

# METODOLOGIA PARA LA CARACTERIZACION GEOQUIMICA DE LOS ACUIFEROS CARSIICOS COSTEROS. I. MUESTREO SISTEMÁTICO Y CARACTERIZACIÓN DE FACIES HIDROQUÍMICAS.

*P. González<sup>1</sup>, J. R. Fagundo<sup>1</sup>, G. Benítez<sup>1</sup>, S. Jiménez<sup>2</sup>, V. Ferrera<sup>2</sup>, A. González<sup>3</sup>, E. Romero<sup>3</sup>, D Orihuela<sup>3</sup>, J. Ramírez<sup>4</sup>, M. Suárez<sup>4</sup>.*

*1- Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC).*

*2- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).*

*3- Escuela Politécnica Superior, Universidad de Huelva (España).*

*4. Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina".*

## RESUMEN

*En este trabajo se presenta una metodología para el monitoreo y caracterización de las diferentes facies hidroquímicas presentes en los acuíferos cársicos costeros afectados por los procesos de **intrusión marina**. Como caso de estudio fue seleccionado el sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana.*

*Mediante un sistemático programa de muestreo y de análisis químico, tanto de campo como de laboratorio, se identificaron las principales facies hidroquímicas que controlan la calidad de las aguas subterráneas con diferentes porcentajes de mezcla agua dulce-agua de mar. Las mismas se expresan en términos de patrones hidrogeoquímicos y relaciones iónicas y se representan mediante diagramas hidroquímicos y series cronológicas que muestran las variaciones temporales y espaciales de algunos parámetros físico-químicos, determinados en el campo, tales como: Eh, O<sub>2</sub>, pH, CO<sub>2</sub> según las zonas hidrogeológicas y como resultado de la acción combinada de varios factores (recarga del acuífero, intrusión marina y explotación).*

## INTRODUCCION

La composición química de un agua natural depende de su interacción con el medio sólido a través del cual ella discurre. La misma es el reflejo de su origen e historia evolutiva. La primera fase corresponde al agua de lluvia, cuya composición química dependerá del camino seguido por las perturbaciones, la acción de lavado de la atmósfera, cantidad e intensidad de las precipitaciones, dirección e intensidad de los vientos, temperatura, etc. En el proceso de infiltración y durante el viaje a través del medio no saturado, además de disolver sales del suelo dejadas por las lluvias evaporadas, el agua se carga en CO<sub>2</sub> de origen biogénico, que le atribuye agresividad hacia el carbonato de calcio. A esta solubilización acompaña fenómenos de hidratación, hidrólisis y oxidación-reducción que contribuyen a modificar la composición original del agua de lluvia. Una vez alcanzado el acuífero, las aguas están sometidas a una gran variedad de procesos químicos que contribuyen a modificar las relaciones entre los iones y sus concentraciones: entre estos recordemos los procesos de disolución y precipitación, los enriquecimientos por solubilización de sales o mezcla con agua de diferente naturaleza.

Además de estas modificaciones, algunas veces suceden cambios en el contenido iónico del agua como resultado de la intrusión de aguas de alta salinidad que provocan un incremento de la cantidad total de sólidos disueltos en el agua. En áreas costeras, la intrusión de agua salina se identifica

fácilmente con el agua de mar, conociéndose el proceso como *intrusión marina*.

Las consecuencias y los orígenes del proceso de *intrusión marina* son bien conocidas. Sin embargo su adecuada caracterización se ve dificultada por la complejidad hidrodinámica e hidroquímica del proceso. (Giménez, 1994).

Desde el punto de vista hidroquímico el fenómeno de intrusión marina implica dos procesos fundamentales: mezcla entre el agua dulce y el agua de mar y fenómenos modificadores derivados de la interacción mezcla-roca. El primero trae consigo el incremento de la salinidad de las aguas, en función del porcentaje de agua de mar en la mezcla, como consecuencia del aporte de sales por parte del agua de mar. El segundo se refiere a que la mezcla de dos fases físico-químicas diferentes, originan un agua en desequilibrio que debe recuperar su equilibrio, interactuando con el acuífero. Esto produce reacciones agua-roca que son de mayor o menor intensidad de acuerdo al porcentaje de agua de mar en la mezcla y a la litología del acuífero.

El proceso de *intrusión marina* está acompañado del problema de la superposición de facies hidroquímicas. Cuando se afirma que un agua responde a una determinada facies, se pretende definir su composición química o lo que es lo mismo su calidad (cuando esta es referida a un uso), la cual ofrece una idea implícita de la litología del acuífero. En el caso de los acuíferos cársicos costeros afectados por el fenómeno de la *intrusión marina*, la litología deja de ser preponderante y la facies del agua responde al porcentaje de agua de mar en la mezcla, que supone aportes grandes de iones cloruro y sodio, convirtiendo las facies hidroquímica en clorurada sódica (Morell et al. 1986; 1988; Fagundo et al., 1996; González et al., 1996; 1998),.

Este trabajo tiene como objetivo mostrar una metodología para la identificación de las facies hidrogeoquímicas que se presentan en las diferentes zonas hidrogeológicas de un acuífero cársico costero (Cuenca Sur de la Habana. Tramo hidrogeológico Güira-Quivicán) afectado por el fenómeno de *intrusión marina*.

## **MARCO GEOGRAFICO, GEOLOGICO E HIDROGEOLOGICO**

El área seleccionada pertenece al sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de la Habana, ubicado entre las coordenadas N 320-345 y E 340-370 (Fig. 1). 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 (1375 mm). La mayor parte de las lluvias que caen en la Cuenca Sur de la Habana corresponden a eventos de tipo convectivos y ciclones tropicales que se producen en el período húmedo (mayo-octubre). También se producen eventos lluviosos en el período seco o menos húmedo (noviembre-abril), en ocasiones notables, asociados principalmente a los frentes fríos. 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. También 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, ha contribuido a la salinización de las aguas subterráneas en la región. 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>/s (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, 1997).

## MATERIALES Y METODOS

Los aspectos metodológicos aplicados para el muestreo sistemático y la caracterización de las facies hidroquímica del acuífero costero de referencia fueron los siguientes:

1. Análisis de la información geológica, climática, hidrogeológica e hidrogeoquímica existente sobre el área de estudio.
2. Diseño de la red de muestreo, selección de los indicadores geoquímicos a medir o a determinar por análisis químico de campo y de laboratorio.
3. Preparación de curvas de calibración, patrones y soluciones de control. Calibración de los equipos.
4. Muestreo sistemático durante, al menos, un año hidrológico.
5. Análisis de la calidad de los datos: balance iónico, relación entre la conductividad eléctrica teórica y la real, análisis de las relaciones iónicas en función de las diferentes litofacies.

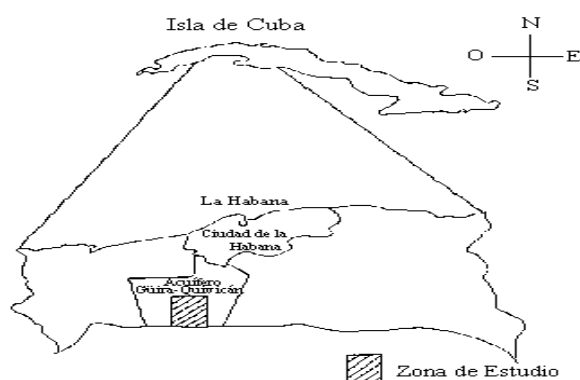


Figura 1. Mapa de localización

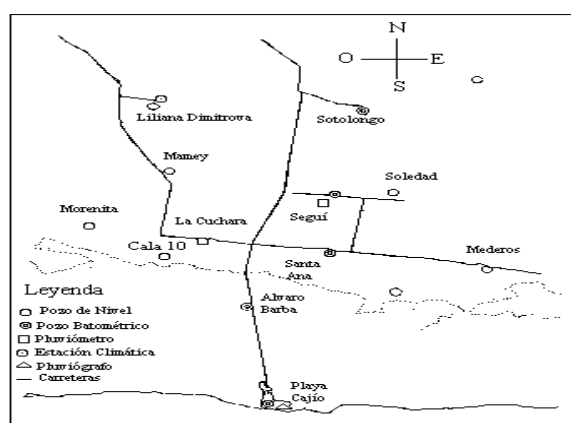


Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo

7. Caracterización espacial de la composición química de las aguas. Clasificación hidroquímica y análisis tipológico de las aguas que ocurren en los diferentes horizontes del acuíferos y sectores hidrogeológicos en condiciones estáticas: diagramas hidroquímicos de Piper; diagramas hidroquímicos de Schoeller; patrones hidroquímicos según el método computarizado de Kurlov.
8. Caracterización temporal de la composición química de las aguas: análisis de series

cronológicas de  $\text{Cl}^-$ , CE ó TSS; mapas de isocontenidos en diferentes periodos (seco y húmedo) mediante métodos geoestadísticos.

9. Análisis cronológico y del efecto del régimen de precipitación sobre las variables hidroquímicas medidas en el campo (T, pH, CE, Eh,  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$ ) y determinadas en el laboratorio ( $\text{Cl}^-$  ó TSS): determinación de ambientes oxidantes o reductores, así como condiciones favorables a la disolución o precipitación de minerales e intercambio iónico (directo e inverso).

En el área de estudio se estableció una red de observaciones sistemáticas para el monitoreo de los niveles piezométricos y la calidad de las aguas. Fue seleccionado un perfil de pozos orientados en dirección N-S (Fig. 2). Las muestras fueron tomadas mensualmente a partir del mes de enero de 1997, 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); Cala 10 (4.5 km de la costa, cota topográfica 1.97 m, muestreo a los niveles de 2-10, 20.5 y 25 m); Santa Ana (4.9 km de la costa, cota topográfica 4.73 m, muestreo a los niveles de 5 y 20-30 y 38 m); Seguí (6.6 km de la costa, cota topográfica 7.49 m, muestreo a los niveles de 10, 39.50 y 43 m); Liliana Dimitrova (8.6 km de la costa, cota topográfica 8.96 m, muestreo a los niveles de 4-44.5 y 46-50 m); 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).

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  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , así como la alcalinidad total ( $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ ) fueron también determinados en el campo, mientras que los restantes macroconstituyentes ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) 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) modificadas por Markowicz y Pulina (1979) y Krawczyk (1992) para muestras procedentes de terrenos cársicos. Los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  fueron determinados por fotometría de llamas (fotómetro marca SOLAR 919 de la UNCAM). Para el análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  en muestras altamente mineralizadas se prepararon patrones idóneos y se tomaron en cuenta las recomendaciones de Capitán et al. (1987), que consideran el efecto de matriz sobre las determinaciones (Súarez, 1998).

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 SAPHIQ y su versión sobre WINDOWS (HIDROGEOWIN), con el cual se calcularon además los índices de saturación y otros indicadores geoquímicos (Alvarez et al., 1999). El resto del procesamiento se efectuó mediante ACCESS, Rockware, Grapherwin, Surfer y EXCEL.

Para la determinación del nivel del agua subterránea se utilizó un hidronivel H-70 de 100 m de cable y los registros de conductividad eléctrica a diferentes profundidades (Fig. 3) se realizaron con un equipo ORISON 524 con 100 m de cable, tomándose las muestras mediante hidrocaptos modelo SEBA de nacionalidad alemana.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Mediciones de campo

En la figura 3 se presenta, como ejemplo, un registro vertical en profundidad de conductividad

eléctrica y temperatura, el cual muestra como aumenta la conductividad eléctrica a medida que bajamos en profundidad y con ello la salinidad de las aguas. De esta forma se pueden identificar las diferentes zonas hidrogeológicas existentes en el pozo y escoger en las que se llevará a cabo el muestreo.

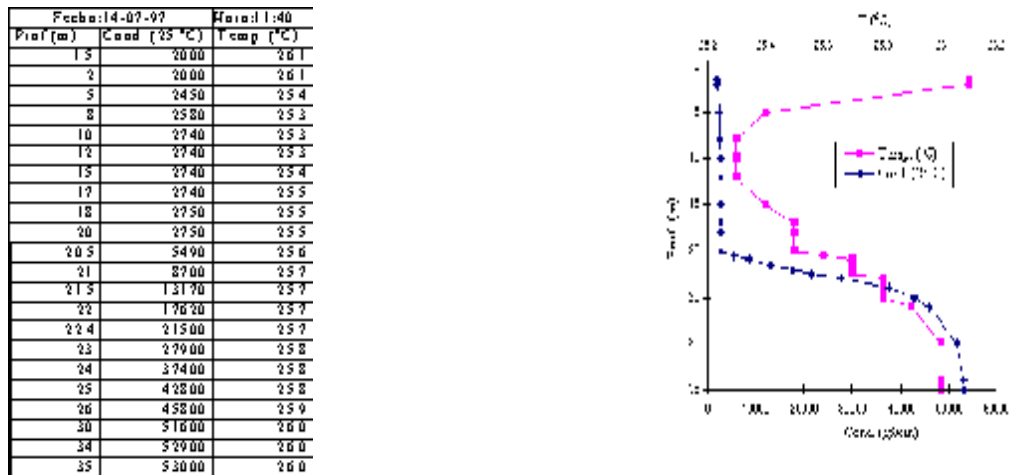
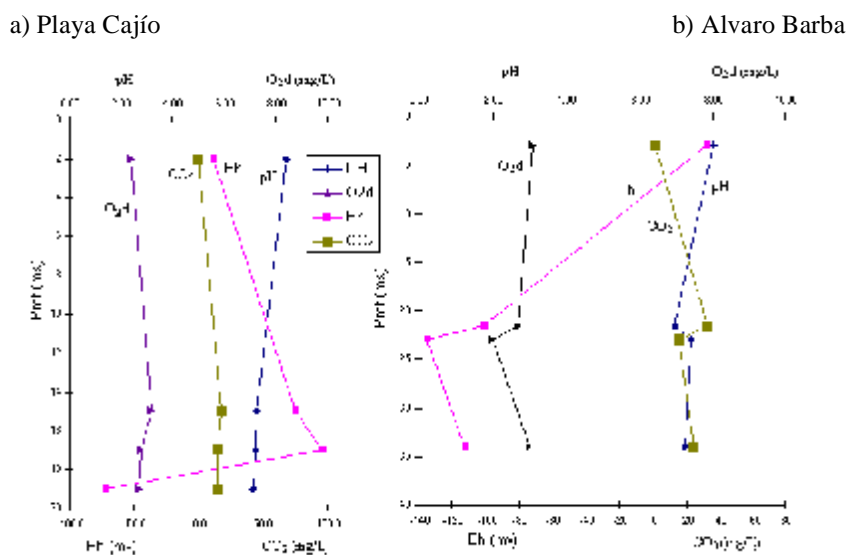


Figura 3. Registro vertical en profundidad de la CE y la Temp. Pozo Alvaro Barba, 14 de julio de 1997

En la figura 4 se presentan los resultados de algunas de las mediciones de campo efectuadas el día 14 de julio de 1997 en los pozos Playa Cajío, Alvaro Barba, Santa Ana y Sotolongo Díaz, situados el primero en la zona costera, el segundo dentro de la región pantanosa y el tercero y el cuarto en la zona más alejada de la costa (Fig. 2). Como puede apreciarse (Fig. 4), en los pozos ubicados entre la costa y la zona pantanosa, se presenta un ambiente reductor, es decir, valores de Eh negativo, en los niveles medio (Alvaro Barba) y profundo (Playa Cajío y Alvaro Barba). En esos sitios, se detectaron bajos contenidos de  $O_2$  y de  $CO_2$ , mientras que los valores de pH fueron relativamente elevados. En los pozos más alejados del mar (Santa Ana y Sotolongo Díaz) se obtuvieron valores de Eh positivos (ambiente oxidante) y valores más altos del contenido de  $CO_2$  y de oxígeno disuelto. En estos últimos sitios se registraron los mayores contenidos de  $O_2$  disueltos.



c) Sotolongo Díaz

d) Santa Ana

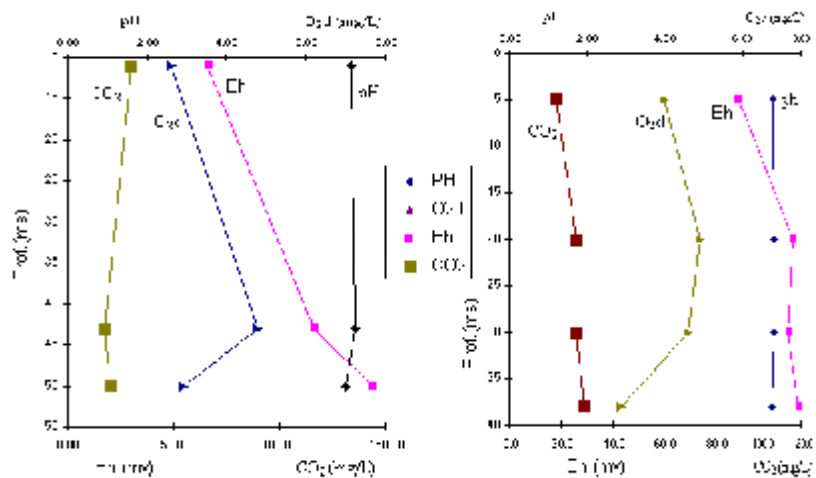
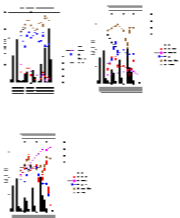


Figura 4. Resultados de las mediciones de campo en los sitios de muestreo sistemático

Para establecer con más precisión los cambios temporales del estado de oxidación-reducción del ambiente asociado a los pozos del perfil, se tomaron en consideración los valores de Eh a los tres niveles de profundidad muestreados (superficial (Fig. 5a), medio (Fig. 5b) y profundo (Fig. 5c)), de manera sistemática, en los pozos Playa Cajío, Alvaro Barba y Sotolongo Díaz en el período desde julio 1997 a julio 1998, y con menor periodicidad, los valores correspondientes a los pozos Santa Ana y Cala 10. Se observa que en el pozo más cercano al mar, limítrofe con la zona de marismas (Playa Cajío), el ambiente fluctúa entre reductor y oxidante en el nivel más somero, es oxidante en el nivel medio y reductor en el más profundo. En los pozos ubicados dentro de la zona pantanosa (Alvaro Barba y Cala 10) prevalece un ambiente oxidante en el nivel más superficial y un ambiente reductor en los restantes, mientras que en los pozos más alejados del mar y de la zona de pantanos (Sotolongo y Santa Ana) existe un ambiente oxidante en todos los niveles. Estas regularidades se han presentado también en otros períodos del año, con algunas fluctuaciones debido al efecto oxidante que se produce por infiltración de la lluvia en el acuífero.

### Caracterización hidroquímica

La caracterización espacial de la composición química de las aguas del acuífero en la zona de estudio se aborda desde dos puntos de vistas: primeramente, teniendo en cuenta el comportamiento de la composición química de estas aguas en los diferentes puntos de la red de muestreo, lo cual muestra la evolución de la calidad de las mismas desde la zona de alimentación del acuífero (Pozo Rancherita), hasta la zona más cercana a la costa, descarga (Pozo Cajío). Para este objetivo es conveniente utilizar los gráficos trilineares de Piper-Hill-Langelier (figura 6). Con ellos se pueden identificar fácilmente las diferentes facies hidroquímicas de las aguas y la evolución de las mismas desde la zona de alimentación (Pozo Rancherita), hasta la zona más cercana a la costa (Pozo Cajío).



En la figura 6 se representa la composición química de las aguas en los diferentes puntos de la red de muestreo, para el día 14 de julio de 1997. Como puede apreciarse, los puntos caen sobre una líneas de mezcla imaginaria que une a los dos extremos, el agua dulce (0) y el agua de mar (9), pasando de la facie bicarbonatada cálcica, a clorurada sódica, a través de facies intermedias de mezcla tales como: bicarbonatada clorurada cálcica sódica, bicarbonatada cálcica sódica, bicarbonatada clorurada

cálcica y otras combinaciones más que demuestran la diversidad de las facies hidroquímicas presentes producto a la mezcla agua dulce-agua de mar y a los fenómenos modificadores, todo lo cual es típico en los acuíferos cársicos afectados por el fenómeno de la *intrusión salina*.

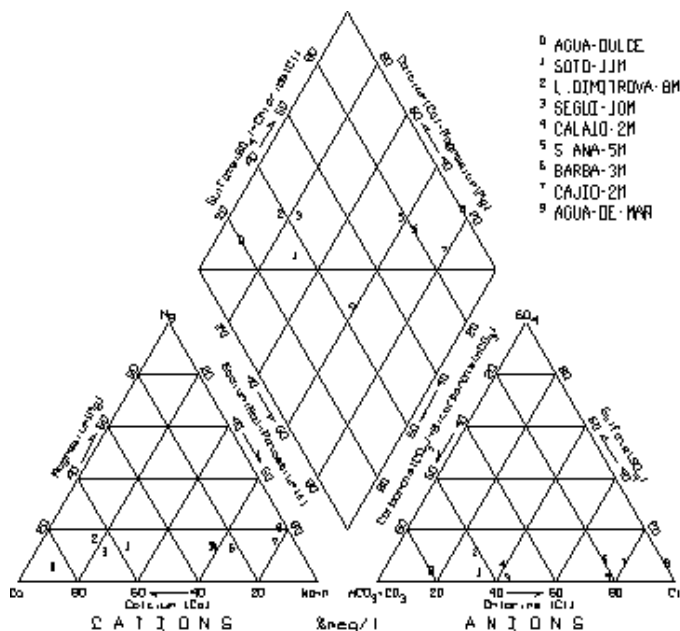
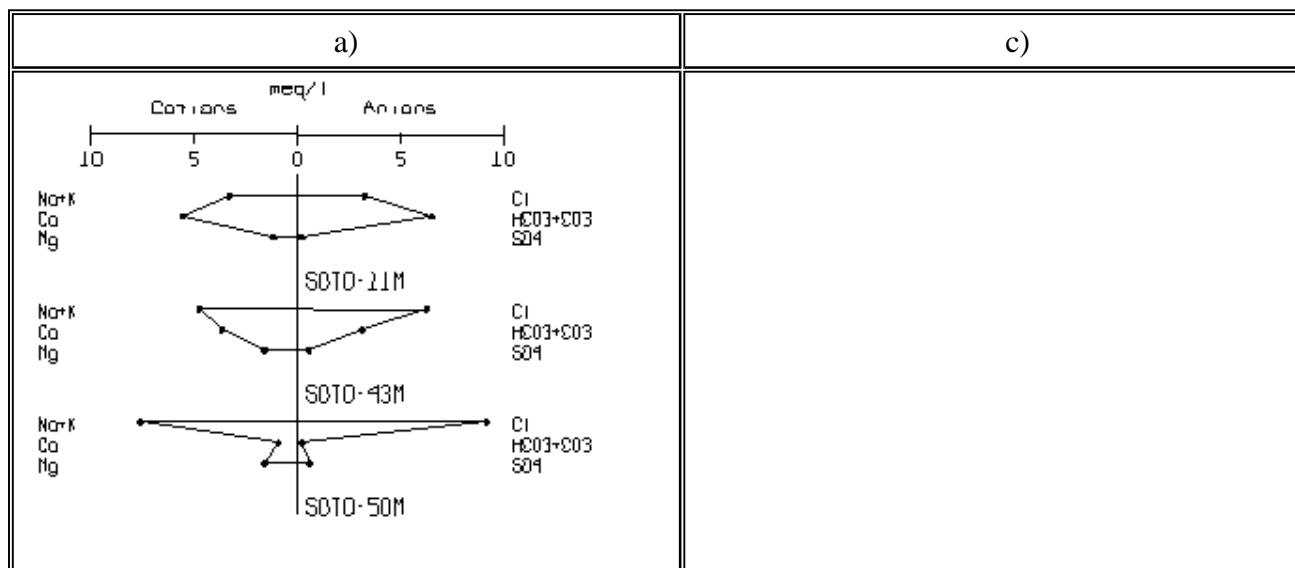


Figura 6. Diagrama de Piper-Hill-Langelier. Sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur a Habana.

En segundo lugar se tiene que las facies hidroquímicas que caracterizan las distintas zonas hidrogeológicas en profundidad pueden expresarse en términos de patrones hidrogeoquímicos, tales como los propuestos por Fagundo (1996). Según esta notación, cada patrón se expresa mediante un juego de seis números enteros entre 0 y 10 (tres para los aniones y tres para los cationes que sumados entre sí deben dar 10), ordenados según la secuencia  $Na^+ - Ca^{2+} - Mg^{2+} : Cl^- - HCO_3^- - SO_4^{2-}$ . Cada número entero representa la composición decimal iónica, equivalente a dividir por 10 la composición en tanto por ciento. En total pueden crearse  $66 \times 66 = 4356$  combinaciones numéricas o patrones hidrogeoquímicos, que representan los distintos tipos de aguas posibles en la naturaleza. El tipo de agua se nombra en forma similar a como se hace en el método de Kurlov. Se consideran en el mismo los números entre 2 y 10 (correspondientes a las composiciones entre 20 y 100 % de meq/l). Este método computarizado (Vinardell et al., 1999), permite una rápida separación y clasificación de los datos.



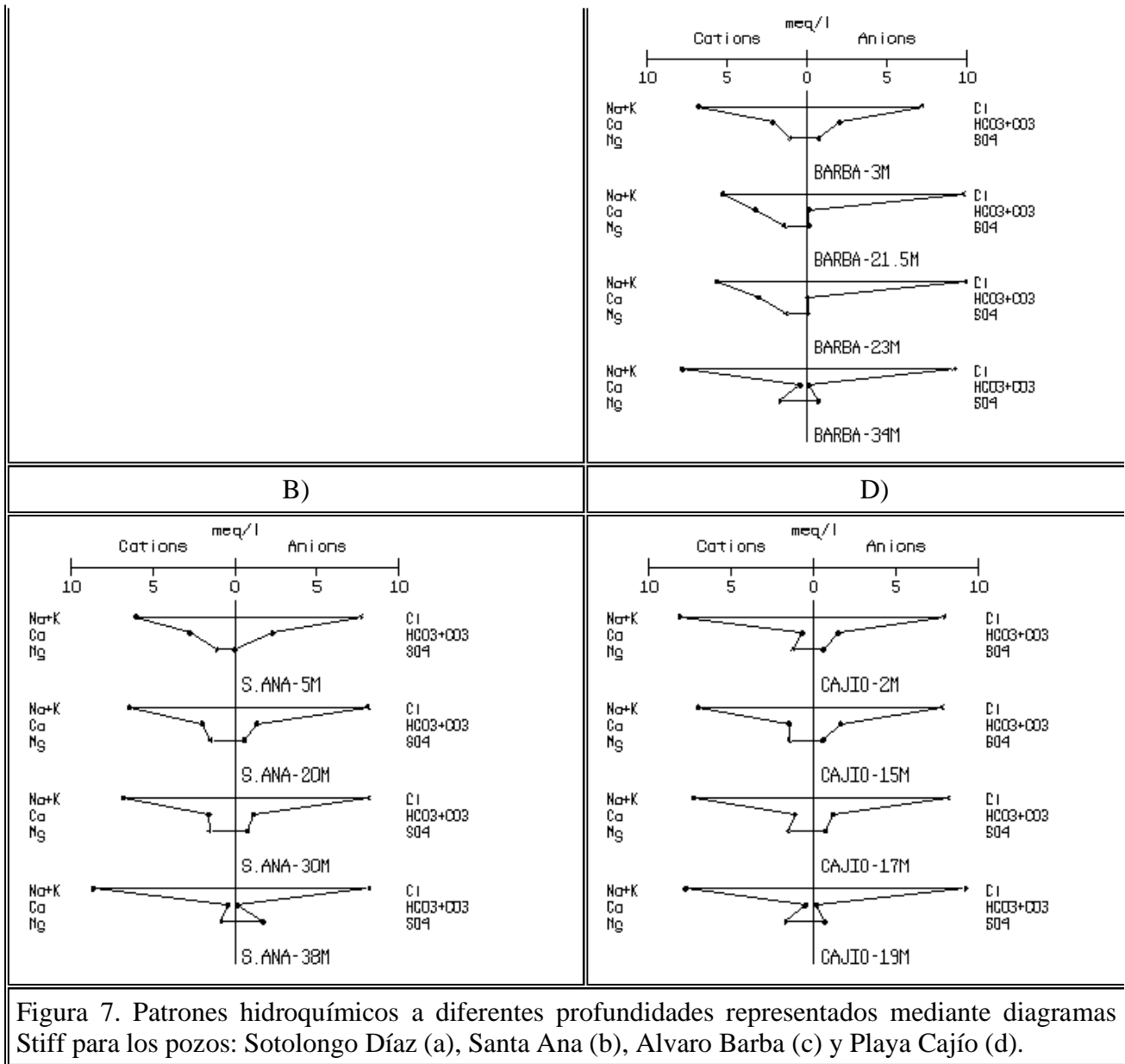


Figura 7. Patrones hidroquímicos a diferentes profundidades representados mediante diagramas Stiff para los pozos: Sotolongo Díaz (a), Santa Ana (b), Alvaro Barba (c) y Playa Cajío (d).

La representación gráfica de los patrones hidroquímicos puede realizarse mediante los diagramas de Stiff (figuras 7a-d). Este tipo de diagrama hidroquímico es muy ilustrativo y permite, de forma sencilla, visualizar las regularidades de los diferentes tipos de aguas subterráneas presentes en el acuífero o cuenca hidrogeológica. Los cambios en la composición química se deben al incremento de las concentraciones de NaCl en las aguas a medida que aumenta la cercanía del pozo al mar y en sentido de la mayor profundidad, y como resultado de los procesos modificadores que se producen, particularmente en la zona de mezcla dispersiva y en las cercanías de la zona lacustre.

En la tabla 1 se presentan los resultados de la clasificación por patrones hidrogeoquímicos y tipos de aguas de las muestras analizadas en este trabajo. Del análisis de la misma se infiere que dichas aguas evolucionan desde el patrón 4:5:1-5:4:1 (clorurada bicarbonatada cálcico sódica) hasta 8:0:2-9:0:1 (clorurada sódica). Llamamos la atención algunos patrones hidrogeoquímicos, como por ejemplo en que el anión que prevalece es el cloruro, 5:3:2-10:0:0; 5:4:1-10:0:0; 7:2:1-10:0:0, 6:3:1-10:0:0 y 6:2:2-10:0:0 (propios de aguas cloruradas sódico cálcicas o sódico cálcicas magnesianas), presentes en los pozos Alvaro Barba a los 23 m. Estos patrones hidrogeoquímicos representan un enriquecimiento de calcio y un empobrecimiento de sulfato en la zona de mezcla, hechos que pueden atribuirse a procesos de reducción de sulfatos acompañados de otros procesos, tales como generación de CO<sub>2</sub>, corrosión química por disolución de calcita e intercambio iónico.



Tabla 1. Patrones hidrogeoquímicos y tipos de aguas en el sector hidrogeológico o Güira-Quivicán (Cuenca Sur de la Habana).

Zona hidrogeológica (Porcentaje de mezcla)	Nombre del Pozo (Profundidad en m)	Patrones hidrogeoquímicos	Clasificación hidroquímica	
Zona de agua dulce (I)	Rancherita (20m)	1:9:0-1:8:1	Ca-HCO <sub>3</sub>	
Zona de agua dulce muy poco salinizada (0.3-2.2 %) (II)	Sotolongo Díaz (10-11 m)	3:6:1-3:7:0; 3:6:1-4:6:0	Ca>Na-HCO <sub>3</sub> >Cl	
		2:7:1-4:6:0; 4:5:1-4:6:0		
		3:6:1-3:6:1		
	Liliana Dimitrova (8-44.5 m)	2:7:1-5:4:1; 3:5:2-5:4:1	Ca>Na-Cl>HCO <sub>3</sub>	
Cala 10 (5-10 m)	6:3:1-6:4:0; 5:4:1-7:2:1	Na>Ca-Cl> HCO <sub>3</sub> ;		
	5:4:1-6:3:0			
		4:5:1-6:3:1	Ca>Na-Cl> HCO <sub>3</sub>	
Zona de agua dulce ligeramente salinizada (1.2-5.0 %) (III)	Sotolongo Díaz (40-43 m)	4:5:1-5:4:1	Ca>Na-Cl>HCO <sub>3</sub>	
		5:4:1-6:3:1; 5:4:1-6:4:0	Na>Ca-Cl>HCO <sub>3</sub>	
		5:4:1-5:4:1		
		7:2:1-8:1:1	Na>Ca-Cl	
	Santa Ana (5 m)	6:3:1-7:2:1; 6:3:1-6:3:1	Na>Ca-Cl>HCO <sub>3</sub>	
		6:3:1-8:2:0; 6:3:1-7:3:0		
			5:4:1-7:3:0	
	Alvaro Barba (3 m)	6:3:1-7:2:1; 6:2:2-7:2:1	Na>Ca-Cl>HCO <sub>3</sub>	
		7:2:1-7:2:1; 7:2:1-8:2:0		
			6:2:2-8:2:0	
Playa Cajío (2 m)	9:1:0-8:2:0; 8:1:1-8:2:0	Na-Cl>HCO <sub>3</sub>		
	7:2:1-8:2:0	Na>Ca-Cl>HCO <sub>3</sub>		
	9:1:9-9:1:0; 8:1:1-8:1:1	Na-Cl		
Cala 10 (15-20.5 m)	8:1:1-10:0:0; 9:0:1-10:0:0	Na-Cl		
Santa Ana (20-30 m)	6:2:2-8:1:1	Na>Ca=Mg-Cl		
	7:2:1-7:1:2	Na>Ca-Cl>SO <sub>4</sub>		
	8:1:1-7:1:2; 8:1:1-6:1:3	Na-Cl>SO <sub>4</sub>		
	7:2:1-8:1:1	Na>Ca-Cl		

Zona de mezcla agua dulce-agua de mar (4.5 – 73 %)  (IV)		7:1:2-9:0:1	Na>Mg-Cl
	Playa Cajío (17 m)	7:1:2-9:1:0; 7:1:2-8:1:1	Na>Mg-Cl
		8:1:1-9:0:1; 8:1:1-8:1:1	Na-Cl
	Alvaro Barba (23 m)	6:2:2-10:0:0	Na>Ca=Mg-Cl
		5:3:2-10:0:0	Na>Ca>Mg-Cl
		6:3:1-10:0:0; 5:4:1-10:0:0	Na>Ca-Cl
		7:2:1-10:0:0	
		8:1:1-10:0:0	Na-Cl
	Cala 10 (25 m)	801-10 00	Na-Cl
	Liliana Dimitrova (46-50 %)	7:0:2-9:0:1; 9:0:1-9:0:1	Na-Cl
Sotolongó Díaz (50 m)	8:1:1-9:0:1; 7:1:2-8:0:2	Na-Cl	
Santa Ana (38 m)	8:1:1-9:0:1; 9:0:1-8:0:2	Na-Cl	
Zona de contacto agua dulce-agua de mar. (89.1-100 %)  (V)	Alvaro Barba (34 m)	8:0:2-9:0:1	Na-Cl
	Playa Cajío (23 m)	8:0:2-9:0:1	Na>Mg-Cl

## CONCLUSIONES

En un perfil de pozos ubicados en el sector hidrogeológico Güira-Quivicán, se encontraron regularidades en la composición química de las aguas subterráneas, asociados a procesos geoquímicos que tienen lugar en las diferentes zonas del acuífero. En los niveles medios y profundos de las regiones situadas entre la costa y la zona de pantano prevalece un ambiente reductor con bajas concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$ , así como relativamente altos valores de pH, mientras que en los restantes niveles y en los pozos ubicados en el área de recarga (más alejados del mar), en todos los niveles, el ambiente es oxidante con valores altos de  $O_2$  y  $CO_2$ , y bajos valores de pH. El análisis de series temporales del Eh puso de manifiesto que las fluctuaciones de este parámetro están relacionadas con el efecto oxidante de las lluvias en el acuífero.

Se aprecian una gran variedad de patrones hidrogeoquímicos, los cuales varían entre aguas Ca- $HCO_3$  y Na-Cl, pasando por facies intermedias tales como: Ca>Na- $HCO_3$ >Cl, Ca>Na-Cl> $HCO_3$ ; Na>Ca-Cl> $HCO_3$ ; Na>Ca=Mg-Cl; Na>Ca>Mg-Cl; Na>Mg-Cl, etc, dado a la gran diversidad de procesos geoquímicos que se presentan en las zonas de mezcla agua dulce-agua de mar.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarez E., J.R. Fagundo, I. Vinardell. Control automatizado de la calidad de las aguas y de sus variables químico-físicas. Revista CENIC Ciencias Químicas: 20 (1), 21-27, 1999.
2. APHA, AWWA, WPCF, (19879). Standard methods for the examination of Water and Wastewater. Ed. American Public Health Association, Washington. Ed. 17, 1.5-3.12.

3. 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. Antigüedad, Bilbao, 53-59.
4. 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.
5. Fagundo, J.R., P. González, V. Ferrera, G. Benítez y R. Furet (1996). Intensificación de la corrosión química por la actividad humana en los acuíferos kársticos del occidente de Cuba. En: Contribuciones a la Hidrogeología y Medio Ambiente en Cuba. Eds. J.R. Fagundo, J.M. García, A. Alvarez-Nodarse, I. Morell, Universidad de Castellón, 51-67.
6. 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.
7. 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. Antigüedad, Bilbao, 89-103.
8. González, P., G. Benítez, M. Suárez y J.R. Fagundo (1998). Corrosión química por mezcla de aguas de diferente naturaleza. En: Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. Hombre y Medio Ambiente. Editorial Academia, La Habana, 64-68.
9. González, P., V. Ferrera, J.R. G. Benítez, J.R. Fagundo y L. Sánchez (1996). Estudios experimentales de disolución de roca carbonatada en condiciones de mezcla agua dulce-agua de mar. En: Contribuciones a la Hidrogeología y Medio Ambiente en Cuba. Eds. J.R. Fagundo, J.M. García, A. Alvarez-Nodarse, I. Morell, Universidad de Castellón, 357-366.
10. 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. Antigüedad, Bilbao, 115-123.
11. Krawczyk, W. (1992). Methods of field analytics of karst water. In: Hydrochemical methods in dynamic geomorphology. Scientific Works of Silesian University in Katowice, Katowice (1254), 65-83.
12. Markowicz M. and M. Pulina (1979). Semi-quantitative chemical analyses of the waters in the carboniferous karst areas. Prace Naukowe. Ed. Silesian University, Katowice, No 289, 167 pp.
13. Miller, R.L., W.L. Braford and N.E. Peters (1986). Specific conductance: theoretical considerations and application to analytical quality control. Ú.. Geological Survey Water-Supply. Paper 2311, 27 pp.
14. Morell, I.; E. Giménez, M. V. Esteller (1988). Comportamiento iónico y procesos físico-químicos en acuíferos detríticos costero de las Planas de Oropesa, Castellón y Gandía. Hidrogeología 3:21-34.
15. Morell, I.; J. Medina, A. Pulido-Bosch y R. Fernández Rubio, (1986). Caracterización de la intrusión marina e el acuífero costero de Oropesa-Torreblanca, provincia de Castellón, en base al estudio de relaciones iónicas. Hidrogeología 1:15-31.
16. Suárez, M. (1998). Estudio de las propiedades químico físicas y terapéuticas de algunas aguas mineromedicinales. Tesis de Diploma Universitario, Facultad de Farmacia, Universidad de La Habana, 72 pp.

17. Vinardell I., G. Tillán, J.R. Fagundo, E. Ontivero. Un método para la clasificación e identificación de las aguas mediante patrones hidrogeoquímicos. Revista CENIC Ciencias Química: 20 (1), 14-20, 1999.

[Volver al índice del V Taller](#)

[Volver al índice de Talleres](#)