superficie sólida intercambiadora con respecto al Na^+ y al Mg^{2+} . Un típico patrón de recarga se presenta cuando el agua dulce fluye hacia el agua salada y da lugar a un agua de tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ con una relación Na^+/Cl^- mayor de 0,55 cerca de la interfase agua dulce-agua de mar, la cual evoluciona en la dirección de la superficie de agua dulce hacia agua de tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ y hacia tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+}$.

En un reciente estudio realizado en un acuífero costero no confinado de Grecia, Panagopoulos et al. (2004) identificaron procesos de intercambio catiónico entre el calcio de los sedimentos y el sodio del agua subterránea y la presencia de nitrato y amonio sulfato adicionales originados por la fertilización de los cultivos. Estos procesos y su relación con la variación temporal de la proporción de agua dulce-agua de mar pueden ser calculados mediante los denominados plus (+ Δ) o déficit iónicos (- Δ) de Ca^{2+} y Na^+ (Fagundo et al. 1999a, 1999b), lo cual permite determinar temporalmente si en el acuífero prevalece la recarga de agua dulce (intercambio iónico directo) o la intrusión marina (intercambio iónico inverso).

En la figura 3 se muestra un ejemplo donde se manifiesta la recarga sobre la intrusión (pozo L1-N) y varios ejemplos donde prevalece la intrusión (pozos B11-V, B1-SM, 710, 11704, B10-N, B8-N, B7-N, 611, 613 y B3-N), en general existe una mayor ocurrencia del último proceso.

Variación temporal de la mezcla con agua de mar en muestras tomadas en condiciones estáticas

Con el objetivo de estudiar la variación en el tiempo de la proporción de agua de mar en la mezcla agua dulce-agua de mar en la cuenca fueron seleccionados los resultados del muestreo de las campañas fin-seco de los años 1990 y 1995 en muestras tomadas en la superficie de los pozos y en profundidad. Se emplearon los pozos de batimetría ubicados en dos perfiles en la subcuenca de Najasa: B7-N–B10-N (en dirección aproximadamente norte-sur) y B4-N–B8-N–B10-N (en dirección oeste-este).

En la tabla 11 se destaca el % de agua de mar del primer perfil. En la superficie del pozo B7-N esta proporción varió de 1,3% a 0,5% (pozo B10-N); mientras que en las muestras captadas a 50 m la salinidad varió de 19,8% a 25,5%; en el pozo B10-N no se verifica una tendencia determinada en su comportamiento. Se debe plantear que no se observa en el perfil retroceso del proceso de intrusión salina.

Tabla 11. Proporción (%) de agua de mar en los pozos B10-N y B7-N

Profundidad	Pozo B10-N		Pozo B7-N	
	1990	1995	1990	1995
Superficial	5,8	7,2	1,3	0,5
50 metros	18,1	15,8	19,8	25,5

En el segundo perfil (tabla 12) el % de mezcla varió tanto en superficie como en profundidad. El pozo B4-N muestra una ligera mejoría de la calidad del agua a distintas profundidades, en la superficie varía de 0,2 a 0,1% y a 50 m de profundidad de 0,3 a 0,2. En el pozo B8-N se observan cambios significativos en la proporción de agua de mar presente a distintas profundidades, en superficie varió de 3,4 % a 2,3 %, a 20 m de profundidad de 11,2 a 10,0 % y a 50 m de profundidad varió de 31,2 a 26,7%. Los cambios en el pozo B10-N fueron señalados anteriormente. Estas variaciones se deben fundamentalmente a las diferencias ocurridas en el régimen de explotación.

Tabla 12. Proporción (%) de agua de mar en los pozos B4-N, B8-N y B10-N

Profundidad	Pozo B4-N		Pozo B8-N		Pozo B10-N	
	1990	1995	1990	1995	1990	1995
Superficial	0,2	0,2	3,4	2,3	5,8	7,2
20 metros			11,2	10,0		
50 metros	0,3	0,2	31,2	26,7	18,1	15,8

CONCLUSIONES

1. En la subcuenca Najasa varían las SST desde menos de 500 mg/L hasta más de 6300 mg/L, los Cl^- desde menos de 100 mg/L hasta más de 900 mg/L, la relación $\text{Cl}^- / (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ desde menos de 0,5 hasta 18,4. El agua es mayoritariamente de tipo hidrógenocarbonatada clorurada cálcica magnésica; pero en zonas costeras o de intensa explotación es clorurada con proporciones de cationes muy variables.
2. La composición del agua en la subcuenca Najasa está determinada por la disolución de la halita, equivalente a cloruro de sodio, disolución de la dolomita, disolución de la calcita, transformación de la albita-caolinita, reducción de sulfato, CO_2 (biogénico), intercambio $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ y $\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-$ (en dependencia de las condiciones químico-físicas del medio, se favorece el proceso directo o inverso). En la cuenca se presenta agua propiamente del acuífero y agua con diferentes proporciones de agua de mar (hasta cerca del 9%); la subcuenca Najasa es la más afectada por los procesos de intrusión salina.
3. Los cambios en la composición química del agua en el tiempo no han sido homogéneos en toda la subcuenca Najasa, aunque se debe plantear que, en sentido general, han mejorado sus características de calidad.

REFERENCIAS

- APHA, AWWA, WPCF** (1989). Standards Methods for the Examination of Water and Waste Water. US agencies.
- Appelo, C.A. and Postma J.D.** (1993). "Geochemistry, groundwater and pollution". Balkema, Rotterdam, Brookfield (ed.), Netherlands.
- Dudley, J.R.** (1972). "Reability of Water Analysis". General Technical Department Report. TDR No 09271, pp. 27.
- Fagundo, J.R.; González, P.; Jiménez, S.; Benítez, G.; Ferrera, V.; Ramírez, J.; González, A.; Romero, E.; Orihuela, D.; Ramírez J. y Suárez M.** (1999a). "Metodología para la caracterización geoquímica de los acuíferos cársicos costeros. II. Identificación de los procesos de mezcla y modificación de las facies hidroquímicas", en: Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, Editorial ISCTN (CITMA), 182-191.
- Fagundo, J.R.; González, P.; Benítez, G.; Jiménez, S.; Santiesteban, E. R.; González, A. y Romero E.** (1999b). "Procesos y patrones hidrogeoquímicos en acuíferos cársicos costeros", en: El Caribe, contribución al conocimiento de su geografía, Editorial Instituto Geografía Tropical, CITMA, 40-47.
- Fagundo-Sierra, J.; Fagundo, J.R; González P. y Suárez, M.** (2001). "Modelación de las aguas naturales". Contribución a la educación y la protección ambiental. ISCTN, 2 (VII Taller).
- Panagopoulos, G.; Lambrakis N.; Tsohis-Kartagas P. and Papoulis D.** (2004). "Cation exchange processes and human activities in unconfined aquifer". Environmental Geology. 46 (5) 542-552.
- Stiff, H. A.** (1951). "The interpretation of chemical water analysis by means of pattern". Jour., Petroleum Technology. 3 (10): 15-17.
- Vinardell, I.; Álvarez, E. y Fagundo, J.R.** (1995). "Sistema automatizado para el control de las aguas cársicas afectadas por la intrusión marina mediante reconocimiento de patrones, BATOMET", en Pulido-Bosch, A., Fagundo, J. R y Rodríguez J. (eds.). El Karst y los acuíferos Kársticos, ejemplos y métodos de estudio, Universidad de Granada, España, 251-256.
- Vinardell, I.; Tillán, G.; Fagundo, J.R.; Álvarez, E. y Ontivero, E.** (2001). "HIDROCLASWIN: Separación por patrones hidrogeoquímicos para la clasificación de las aguas naturales". Contribución a la educación y la protección ambiental. ISCTN, La Habana, (IV Taller). 2, 164-167.