

# **CALIDAD DEL AGUA Y PROCESOS GEOQUÍMICOS EN CUENCA SUR DE LA HABANA**

**J.R. Fagundo<sup>1</sup>, P. González<sup>1</sup>, S. Jiménez<sup>2</sup>, M. Suárez<sup>1</sup>, C. Melián<sup>1</sup>**

**1. Centro de Medicina Natural y Tradicional. Ministerio de Salud Pública.**

**2. GEOCUBA. Investigaciones y Consultoría.**

## **RESUMEN**

En un estudio de control y seguimiento realizado entre 1984 y 1987, se puso de manifiesto que las aguas de abasto público de la Cuenca Sur de La Habana, antes de la construcción del Dique Sur fueron experimentando un deterioro paulatino de su calidad por aumento de salinidad, contenido de cloruro y dureza, como resultado de la penetración marina al acuífero, hecho este inducido por la actividad humana en la cuenca. Los estudios realizados después de la construcción del dique (1985-1992) permitieron corroborar que existe una disminución apreciable de la salinidad de las aguas. Mediante un estudio específico (1997-1998) fueron identificados los principales procesos geoquímicos que controlan la composición química de las aguas en las diferentes zonas hidrogeológicas del acuífero cársico. Entre estos procesos se destacan: oxidación de sulfuros y de la materia orgánica con generación de CO<sub>2</sub>, fundamentalmente en la zona no saturada del acuífero; reducción anaeróbica de sulfatos, especialmente en las zonas media y profunda de los pozos cercanos a la zona cenagosa; disolución y precipitación de calcita y dolomita en la zona de mezcla; intercambio iónico, tanto de carácter directo como inverso, así como otros procesos inherentes a la mezcla. Además de los factores hidrogeológicos y climáticos, el fuerte impacto de la actividad humana (explotación, vertido de residuales, construcción de obras hidrotécnicas) influye de manera destacada en la

calidad del agua que se utiliza en la región con fines agrícolas y de abasto a la población.

**Palabras claves:** procesos geoquímicos, acuíferos kársticos costeros, calidad de agua.

## **ABSTRACT**

By means of a systematic monitoring during 1984-1987 at the Havana Southern Basin of La Havana, the behavior of the water quality for population supply was study. An increase of mineralization, hardens and chloride contents before the Southern dike construction was observed, but after them (1985-1992) an improvement of the resource quality was obtained. The main geochemical processes which determine the chemical composition of water from different hydrogeological zones at the karstic aquifer were identified by means of specific study (1997-1998). These processes are the followings: sulfide and organic matter oxidation at the unsaturated zone of the aquifer; sulfate anaerobic reduction, especially at the middle and deep level of the walls located near of the swamp; calcite and dolomite dissolution or precipitation; direct and inverse ion exchange, as well as other processes connected with the fresh-sea water mixture. The modification processes of the chemical composition are demonstrated comparing the data with the conservative mixture results. In addition to the hydrogeological and climatic factors, the human impact (aquifer overexploitation, hydrotechnical constructions, wastewater input) play a significant roll over the water quality used for agricultural and population supply purpose.

**Keywords:** geochemical processes, coastal karstic aquifers, water quality.

## INTRODUCCIÓN

El territorio que ocupa las provincias La Habana y Ciudad de la Habana, donde se desarrolla una intensa actividad agrícola para el abastecer de alimentos a ambas provincias y especialmente a la población de la capital de la Isla, se caracteriza por la presencia de extensas cuencas subterráneas constituidas por acuíferos cársicos. Más del 85 % del agua que se explota en estas provincias se extrae de fuentes subterráneas (Francisco-Santiago, 1990). Aunque la mayor parte del agua que se utiliza para el abasto de la población habanera procede de cuencas cerradas, limitadas por parteaguas sin contacto con el mar (Ariguanabo, Vento, Jaruco - Aguacate, etc.), una parte del abasto se toma de cuencas cársicas abiertas, en contacto hidráulico con el mar (cuencas Norte y Sur de La Habana). Si bien la calidad hidroquímica de las primeras es excelente, caracterizada por el predominio de facies hidrocarbonatada cálcica, las aguas que provienen de las cuencas litorales poseen mayor contenido de iones cloruro, sulfato, magnesio y sodio que proceden del agua marina, especialmente en aquellas áreas donde es más intensa la explotación, como resultado de la intrusión marina inducida por esta actividad; así como una dureza más elevada como consecuencia del efecto salino que provoca una mayor disolución de los carbonatos. Otras modificaciones importantes de la composición química, que origina la mezcla agua dulce – agua de mar, se debe a procesos de reducción anaeróbica de sulfato, intercambio iónico y procesos de disolución y precipitación de carbonatos, especialmente en zonas ocupadas por humedales, donde existe un notable aporte de materia orgánica (González, 2002).

En este trabajo se presentan los resultados de la caracterización hidroquímica de las aguas cársicas de los acuíferos desarrollados en el tramo hidrogeológico Güira – Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana, antes y después de la construcción del Dique Sur, así como de un estudio detallado efectuado en el año hidrológico 1997-1998 sobre los procesos geoquímicos que originan la composición química de estas aguas.

### **Breve bosque histórico sobre el abasto de agua a de la ciudad de La Habana.**

Los pobladores de la ciudad de La Habana, desde su fundación en 1515 (con el nombre de San Cristóbal de La Habana) en la costa sur de la actual provincia La Habana, hasta la fecha, han buscado soluciones prácticas para resolver el abasto de agua potable. A principios se surtían de las cristalinas aguas del río Mayabeque y a partir de 1519, en que se traslada para las cercanías de la bahía, en lo que hoy constituye el casco histórico de la ciudad, utilizaron aljibes para el almacenamiento de agua de lluvia y trasladaba aguas en mulos o en chalupas desde el río Casiguaguas, hoy conocido como Almendares (Lugo y Torres, 1992).

Con el creciente aumento de la población habanera, fue necesario la búsqueda de nuevas soluciones para el abasto de agua. Así la primera obra de ingeniería con este objetivo fue creada e 1592, denominada Zanja Real. Se trataba de una zanja de 8480 m de longitud, la cual trasladaba desde una presa (El Husuillo) construida en las márgenes del río Almendares, el agua hasta la ciudad. En el transcurso del tiempo, esta solución no cubrió las necesidades tanto en cantidad como en calidad. Los desechos de la incipiente actividad agrícola e industrial, junto al arrastre de los ríos durante las crecidas provocaron numerosas epidemias. Entonces se creó el

acueducto Albear, nombrado así en homenaje al ingeniero que lo construyó, obra la hidráulica maestra para la época. Desde los manantiales de Vento, que emergen en el cauce del río Almendares, las aguas son conducidas por gravedad hasta la loma de Jacán donde son almacenadas en grandes estanques (Palatino) y desde allí se distribuye, incluso hoy, a parte de la ciudad.

Durante la etapa republicana unos acueductos fueron ampliados (Vento) y otros nuevos creados (Aguada del Cura, Cosculluela, Cuenca Sur). En 1954 se perforaron 20 pozos en los alrededores de Quivicán, en la Cuenca Sur de La Habana, los que con posterioridad se ampliaron a más de 25. A partir de este campo de pozos se logró incorporar a los tanques de Palatino más de 22 000 m<sup>3</sup>/día de agua, mejorando el abasto de la ciudad.

Después del triunfo de la Revolución nuevos acueductos se han incorporado al sistema de abasto de la capital: Ariguanabo, Cuatro Caminos, El Cotorro y El Gato, este último en la Cuenca Jaruco – Aguacate, en el límite con la provincia de Matanzas (Lugo y Torres, 1992). En estos momentos se dispone de suficiente capacidad para satisfacer las necesidades de la población capitalina y ahora los esfuerzos se dirigen a alcanzar mayor eficiencia mediante la rehabilitación de las redes, para evitar las pérdidas por fuga de una parte significativa del agua que procede de las diferentes fuentes.

### **Marco geográfico, geológico e hidrogeológico**

El área estudiada pertenece al sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de la Habana, ubicado entre las coordenadas N 320-345 y E 340-370. Dicha área posee una superficie de unos 50 km<sup>2</sup> y sus cotas absolutas varían entre 1.00 y

2.00 m sobre el nivel de mar. La región está constituida por rocas carbonatadas muy carsificadas de edad Neógeno, pertenecientes a las formaciones Jaruco, Husillo, Cojimar y Güines. Estas rocas son muy acuíferas, su transmisividad varía entre 5000 y 50000 m<sup>2</sup>/d, mientras el coeficiente de almacenamiento alcanza valores desde 0.15 en condiciones de acuífero libre, hasta 0.005 en condiciones de semiconfinamiento (González, 1997).

Las precipitaciones medias anuales en esta área son de 1398 mm (Barros y León, 1997), algo menores que la media nacional. A pesar del volumen de lluvia, el buen drenaje de los suelos, el alto grado de carsificación de las rocas; así como la gran transmisividad del acuífero, existe un déficit de recursos hídricos en este sector de la cuenca debido a varias razones. En la década del 70 se realizaron obras de canalización que incrementaron el drenaje de las aguas subterráneas de la zona cenagosa, lo cual provocó un desplazamiento de la interfaz agua dulce-agua de mar tierra adentro. Otro factor que ha contribuido a la salinización de las aguas subterráneas en la región es la intensa explotación a que ha sido sometido el acuífero para el abasto a la población habanera y para el riego de las plantaciones agrícolas (Fagundo y González, 1999). Los acueductos agrupados en un campo de pozos han llegado a extraer un caudal del orden de 3.2 m<sup>3</sup>/s y los sistemas de riego de 3.5 m<sup>3</sup> (López, 1992, en: Jiménez et al, 1997). Entre los años 1984 y 1987 se alcanzaron los valores máximos de explotación en este territorio. Esta situación, unida a una disminución en el régimen de lluvia por debajo de la media anual, incrementó aún más la intrusión marina en el acuífero, por lo cual se tomaron medidas correctoras tales como la regulación del régimen de explotación, la

construcción del Conjunto Hidráulico Pedroso-Mompostón-Güira consistente en un sistema de presa y derivadora que conduce el agua superficial a través de un canal para uso agrícola en el área; así como la construcción del Dique Sur, consistente en una barrera impermeable que sobresale entre 1.0 y 1.5 m sobre el nivel del mar. Todo ello, junto al restablecimiento del régimen normal de precipitación, ha contribuido a aumentar el nivel del agua subterránea, desplazar la interfaz agua dulce-agua de mar hacia la costa y mejorar la calidad de las aguas (González y Feitó, 1997; Jiménez, 1999).

## **MATERIALES Y METODOS**

Para el desarrollo de este trabajo se llevó a cabo dos tipos de estudio, uno de control y seguimiento, en el período comprendido entre 1984 y 1987 (anterior e inmediato a la construcción del Dique Sur) y otro, de carácter específico, entre 1997 y 1998. En el primer caso se tomaron 373 datos hidroquímicos correspondientes a los muestreos efectuados en 28 pozos de abasto, pertenecientes a la Red de Control de Calidad del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH),

Para el desarrollo del segundo tipo de estudio se estableció, en el área, una red de observaciones sistemáticas para el monitoreo de los niveles piezométricos y la calidad de las aguas y fue seleccionado un perfil de pozos orientados en dirección N-S (Fig. 1). Las muestras fueron tomadas mensualmente a partir del mes de enero de 1997 hasta junio de 1998, en tres niveles de profundidad, representativos de las zonas de agua dulce, de mezcla y de contacto entre el agua dulce y el agua de mar. Los pozos seleccionados fueron: Playa Cajío (0.20 km de la costa, cota topográfica 0.91 m, muestreo a los niveles de 2, 17-18 y 19-23 m); Alvaro Barba (2.5 km de la

costa, cota topográfica 1.87 m, muestreo a los niveles de 3, 23-25 y 34 m) y Sotolongo Díaz (9.0 km de la costa, cota topográfica 10.86 m, muestreo a los niveles de 10-11, 40-43 y 50 m). Como referencia se tomaron aguas del pozo Rancherita (20 km de la costa, cota topográfica 20 m) a 20 m de profundidad (agua dulce) y agua de mar de la Playa Cajío.

Los registros de conductividad eléctrica a diferentes profundidades se realizaron con un equipo ORISON 524 con 100 m de cable, tomándose las muestras mediante hidrocaptadores modelo SEBA de nacionalidad alemana.

Las mediciones de los parámetros físico - químicos se realizaron "in situ" mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424 marca HANNA y oxímetro HANNA modelo HI 914. Los contenidos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, así como la alcalinidad total (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) fueron también determinados en el campo, mientras que los restantes macroconstituyentes (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomada la muestra. Las marchas analíticas se efectuaron mediante las técnicas analíticas estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1989). Los iones Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> fueron determinados por fotometría de llamas (fotómetro marca SOLAR 919 de la UNCAM).

La calidad de los datos fue validada mediante el balance iónico y el cálculo de las conductividades eléctricas teóricas basado en el modelo de Miller et al (1986), implementado en el sistema informático HIDROGEOQIM (Fagundo-Sierra et al, 2003). Con el mismo se determinó el tipo de agua en cada pozo, así como la variación temporal de la mineralización.





Figura 1a. Mapa de localización muestreo.

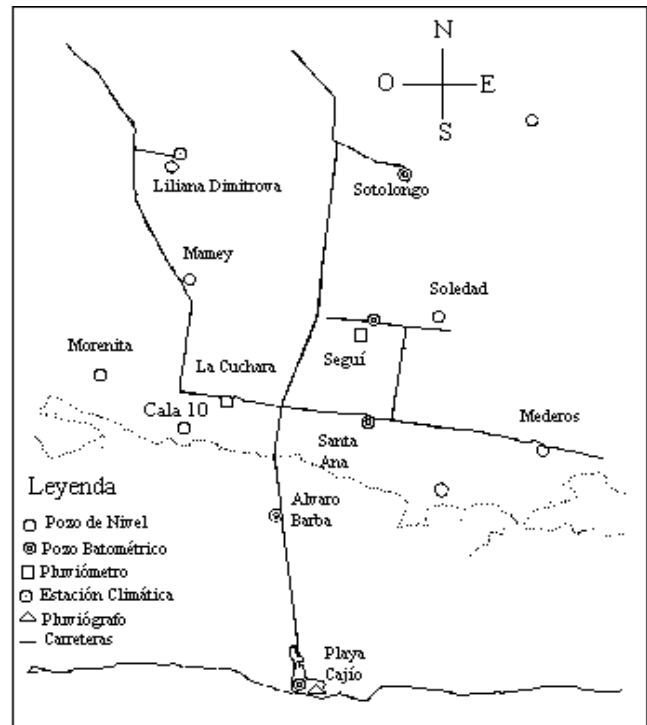


Figura 1b. Ubicación de los puntos de muestreo.

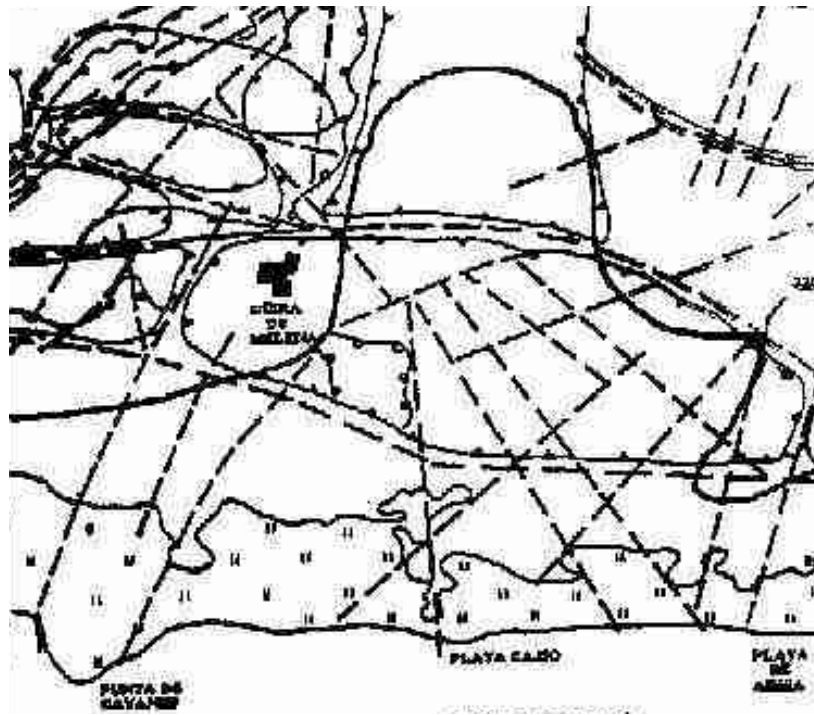
Los diferentes patrones hidrogeoquímicos fueron identificados mediante un sistema de reconocimiento de patrones que separa previamente los datos a partir de la relación iónica  $Cl^- / HCO_3^-$  (Vinardell et al, 1998). Estos patrones son expresados mediante relaciones estequiométricas del tipo  $Na^+ + K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+} - Cl^- : HCO_3^- : SO_4^{2-}$  a partir de las concentraciones en tanto por diez de meq/l de las aguas (Fagundo, 1996). Los procesos geoquímicos fueron determinados aplicando MODELAGUA (Fagundo-Sierra et al, 2001), software basado en un modelo de balance de masas y mezcla, mediante el cual se representan también, en forma gráfica, los diferentes patrones. El resto del procesamiento se efectuó utilizando EXCEL.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Calidad de las aguas de los pozos de abasto antes y después de la construcción del Dique Sur

Como resultado de las condiciones adversas a que se ha hecho referencia con anterioridad (mayor drenaje en la cuenca debido a la construcción de canales, aumento de la densidad de carsificación, disminución del régimen de lluvia, sobreexplotación del acuífero), se fue produciendo hasta 1987, un paulatino deterioro de la calidad de las aguas en la cuenca como resultado de la penetración del agua de mar. En el período 1984 – 1987 se alcanzaron los valores máximos de explotación en el territorio (Jiménez et al, 1997), el caudal sumario extraído para el abasto a la población y con fines agrícolas fue del orden de  $6.7 \text{ m}^3/\text{s}$ . La intrusión marina, expresada por la curva de 1 mg/l de sólidos solubles totales llegó a penetrar 12 km tierra adentro (Fig. 2). Con esa mineralización, el contenido de cloruro en aguas era superior a 250 mg/l.

Al estudiar la calidad de las aguas en cada uno de los pozos utilizados para el abasto a la población capitalina, se observó que en una parte de los mismos la composición sufría fluctuaciones estacionales relacionadas con el ciclo hidrológico (13 pozos), mientras que en otra parte existía una tendencia al incremento de la mineralización con el tiempo (15 pozos). En la figura 3 se muestra este comportamiento en dos pozos tomados de referencia. Por otro lado, las facies hidroquímicas típicas variaron entre hidrocarbonatadas cálcicas ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ) hasta cloruradas hidrocarbonatadas sódicas cálcicas ( $\text{Cl} > \text{HCO}_3\text{-Na} > \text{Ca}$ ).



!-----!  
6 km

Figura 2. Mapa morfoestructural donde se aprecia las principales fracturas y la curva de mineralización de 1g/l para el sector Güira-Quivicán (Tomado de Rocamora et al, 1997).

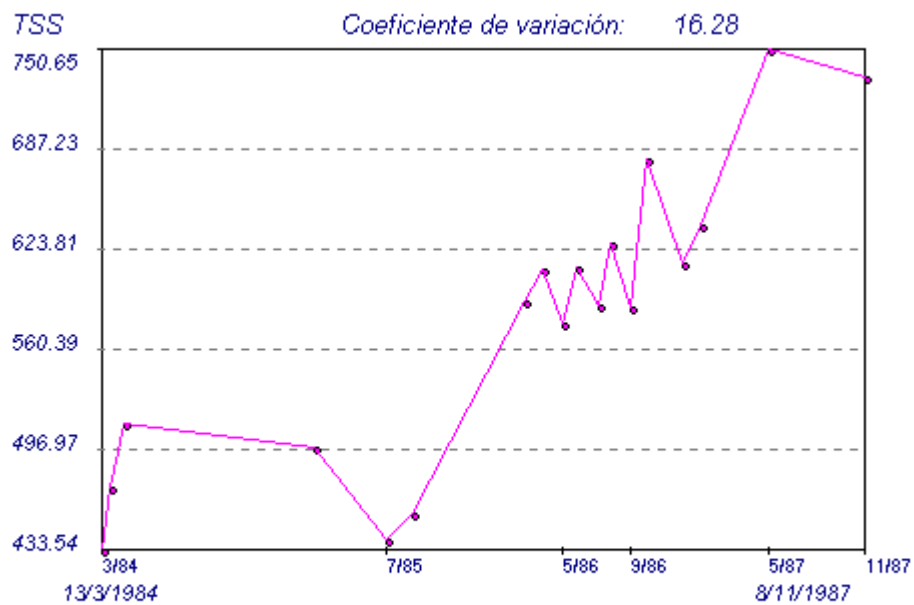
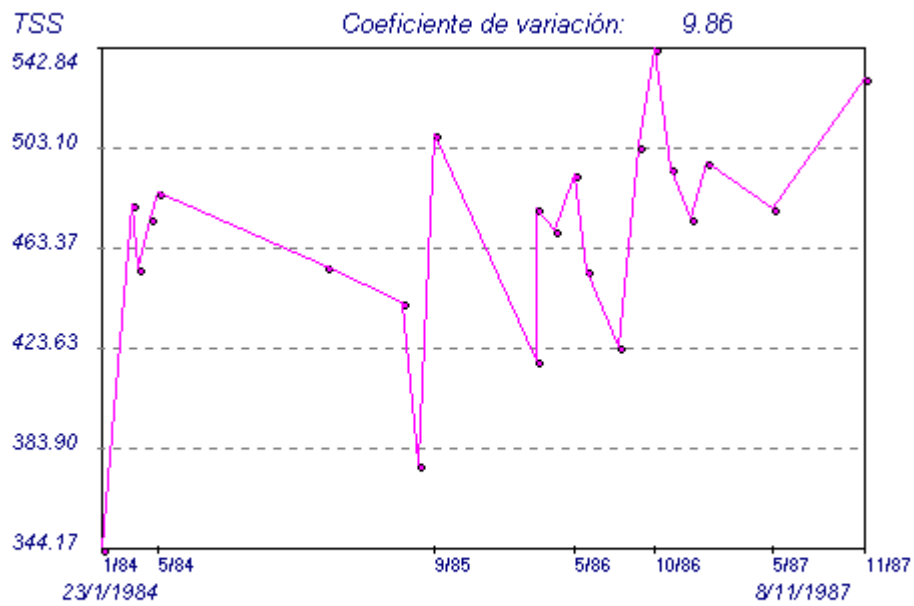


Figura 3. Variación temporal del Total de Sólidos Solubles en dos pozos representativos de la Cuenca Sur de La Habana: a) con tendencia a la fluctuación estacional del TSS; b) con tendencia al incremento temporal del TSS.

En la tabla 1 se presentan los contenidos de Cl<sup>-</sup>, TSS y CaCO<sub>3</sub> (mg/l) de las aguas del acueducto Cuenca Sur de La Habana, correspondientes a los datos previamente separados por patrones hidrogeoquímicos.

Tabla 1. Contenidos de cloruro, total de sólidos disueltos y dureza (en mg/l) de las aguas de abasto público de la Cuenca Sur de La Habana, previa separación de los datos mediante un sistema de reconocimiento de patrones.

Patrón	N	Cl <sup>-</sup> (mg/l)		TSS (mg/l)		CaCO <sub>3</sub> (mg/l)		Patrón hidrogeoquímico	Tipo de agua
		Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango		
2	31	25.7	18.1-35.1	453	392-595	261	236-316	181 - 181	HCO <sub>3</sub> -Ca
3	83	38.3	26.9-70.9	444	305-657	257	183-341	181 - 271	HCO <sub>3</sub> -Ca
4	74	67.0	34.0-103.9	486	345-619	270	214-339	271 - 361	HCO <sub>3</sub> >Cl-Ca
5	77	90.1	34.0-135.8	520	335-681	273	173-371	361 - 361	HCO <sub>3</sub> >Cl-Ca>Na
6	77	135.8	34.0-201.7	603	403-778	311	191-444	361 - 451	HCO <sub>3</sub> >Cl-Ca>Na
7	28	207.7	69.8-262.7	715	475-920	324	230-400	451 - 541	Cl>HCO <sub>3</sub> -Ca>Na
8	3	279.3	259.5-289.7	813	782-858	354	326-379	451 - 631	Cl>HCO <sub>3</sub> -Na>Ca
Total	373	88.4	18.1 - 298.7	525	305 - 920	280	173 - 444	271 - 361	HCO <sub>3</sub> >Cl-Ca>Na

Como puede apreciarse en la tabla 1, la calidad media de las aguas de la Cuenca Sur de La Habana en el período estudiado, es aceptable de acuerdo a la norma cubana de potabilidad (NC: 93-02: 1985), ya que tanto los cloruros (Cl<sup>-</sup> < 200 mg/l), como la mineralización (TSS < 1 g/l) y la dureza (CaCO<sub>3</sub> < 400 mg/l) se encuentran por debajo de los contenidos máximos admisibles y el tipo de agua es hidrocarbonatada clorurada cálcica sódica. Sin embargo, los valores medios de cloruro de las aguas agrupadas en los patrones hidrogeoquímicos 7 y 8, así como los valores máximos de dureza de las aguas agrupadas a partir del patrón hidrogeoquímico 6 sobrepasan los contenidos máximos admisibles en dicha norma. Por otro lado, la tendencia creciente al aumento de la mineralización en un número significativo de pozos (figura 3), demuestra que la calidad del agua de abasto en ese período confrontó un estado crítico. En la figura 4 se representan los patrones hidrogeoquímicos mediante diagramas de Stiff (1951).

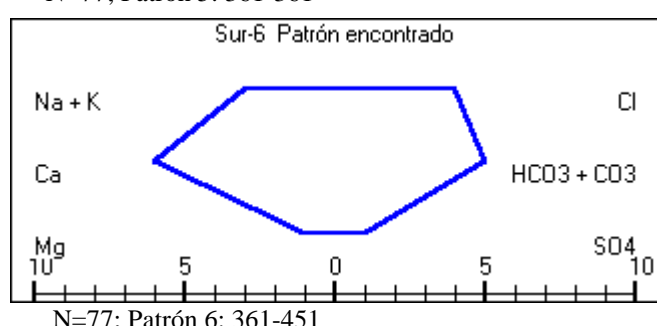
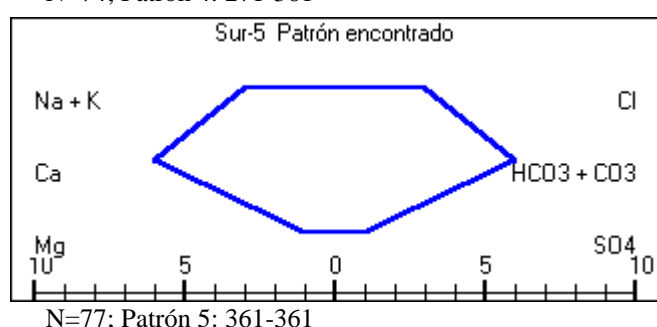
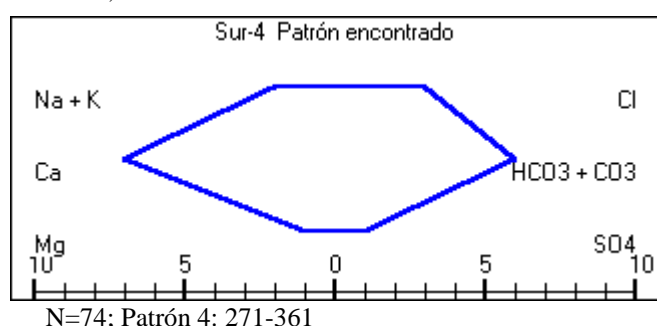
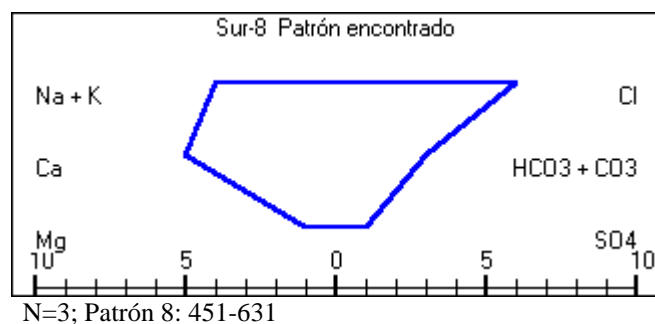
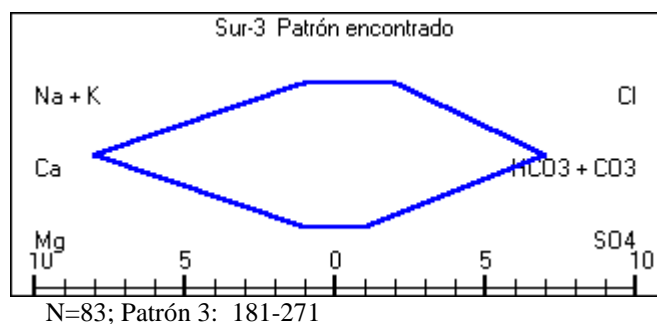
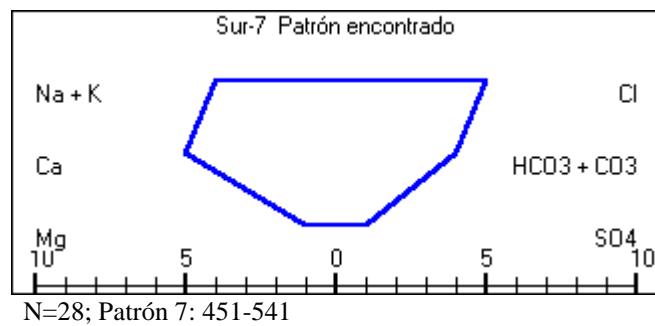
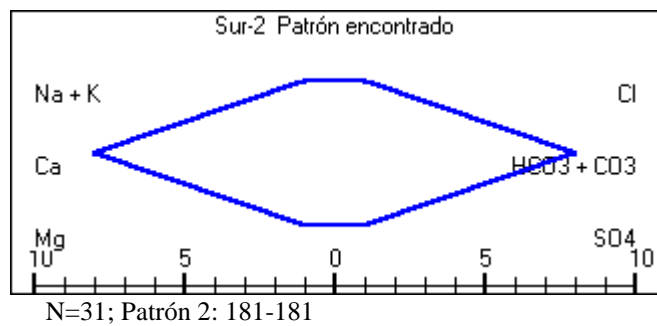


Figura 4. Patrones hidrogeoquímicos de las aguas de abasto de Cuenca Sur de La Habana representados mediante diagramas de Stiff.

Sin embargo, a partir de las medidas tomadas para mitigar la situación adversa en la cuenca y en especial, la construcción del dique (8/85), se ha observado una mejoría en la calidad del recurso, tal como lo demuestran González y Feitó (1997), cuyos resultados se exponen en la tabla 2.

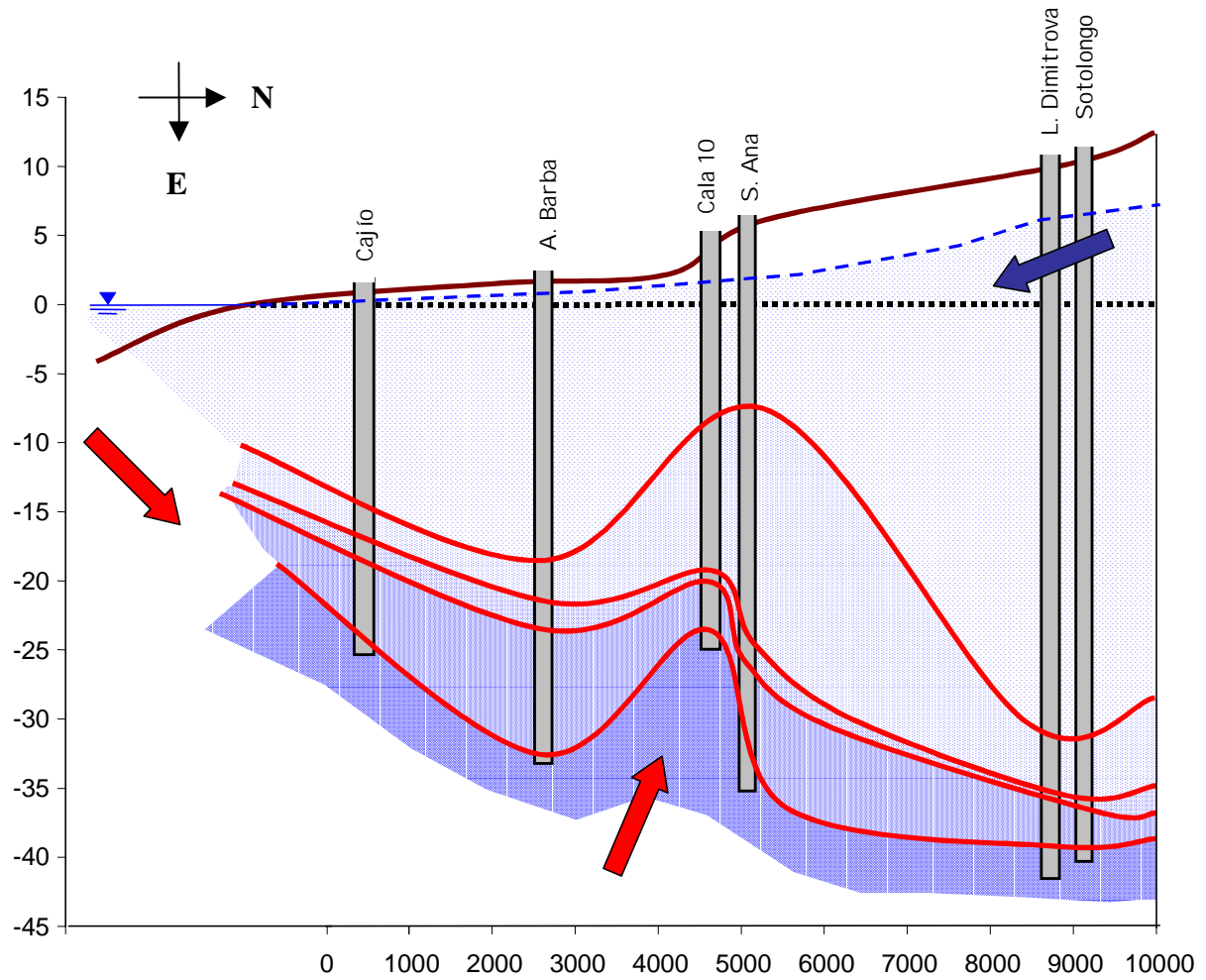
Tabla 2. Resultados de los muestreos realizados en Cala 1 Cuenca Sur de La Habana). Tomado de González y Feitó (1997).

Fecha demuestro	Cloruros (mg/l)	Tiempo transcurrido después de la construcción del dique	% de reducción de cloruro
Abril/86	10.0	- - - - -	----
Junio/86	5.0	2 meses	50
Septiembre/86	3.0	5 meses	70
Diciembre/87	5.0	20 meses	80
Noviembre/90	1.2	54 meses	88

### **Procesos geoquímicos y composición química de las aguas**

Para determinar el origen de la composición química de las aguas que ocurren en el acuífero cársico costero de la Cuenca Sur de La Habana, se realizó un estudio específico, mediante el cual se midieron parámetros químicos y físicos “in situ” y se tomaron mensualmente, a diferentes profundidades, muestras de aguas en pozos de observación, las que fueron analizadas de inmediato en el laboratorio (Fig. 1b),

Las características químico-físicas de las aguas en el acuífero Güira-Quivicán, tomando en consideración sus propiedades geológicas e hidrogeológicas, dependen de tres factores principales: la recarga en la zona de alimentación, determinada por el régimen de lluvia y de organización interna del acuífero; el aporte del humedal, también relacionada con las precipitaciones, y la intrusión marina, asociada tanto a las lluvias como al grado de explotación del acuífero (Fig. 5).




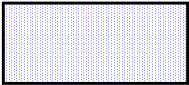
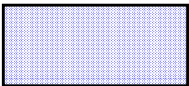

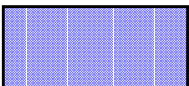
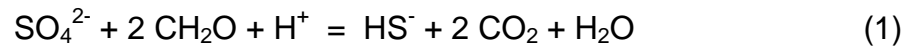
- 
 II y III. Aguas con baja salinidad (0.2-5 % de mezcla). Aguas del tipo:  
 $\text{HCO}_3\text{:Ca-Na}$ ,  $\text{HCO}_3\text{-Cl:Ca}$ ,  $\text{HCO}_3\text{-Cl:Ca-Na}$ ,  $\text{Cl-HCO}_3\text{:Ca-Na}$ ,  $\text{Cl-HCO}_3\text{:Na-Ca}$ ,  $\text{Cl:Na}$
- 
 IV a. Zona de mezcla, parte alta (2-23.7 % de mezcla). Aguas del tipo:  
 $\text{Cl-HCO}_3\text{:Ca-Na}$ ,  $\text{Cl-HCO}_3\text{:Na-Ca}$ ,  $\text{Cl-HCO}_3\text{:Na}$ ,  $\text{Cl:Na}$
- 
 IV b. Zona de mezcla, parte baja (20.3-61.8 % de mezcla). Aguas del tipo:  
 $\text{Cl-HCO}_3\text{:Ca-Na}$ ,  $\text{Cl-HCO}_3\text{:Na-Ca}$ ,  $\text{Cl:Ca-Na}$ ,  $\text{Cl:Na}$
- 
 V. Zona de interfaz agua dulce-agua de mar (48.3-100 % de mezcla). Aguas del tipo:  
 $\text{Cl:Ca-Na}$ ,  $\text{Cl:Na}$
- 
 VI. Zona de agua de mar (100 % de mezcla). Aguas del tipo:  
 $\text{Cl:Na}$

Figura 5. Comportamiento de la facies hidroquímicas en el perfil sur-norte y en profundidad para el sector hidrogeológico Güira-Quivicán (Cuenca Sur de la Habana), en el período de enero de 1997- julio de 1998 (González, 2003).

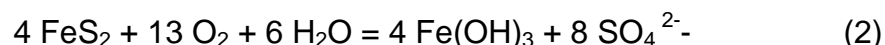


La presencia del humedal, favorece en la zona de mezcla, los procesos de reducción del sulfato procedente del mar por acción de las bacterias sulforeductoras. Este proceso de tipo biogeoquímico (Bitton, 1994) puede ser esquematizado mediante la reacción:



Donde  $\text{CH}_2\text{O}$  representa la materia orgánica. En este proceso, por cada meq/l reducido de  $\text{SO}_4^{2-}$  se producirán iguales cantidades en meq/l de  $\text{HCO}_3^-$  y de  $\text{S}^{2-}$  en el agua (Shoeller, 1962). Dicho proceso puede favorecer la disolución de la calcita en el acuífero y el sulfuro originado puede producir  $\text{H}_2\text{S}$ , confiriéndole malos olores al agua, o precipitar en forma de pirita por acción del  $\text{Fe}^{2+}$  presente en los sedimentos (Custodio y Llamas, 1976; Giménez, 1994). Según Ghazban et al. (en: Giménez, 1994), la correcta estequiometría de la reacción de reducción de sulfatos dependerá de la naturaleza de la materia orgánica.

Como este proceso genera grandes volúmenes de dióxido de carbono, se produce conjuntamente, una intensificación de la carsificación, que se suma a los efectos debido a la disolución por acción del  $\text{CO}_2$  originado en la zona no saturada del acuífero por la oxidación bacteriana de materia orgánica, y que penetra en las partes más profundas a través de las grietas, fisuras y conductos cárnicos, así como al efecto de mezcla de aguas propio de la zona de mezcla. El proceso contrario oxidación de sulfuros, que es el más común, tiene lugar en los sitios más oxigenados del acuífero (niveles más someros, zona de alimentación), especialmente en los períodos más lluviosos:



### **Estado óxido-reductor del acuífero**

Para determinar el estado redox del acuífero se hizo una evaluación de las variaciones temporales de los potenciales redox (Eh) y las concentraciones de oxígeno disuelto, durante el período de tiempo en que fueron tomadas las muestras en los pozos Sotolongo Díaz, Alvaro Barba, Cajío y otros (Fig. 6).

En el pozo Sotolongo Díaz, situado en la zona de alimentación del acuífero; a 9 Km de distancia de la costa, se puede observar un ambiente oxidante, valores positivos del potencial redox, a las tres profundidades en que fueron tomadas las muestras, representativas de las zonas de agua dulce, de mezcla y de contacto entre el agua dulce y el agua de mar. Los picos de máximos valores de Eh se relacionan con los picos de máximos de lluvia, al igual que los del oxígeno disuelto.

En el pozo Alvaro Barba, ubicado en el entorno de un humedal (zona de conducción del acuífero), a 2.5 km de distancia de la costa, predomina un ambiente oxidante solamente hasta los 3 m (zona de agua dulce), y a las profundidades de 23 y 34 m, representativas de las zonas de mezcla y de contacto entre el agua dulce y el agua de mar, los valores de Eh se hacen negativos, predominando de esta forma un ambiente reductor. El comportamiento de los valores de Eh y de las concentraciones de oxígeno disuelto con la lluvia es similar, observándose el aumento de los mismos con los picos de lluvia.

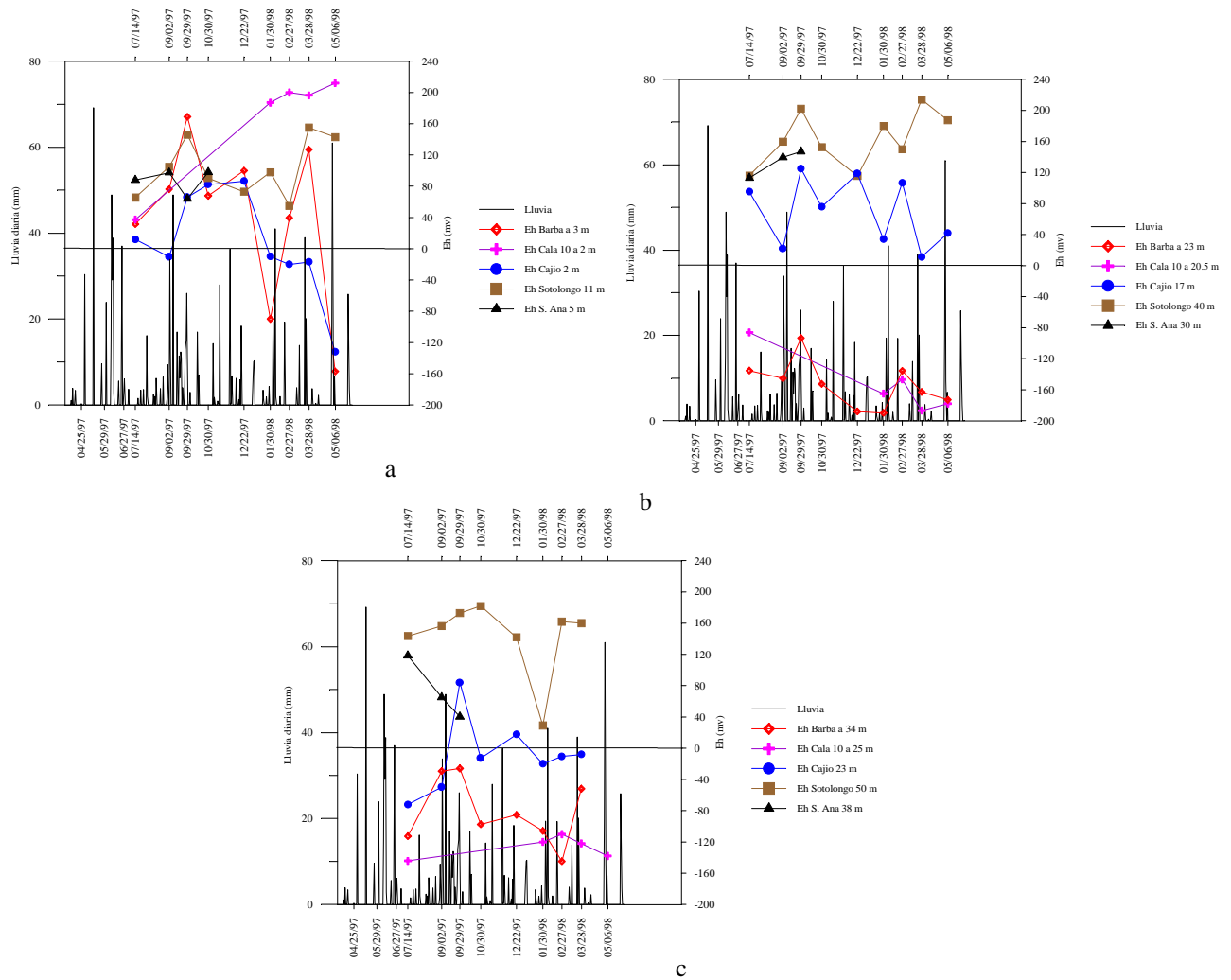


Figura 6. Variación temporal del potencial redox (Eh en mV) en los niveles de profundidad: Superficial (a), Medio (b) y Profundo (c) de los pozos muestreados.

Por su parte en el pozo Cajío ya ubicado en la zona de descarga, apenas 200 m de la costa, se observa que a los 2 m de profundidad el ambiente el oxidante (con valores de Eh positivos), mientras para las profundidades de 17 y 23 m el ambiente fluctúa entre oxidante y reductor predominando en ocasiones uno sobre el otro y viceversa. En este comportamiento está reflejada la influencia de las mareas por encontrarse este pozo muy cercano a la costa. Por otra parte se puede observar que

tanto los valores de Eh como los de las concentraciones de oxígeno disuelto aumentan.

### Patrones hidrogeoquímicos

En la tabla 3 se muestran los resultados de separar por patrones, los datos hidroquímicos correspondientes a las muestras tomadas en el período 1997-1998 mediante hidrocaptos verticales en el área de estudio.

En general los patrones evolucionan hacia un mayor contenido de Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>, tanto en sentido vertical como horizontal de los perfiles. Llama la atención, sin embargo, el patrón hidrogeoquímico del pozo Alvaro Barba a 23 m, el cual se caracteriza por la ausencia de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y un contenido alto de Ca<sup>2+</sup>, lo que sugiere la ocurrencia de procesos modificadores de la composición química del agua.

Tabla 3. Patrones hidrogeoquímicos de las aguas tomadas con hidrocaptos verticales en el tramo Güira – Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana.

Profundidad	N de datos	Patrón No	Nombre del patrón	Patrón hidrogeoquímico	Tipo de agua
10 m	5	4	Sotolongo 4	361 - 361	HCO <sub>3</sub> >Cl-Ca>Na
10 m	10	5	Sotolongo 5	361 - 361	HCO <sub>3</sub> >Cl-Ca>Na
40 m	7	6	Sotolongo 6	541 - 541	Cl> HCO <sub>3</sub> -Na> Ca
40 m	7	7	Sotolongo 7	541 - 541	Cl> HCO <sub>3</sub> -Na> Ca
40 m	1	9	Sotolongo 9	631 - 721	Cl> HCO <sub>3</sub> -Na> Ca
50 m	16	11	Sotolongo 11	811 - 811	Cl-Na
3 m	16	8	Barba 8	721 - 721	Cl>HCO <sub>3</sub> -Na>Ca
23 m	16	9	Barba 9	631 - 901	Cl-Na>Ca
34 m	16	11	Barba 11	811 - 901	Cl-Na
2 m	15	9	Cajío 9	811 - 811 712 - 811	Cl-Na
17 m	5	9	Cajío 9	811 - 811 712 - 811	Cl-Na
17 m	10	10	Cajío 10	712 - 811	Cl-Na
23 m	15	11	Cajío 11	811 - 811	Cl-Na

## **Modificación de la composición química de las aguas como resultado de la mezcla**

El método más recientemente utilizado para estudiar las modificaciones que experimentan las aguas subterráneas en las zonas costeras ha sido el de relacionar los iones susceptibles de cambios con el ion  $\text{Cl}^-$  (dado que este último se comporta como un ion conservativo en la mezcla). Esto se hace mediante el cálculo de los  $\Delta$  iónicos, que representan la diferencia entre las concentraciones reales de los iones y las teóricas (resultante de una mezcla conservativa). Esta magnitud expresa los cambios cuantitativos en términos de ganancia o pérdida iónica en los procesos modificadores de la composición química, especialmente en la zona de difusión. La misma se puede representar mediante gráficos de tipo X-Y, donde Y representa el incremento o déficit del ion que se evalúa y X el contenido de ion  $\text{Cl}^-$  (Giménez, 1994). Se pueden medir también los cambios en función del porcentaje de agua de mar presente en la muestra (Boluda et al., 1997).

Sobre la base de las concentraciones del agua dulce, representada en este estudio por el pozo Rancherita y el agua de mar, representado por la muestra tomada en Playa Cajío, fueron calculadas las ecuaciones de mezcla teórica.

Con el objetivo de evaluar las modificaciones que sufrieron las aguas de esta región en función de su salinidad, entre julio de 1997 y julio de 1998, se relacionaron los incrementos o déficits iónicos con el porcentaje de mezcla de agua de mar que contenía cada muestra (figuras 7a-7d). En las mismas se puede apreciar que los

cambios más acentuados se producen, para todos los iones, a partir del 20 % de mezcla, alcanzándose las máximas variaciones entre 40 y 60 %.

La figura 7a se observan procesos de oxidación de sulfuros en las aguas que ocupan la parte correspondiente a la zona de alimentación del acuífero (pozo Sotolongo Díaz), en los tres niveles muestreados (uno representativo de la zona de agua dulce y los otros dos de la zona de difusión o de mezcla). Resultados similares se obtienen en el pozo Liliana Dimitrova también ubicado lejos de la costa. En los pozos muestreados en las regiones cercanas a la zona lacustre (Alvaro Barba 23 y 34 m; Playa Cajío 2 m; Cala 10 entre 20.5 y 25 m y Santa Ana entre 5 y 25 m), se observan intensos procesos de reducción ( $\Delta\text{SO}_4^{2-}$ , negativos). Este comportamiento es en general coherente, con los valores de Eh medidos en el campo y puede atribuirse a la acción de las bacterias anaeróbicas sobre los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  procedentes del mar, las cuales disponen de un suministro elevado de materia orgánica brindada por la ciénaga. Este proceso de tipo biogeoquímico (Bitton, 1994) puede ser esquematizado mediante la ecuación (1):

Donde  $\text{CH}_2\text{O}$  representa la materia orgánica. En este proceso, por cada meq/l reducido de  $\text{SO}_4^{2-}$  se producirán iguales cantidades en meq/l de  $\text{HCO}_3^-$  y de  $\text{S}^{2-}$  en el agua (Shoeller, 1962). Dicho proceso puede favorecer la disolución de la calcita en el acuífero y el sulfuro originado puede producir  $\text{H}_2\text{S}$ , confiriéndole malos olores al agua, o precipitar en forma de pirita por acción del  $\text{Fe}^{2+}$  presente en los sedimentos (Custodio y Llamas, 1976; Giménez, 1994). Según Ghazban et al. (en: Giménez, 1994), la correcta estequiometría de la reacción de reducción de sulfatos dependerá de la naturaleza de la materia orgánica.

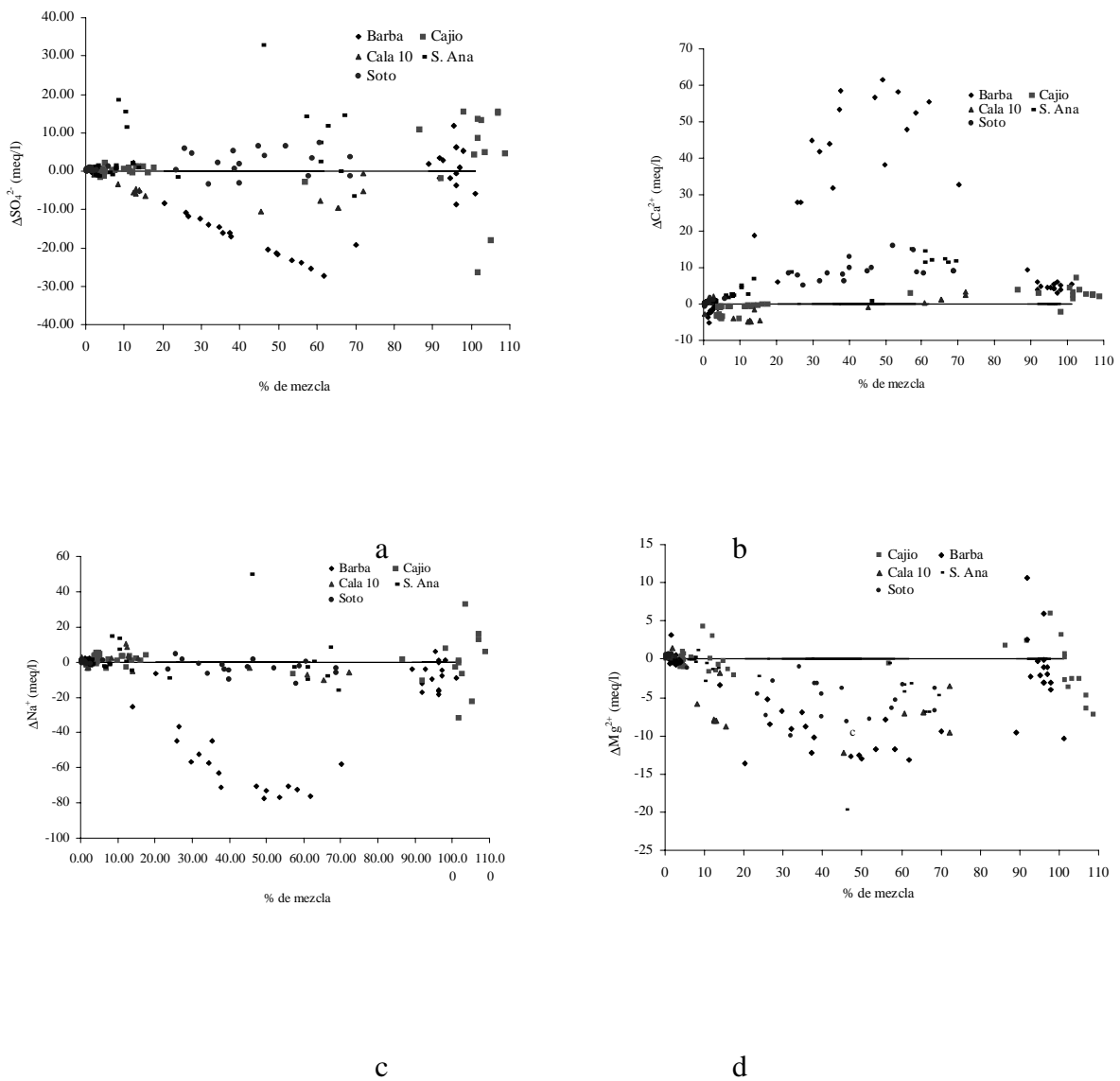
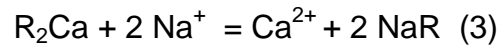


Figura 7. Variación de los deltas iónicos con el porcentaje de agua de mar en la mezcla durante el período de enero 1997 a julio 1998 para los iones:  $\text{SO}_4^{2+}$  (a)  $\text{Ca}^{2+}$  (b),  $\text{Na}^+$  (c) y  $\text{Mg}^{2+}$  (d).

En la figura 7b se muestran los correspondientes incrementos del ion  $\text{Ca}^{2+}$  en las aguas muestreadas en pozos y niveles asociados a los procesos de reducción de  $\text{SO}_4^{2-}$  discutidos anteriormente. En general, este incremento de calcio es extraordinariamente notable en el pozo Alvaro Barba entre 20 y 23 m de profundidad (donde las aguas alcanzan alrededor de un 20 % de mezcla con agua de mar) y

sugiere la ocurrencia de un intenso proceso de corrosión química. Este aumento del  $\text{Ca}^{2+}$  se encuentra relacionado con la reducción de sulfatos, aunque otros procesos como la dolomitización y el intercambio iónico inverso pueden también originar valores positivos de  $\Delta\text{Ca}^{2+}$ , en este último caso mediante la reacción:



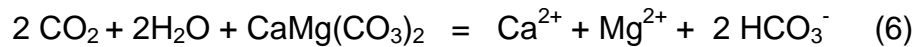
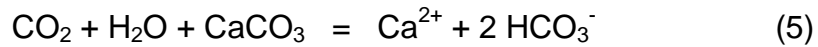
En la figura 7c se observa una tendencia a la disminución del  $\Delta\text{Na}^+$  con el porcentaje de agua de mar en el pozo Alvaro Barba, lo cual puede deberse al proceso de intercambio iónico inverso y guarda relación con el incremento de  $\text{Ca}^{2+}$  en los mismos niveles de profundidad. Un comportamiento similar ocurre en los pozos Liliana Dimitrova y Sotolongo Díaz a los niveles más profundos (46-50 m). Por el contrario, los procesos de intercambio iónico directo, que son los más comunes y se expresan mediante una ecuación química inversa a la anterior, se aprecian en los restantes pozos y niveles.

La dolomitización se produce generalmente por alteración de la calcita y la dolomita, aportando también iones calcio al agua subterránea. Este proceso que puede esquematizarse mediante la ecuación:



Finalmente, la disolución de la calcita y la dolomita aporta al medio acuoso tanto iones  $\text{Ca}^{2+}$  como  $\text{Mg}^{2+}$ , mientras que la precipitación de estos minerales sustrae dichos iones al agua:





En la figura 7d se muestran cómo varía la magnitud  $\Delta\text{Mg}^{2+}$  con el porcentaje de mezcla. Como se puede apreciar, en la zona de difusión del acuífero, por lo general, tendieron a primar los procesos de disolución de calcita con dolomitización o formación de Mg-calcita (González, 2003), mientras que la disolución de dolomita con precipitación o no de calcita ocurre en la zona más cercana al área de alimentación del acuífero. Resultados parecidos han sido reportados en Yucatán por Back et al. (1986), donde existen características hidrogeológicas similares.

En general, se puede establecer que en el intervalo estudiado, los procesos geoquímicos que han tenido lugar en el sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de la Habana, han estado controlados por el grado de salinidad de las aguas, el aporte de materia orgánica por parte de la zona de pantanos, las oscilaciones de las mareas, el régimen de precipitación y alimentación del acuífero, así como la explotación del mismo por el hombre. Sobre esas bases se pueden distinguir hasta 6 zonas hidrogeoquímicas o de procesos hidrogeoquímicos características:

- 1). Zona de agua dulce carente de  $\text{Cl}^-$  de origen marino, representado por el pozo Rancherita, donde no se producen procesos modificadores de la composición química del agua.
- 2). Zona de agua dulce muy poco salinizada (II) o ligeramente salinizada (III), con 0.3-6 % de agua de mar en la mezcla, correspondiente a los niveles someros y

medios de los pozos situados más distantes de la costa (Sotolongo Díaz). Han tenido lugar, principalmente, procesos poco relevantes de oxidación de sulfuros, disolución o precipitación de calcita, disolución de dolomita e intercambio iónico directo.

3). Zona de agua dulce ligeramente salinizada (III), con 2-6 % de mezcla con agua de mar, correspondiente a los niveles medio y profundo del área de recarga y niveles someros de la zona del acuífero cercana al pantano (Cala 10 y Alvaro Barba). Predominaron los procesos de oxidación de sulfuros, disolución de calcita y dolomita e intercambio iónico inverso.

4). Zona de mezcla (IV), con 10-74 % de agua de mar, correspondiente a los niveles del Area de recarga ubicados más distantes de la costa (Sotolongo Díaz). Prevalcieron los procesos de oxidación de sulfuros, disolución de calcita, dolomitización e intercambio iónico inverso.

5). Zona de contacto agua dulce – agua de mar (V), con 98-100 % de mezcla, correspondiente a los niveles medio del pozo Playa Cajío y profundo de Alvaro Barba. Predominaron los procesos de oxidación de sulfuros, disolución de calcita, dolomitización e intercambio iónico directo.

6). Zona de agua dulce ligeramente salinizada (III), con 2 – 10 % de mezcla, correspondiente a los niveles someros y medios de los pozos ubicados cerca de la costa y del área de pantanos (Playa Cajío, Alvaro Barba y Cala 10). Ocurrieron procesos de reducción de sulfatos y reducción de sulfuros, precipitación de calcita, dolomitización e intercambio iónico directo.

7). Zona de mezcla (IV), con 6 – 70 % de agua marina), correspondiente a los niveles medios y profundos de los pozos anteriores. Predominaron con gran intensidad procesos de reducción de sulfatos, disolución de calcita, dolomitización e intercambio iónico inverso.

## **CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que en la región objeto de estudio (tramo hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana), se ha experimentado una mejoría en la calidad de las aguas (disminución de la mineralización, contenido de cloruro y dureza), después de la construcción del Dique Sur. En esta región ocurren complejos procesos de mezcla, los cuales producen notables modificaciones en la composición química de las aguas y pueden ser evaluados cuantitativamente a partir de las relaciones iónicas con el Cl<sup>-</sup> debido a su carácter conservativo en la mezcla agua dulce-agua de mar. De estos procesos, los más significativos son la reducción anaeróbica de los sulfatos en la zona de mezcla y en la zona de contacto con el mar, los cuales tienden a producir a su vez, incrementos en los contenidos de calcio a expensas del material carbonatado del acuífero. Estos cambios pueden ser acelerados debido a la actividad del hombre y como resultado de todo ello, dar lugar a incrementos de la porosidad secundaria del acuífero cársico por cavernamiento, así como producir un mayor deterioro de la calidad del agua.

## **BIBLIOGRAFIA**

APHA, AWWA, WPCF, (1987). Standard methods for the examination of Water and Wastewater. Ed. American Public Health Association, Washington. Ed. 17, 1.5-3.12.

Back, W, B.B. Hanshaw, J.S. Herman and J.N. Van Driel (1986). Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground-water mixing zone of coastal Yucatan, Mexico. *Geology*, 14 (2), 97-192.

Barros, O, y A. León. Recarga y acuosidad en cuencas de llanuras (1997). En: *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguada, Bilbao, 53-59.

Bitton, G. (1994). Role of microorganisms in biogeochemical cycles. In: *Wastewater Microbiology*. Ed. Wiley-Liss, 51-73.

Boluda, N., C. Sempere, y F. Ruíz (1997). Hidrologeoquímica de la intrusión marina del acuífero Cuaternario de Jávea (Alicante). En: *I Congreso Iberoamericano de Geoquímica. VII Congreso de Geoquímica de España*. Soria 1997, Ed.: CEDEX, España, 465-470.

Custodio E. y R. Llamas (1976). 2ª Ed. *Hidrología Subterránea*, Ed.: Omega, Barcelona, 2350 pp.

Fagundo, J.R. (1996). Química del Agua Kárstica. En: *Hidroquímica del Karst*. J.R. Fagundo, J.E. Rodríguez, J.J. Valdés, Universidad de Granada, 13-124.

Fagundo, J.R. and P. Gonzalez. Agricultural use and water quality at karstic west Cuban Southern plain. In: *Karst and Agriculture in the World*. *International Journal of*

Speleology, (Italia)., 28 B (1/4): 175-185, 1999.

Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez. Modelación de las aguas naturales. En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, La Habana. Soporte electrónico, 2001.

Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, E. Álvarez, P. González, M. Suárez, C. Melián (2003). Hidrogeoquim. Sistema automatizado para el procesamiento de datos hidroquímicos. Inédito.

Francisco Santiago, J. (1990). Caracterización de la composición química de las aguas subterráneas cársicas de las provincias Habana y Ciudad de la Habana. Tesis e opción al Grado de Dr. en Ciencias Técnica. Centro Nacional de Investigaciones Científicas, La Habana. 144 pp.

Giménez, E. (1994). Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de salinización en el acuífero detrítico costero de la Plana de Castellón (España). Tesis Doctoral, 469 pp.

González, A. (1997). La recarga artificial contra la intrusión salina. ¿ Hasta dónde resulta eficaz en las formaciones cársicas?. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguiedad, Bilbao, 89-103.

González, A. y R. Feitó (1997). Obras costeras contra la intrusión salina para el beneficio de los recursos explotables de una cuenca subterránea. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguiedad, Bilbao, 71-86.

González, P (2003). Contribución al conocimiento hidrogeoquímico de acuíferos cársicos costeros con intrusión marina. Sector Güira - Quivicán, Cuenca Sur de La Habana. Tesis en opción del Grado de Dr. en Ciencias Técnicas. ISPJAE, 115 pp.

Jiménez, S (1999). Estudio del efecto modificador del Dique Sur en el acuífero costero de Artemisa Quivicán. Tesis de Maestría e Ciencias del Agua. CNIC, 62 pp.

Jiménez, S., E.R. Santiesteban y J.A. Arencibia (1997). Evolución de la intrusión marina en el acuífero de la costera Sur de La Habana. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguiedad, Bilbao, 115-123.

Lugo, I. y R. Torres (1992). Origen y desarrollo de los sistemas de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de La Habana. Memoria XXIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (CUBAIDIS 92), Parte 1 (I). La Habana, 487-502.

Miller, R.L., W.L. Bradford and N.E. Peters (1986). Specific conductance: theoretical considerations and application to analytical quality control. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 2311, 27 pp.

NC: 93-02 (1985). "Norma Cubana de Agua Potable". Agua potable. Requisitos sanitarios y muestreo. Oficina Nacional de Normalización (La Habana, Cuba), 8 pp.

Schoeller, H. (1962). Les eaux souterraines. Ed. Masson, Paris, 642 pp.

Stiff H. A. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of pattern. Jour Petroleum Technology, 3(10): pp. 15-17.