

# METODOLOGIA PARA LA CARACTERIZACION GEOQUIMICA DE LOS ACUIFEROS CARSIICOS COSTEROS. II. IDENTIFICACIÓN LOS PROCESOS DE MEZCLA Y MODIFICACIÓN DE LAS FACIES HIDROQUÍMICAS

*J. R. Fagundo<sup>1</sup>, P. González<sup>1</sup>, S. Jiménez<sup>2</sup>, G. Benítez<sup>1</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**

*Se muestran los resultados de la aplicación de una metodología para el procesamiento de datos hidroquímicos, con el objetivo de identificar los principales procesos geoquímicos que controlan la composición química de aguas subterráneas en los acuíferos cársicos costeros. Se toma como caso de estudio el acuífero desarrollado en el sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de la Habana. Entre los procesos detectados se destacan: generación de CO<sub>2</sub> por oxidación de la materia orgánica, 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 porción cenagosa de la cuenca; disolución y precipitación de calcita y dolomita en las diferentes zonas del acuífero; intercambio iónico, tanto de carácter directo como inverso; así como otros procesos inherentes a la mezcla. Por comparación con la composición que debía esperarse de la simple mezcla conservativa, se evalúan las modificaciones que experimenta la composición química de las aguas como resultado de dichos procesos. Estos cambios son interpretados en función del grado de mezcla con agua de mar presente en las diferentes zonas hidrogeológica. La metodología permite además, relacionar las facies hidroquímicas y los procesos geoquímicos con los aportes de las recargas, el régimen de precipitación, y la actividad del hombre.*

## **INTODUCCIÓN**

Entre los cambios más significativos que se originan cuando se mezclan aguas diferentes se pueden citar los siguientes: disolución incongruente de minerales por efecto de ion común, precipitación de minerales de hierro (férrico) por formación de una mezcla más oxidada, aumento o disminución de la solubilidad por cambios de pH, incremento de la solubilidad por efecto salino o de fuerza iónica, incremento de la corrosión de las calizas debido al denominado efecto de mezcla de agua (mixing-corrosión). En las zonas cársicas litorales se producen además, precipitaciones de dolomita (dolomitización), dedolomitización, oxidación de sulfuros en las zonas más someras y reducción de sulfatos en condiciones anaeróbicas a mayor profundidad, así como procesos de adsorción e

intercambio iónico (Appelo y Postma, 1993; Fagundo, 1996).

El presente trabajo, el segundo de esta serie, tiene por objetivo ilustrar el empleo de esta metodología en la identificación de las modificaciones de la composición química de las aguas del acuífero de referencia en función de los procesos geoquímicos que tienen lugar en ese sitio, así como del porcentaje de mezcla con agua de mar en dichas aguas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la primera parte de esta serie de trabajos metodológicos, se describen las características del sitio de muestreo tomado como caso de estudio, las determinaciones y análisis de campo, así como algunos de los procedimientos de datos empleados, con el objetivo de estudiar las variaciones temporales de algunos indicadores geoquímicos que identifican las facies hidroquímicas presentes. Los aspectos de carácter metodológico que se tomaron en cuenta en esta fase del trabajo fueron los siguientes:

### 1.-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

2.-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)

3.-Determinación del porcentaje de agua de mar contenido en la muestra

4.-Análisis del proceso de mezcla agua dulce – agua de mar:

Mapas de isocontenidos con los  $\Delta$  iónicos de los principales macroconstituyentes ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ )

Relación de los contenidos de los  $\Delta$  iónicos de los principales macroconstituyentes ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) con el porcentaje de mezcla con agua de mar

Comportamiento de los  $\Delta$  iónicos de los principales macroconstituyentes ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) en diferentes pozos y a diferentes profundidades

Diagramas tipo Chebatorev para  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Expresados como % meq/l de los iones en función del contenido de  $\text{Cl}^-$  (% meq/l) y con relación a la línea de mezcla

Balace iónico de los diferentes procesos geoquímicos

Correlaciones entre los  $\Delta$  iónicos de los principales macroconstituyentes ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) ente sí

5.- Determinación de los índices de saturación respecto a los principales minerales constitutivos del material acuífero (calcita, dolomita y yeso)

6.- Expresión del modelo geoquímico

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Salinidad de las aguas en función del porcentaje de agua de mar

Teniendo en cuenta que los procesos geoquímicos que se producen en los acuíferos cársicos litorales están controlados, entre otros factores, por el grado de mezcla del agua dulce procedente de la zona de recarga y el agua de mar que invade el acuífero, es necesario conocer el porcentaje da agua marina que contiene la muestra que se analiza.

Los cálculos del porcentaje de agua de mar en la mezcla, en las muestras tomadas a diferentes profundidades, fueron realizadas a partir de las concentraciones de cloruros mediante la fórmula:

$$\text{Porcentaje de mezcla} = \frac{[\text{Cl}^-]_{\text{muestra}} - [\text{Cl}^-]_{\text{agua dulce}}}{[\text{Cl}^-]_{\text{agua de mar}}} \times 100 \quad (1)$$

Como representativo del agua dulce se tomó en este trabajo el pozo Rancherita. El contenido de  $\text{Cl}^-$  en este sitio es controlado por las lluvias y el proceso de evapotranspiración en la zona no saturada del acuífero, siendo del orden de 1 meq/l. La muestra de agua de mar fue tomada en la Playa Cajío.

En la tabla 1 se presenta el porcentaje de mezcla correspondiente a las muestras tomadas a diferentes niveles, así como las zonas hidrogeológicas asignadas sobre esta base.

### Variación espacio temporal del contenido de cloruro en las aguas

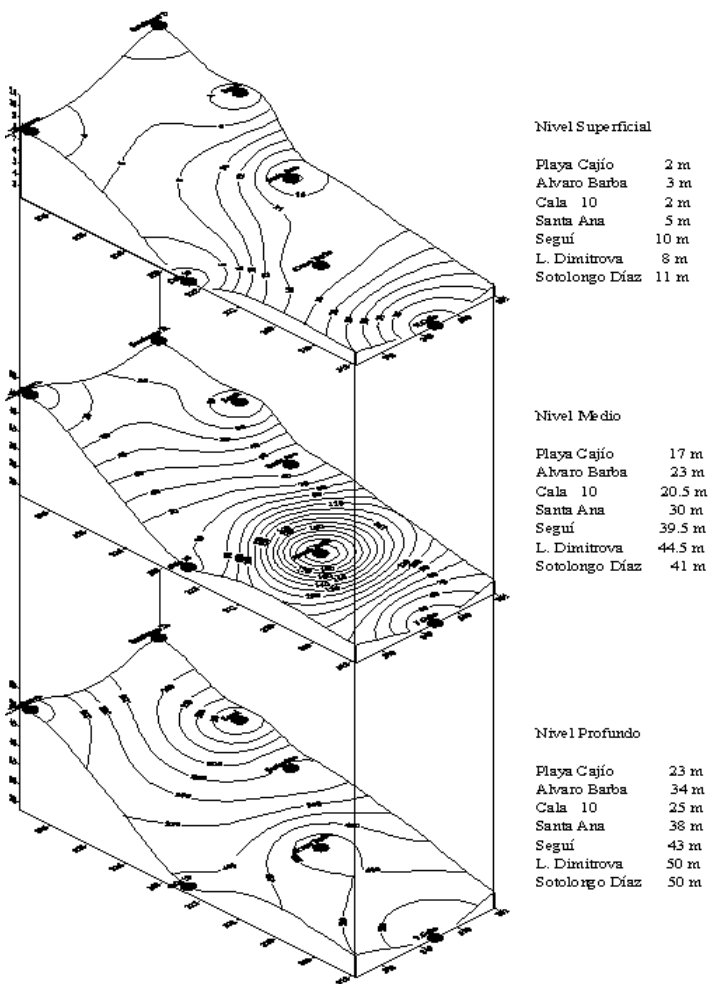
Teniendo en cuenta que el contenido de  $\text{Cl}^-$  en los acuíferos cársicos costeros está asociado principalmente a la intrusión marina, la concentración de este ion a las diferentes profundidades muestreadas en los pozos, brinda una valiosa información acerca de la penetración marina en los mismos. Mediante el empleo de métodos geoestadísticos se puede, además, apreciar en el espacio tridimensional su distribución espacial e interpretar el efecto de la referida penetración, el efecto de sobreexplotación local, así como de la ocurrencia de heterogeneidades hidrogeológicas en el acuífero. Para ello se han tomado, en cada, pozo tres profundidades representativas de las diferentes zonas de estratificación de la mezcla (superficial, media y profunda) y se han construido tres planos de mapas de isocontenidos para las concentraciones (meq/L) del ion cloruro, de forma que se pude

observar en un mismo gráfico la evolución de la calidad de las aguas desde la zona de alimentación hasta la zona de descarga a las diferentes profundidades (Fig. 1).

Tabla1. Porcentaje de mezcla de agua de mar y total de sólidos disueltos (TSS) de muestras tomadas en diferentes zonas hidrogeológicas, del sector Güira-Quivicán (Cuenca Sur de la Habana)

Pozo	Profundidad (m)	Porcentaje de mezcla	TSS (g/l)	Zona hidrogeológica	
				No.	Características geoquímica
Playa Cajío	2	3.6-5.0	1.8-2.3	III	Zona de agua dulce ligeramente salinizada
	15-18	4.5-17.7	1.9-10.3	IV	Zona de mezcla
	19-23	57.0-100.0	20.1-38.9	V	Interfaz agua dulce-agua de mar
Alvaro Barba	3	1.2-3.9	0.6-1.9	III	Zona de agua dulce ligeramente salinizada
	23-25	20.3-70.1	4.5-23.1	IV	Zona de mezcla
	34	89.1-100.0	5.8-36.5	V	Interfaz agua dulce-agua de mar
Cala 10	2-10	0.4-2.6	0.6-1.4	II	Zona de agua dulce muy poco salinizada
	15-20.5	8.2-15.5	2.8-5.2	IV	Zona de mezcla
	25	45.3-72.1	15.3-25.2	IV	
Santa Ana	5	2.1-3.1	1.2-1.6	III	Zona de agua dulce ligeramente salinizada
	20-30	5.9-23.6	2.5-8.6	IV	Zona de mezcla
	38	11.9-60.1	4.8-24.8		
Liliana Dimitrova	8-44.5	0.5-1.15	0.6-8.1	II	Zona de agua dulce muy poco salinizada
	46-50	34-74.5	12.5-	IV	Zona de mezcla

			27.1		
Sotolongo Díaz	10-11	0.2-0.4	0.6-0.7	II	Zona de agua dulce muy poco salinizada
	40-43	0.8-5.8	7.5-26	III	Zona de agua dulce ligeramente salinizada
	50	25.7-68.6	8.7-24.6	IV	Zona de mezcla
Rancherita	20	0	0.5	I	Zona de agua dulce

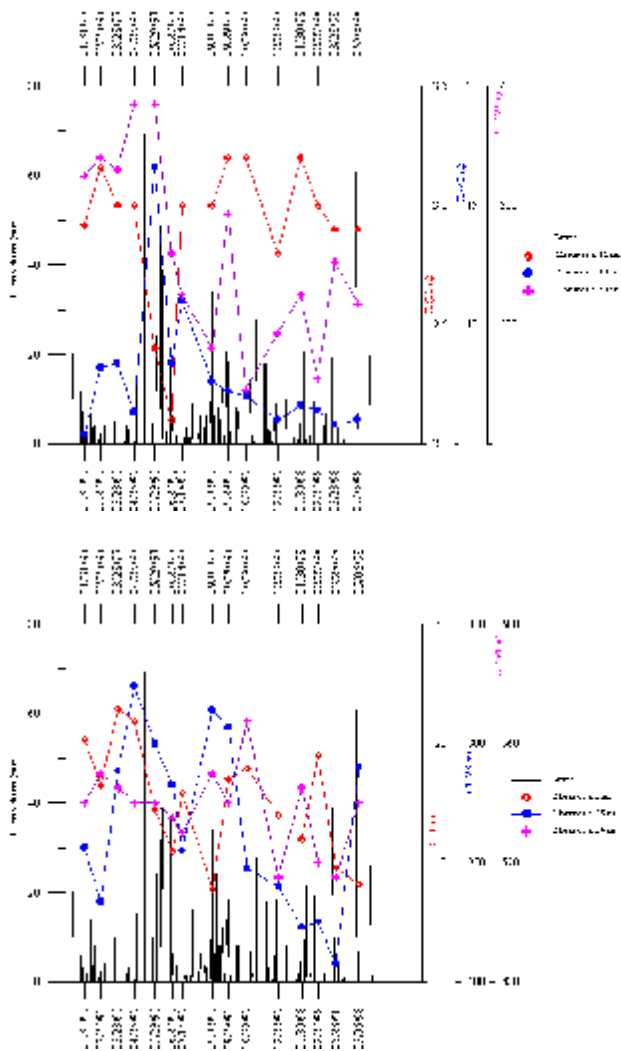


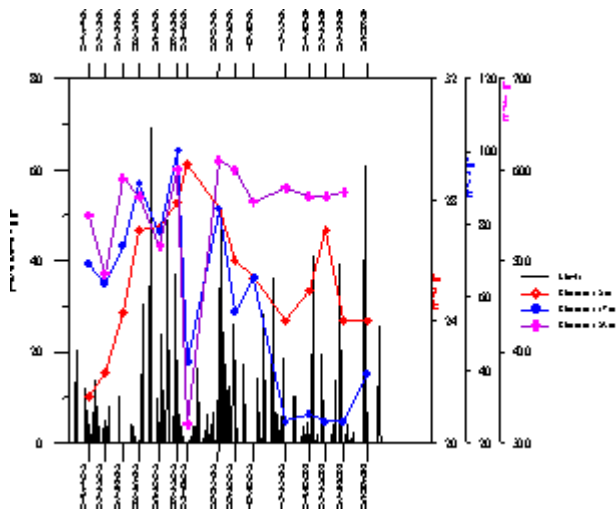
En la figura 1 se muestra cómo las concentraciones del ion  $\text{Cl}^-$  aumentan a medida que nos acercamos a la costa, en los niveles superficial y profundo no ocurriendo lo mismo en el nivel medio de profundidad donde las concentraciones aumentan hacia el sitio en que se encuentra ubicado el Pozo Alvaro Barba. Esta anomalía, típica de un cono de dispersión producto de la sobreexplotación, parece deberse más bien, en este caso, a diferencias en las profundidades en que fueron tomadas las muestras con respecto a los restantes pozos. En ese nivel intermedio se producen sensibles cambios de salinidad con la profundidad.

Tal como ha señalado Aminot (1974), una variable hidroquímica tiene validez limitada para fines de caracterización, y una mayor información se obtiene de la evolución temporal del quimismo de las aguas en las emergencias o en pozos a lo largo de un perfil. Como la composición química del agua evoluciona en su movimiento a través de los sistemas carbonatados, la información hidroquímica

obtenida en determinados sitios de control ofrece una información adicional acerca del tiempo de residencia y de las condiciones en que se mueve el agua.

En las figuras 2 a-c se muestran los resultados de la variación en el tiempo del contenido de  $Cl^-$  (meq/l) y su relación con las precipitaciones para las tres profundidades muestreadas, en tres de los pozos más representativos de la red de muestreo: Sotolongo Díaz (a), Alvaro Barba (b) y Playa Cajío (c), en el período de enero de 1997 a julio de 1998. Del análisis de las correspondientes series cronológicas, se deduce la existencia de dos patrones de fluctuación diferentes: uno que no responde al régimen de precipitación, representado por el pozo Playa Cajío a la profundidad de 3 m, y otro, que presenta una respuesta más o menos desplazada en tiempo, representado por los restantes pozos (en los tres niveles de profundidad) y por el propio Cajío a las restantes profundidades, con tiempos de memoria de los acuíferos entre 1 y 3 meses, lo cual es propio de los acuíferos carbonatados que presentan gran desarrollo cársico.





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

Los cambios en la composición química de las aguas como resultado de la mezcla entre el agua dulce (procedente del acuífero) y el agua de mar, pueden evaluarse a partir de las relaciones entre los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , así como otros iones minoritarios (Schoeller, 1962; Custodio y Llamas, 1976; Fagundo, 1996).

El método más recientemente utilizado para estudiar las modificaciones que experimentan las aguas 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 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  $\text{Cl}^-$  u otros  $\Delta$  iónicos (Giménez, 1994).

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 para cada ion (Tab.2).

Tabla 2. Ecuaciones de mezcla utilizadas para la determinación de los  $\Delta$  iónicos en el período 14/07/97–15/07/98 en el sector hidrogeológico Güira-Quivicán (Cuenca Sur de La Habana).

Ion	Concentración agua dulce (meq/l)	Concentración agua de mar (meq/l)	Ecuación
$\text{Cl}^-$	1.10	550.00	

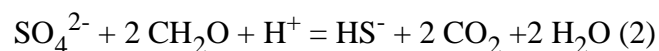
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.30	45.00	Y = 0.0814355 X - 0.210
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.50	2.40	Y = - 0.005648 X + 5.5062
Ca <sup>2+</sup>	6.10	22.00	Y = 0.030788 X + 5.066
Mg <sup>2+</sup>	0.30	104.00	Y = 0.1889 + 0.0922
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	0.40	477.40	Y = 0.869 X - 0.5559

X: concentración de Cl<sup>-</sup> en meq/l

Con el objetivo de evaluar las modificaciones que sufren las aguas de esta región en función de su salinidad, entre enero de 1997 y julio de 1998, se relacionan los incrementos o déficits iónicos con el porcentaje de mezcla de agua de mar que contiene cada muestra (figuras 1a-1d). Como puede apreciarse, en las figuras 3a-3d, los cambios más acentuados se producen, para todos los iones, a partir del 20 % de mezcla, alcanzándose las máximas variaciones entre 40 y 60 %.

En la figura 3a 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). 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 a todos los niveles y Santa Ana a 25 m), se observan intensos procesos de reducción de sulfatos ( $\Delta$  SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> negativos). En el resto de los pozos y niveles muestreados, los  $\Delta$  SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> son positivos, indicando procesos de oxidación de sulfuros. Este comportamiento es en general coherente, con los valores de Eh medidos en el campo (parte I de esta serie) y puede atribuirse a la acción de las bacterias anaeróbicas sobre los iones SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 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 reacción:

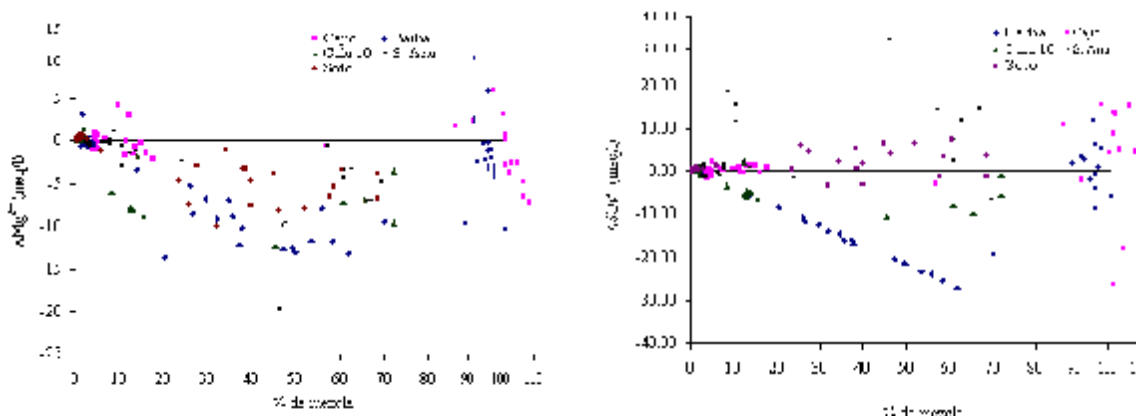
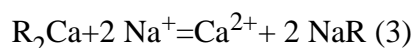


Donde CH<sub>2</sub>O representa la materia orgánica. En este proceso, por cada meq/l reducido de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> se producirán iguales cantidades en meq/l de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y de S<sup>2-</sup> en el agua (Shoeller, 1962, Drever, 1988).

Dicho proceso puede favorecer la disolución de la calcita en el acuífero y el sulfuro originado puede producir H<sub>2</sub>S, confiriéndole malos olores al agua, o precipitar en forma de piritita por acción del Fe<sup>2+</sup> presente en los sedimentos (Custodio y Llamas, 1976).



En la figura 3c se muestra 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 a partir de los 20 m de profundidad (donde las aguas alcanzan alrededor de un 20 % de mezcla con agua de mar) y denota un intenso proceso de corrosión química. Este aumento del  $\text{Ca}^{2+}$  se encuentra relacionado con la reducción de sulfatos. Otros procesos como la dolomitización y el de intercambio iónico inverso pueden también originar valores positivos de  $\Delta \text{Ca}^{2+}$ , en este último caso mediante la reacción:



a) b)

c) d)

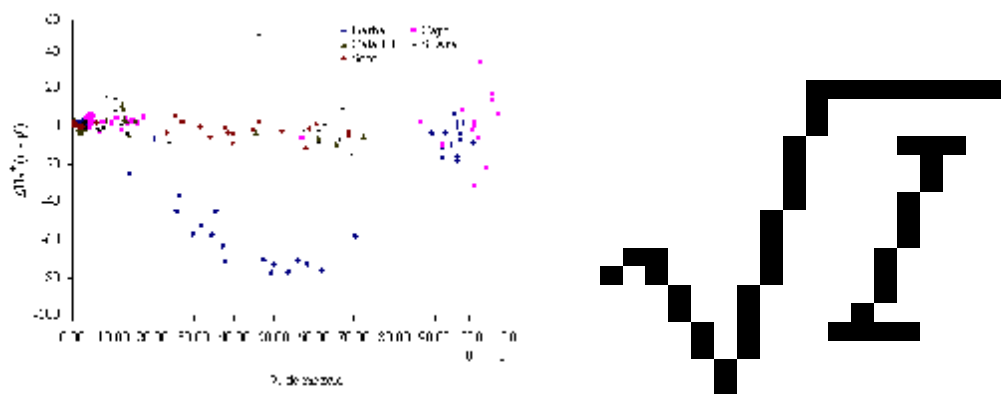


Figura 3.

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

En la figura 3d se observa una tendencia a la disminución del  $\Delta \text{Na}^+$  con el porcentaje de agua de mar en el pozo Alvaro Barba, la cual guarda relación con el incremento de  $\text{Ca}^{2+}$  en los mismos niveles de profundidad, debido al proceso de intercambio iónico inverso. 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.

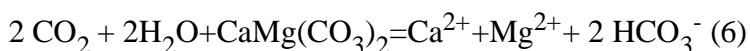
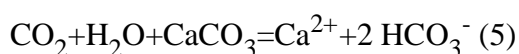
En los acuíferos detríticos con alto contenido de calcio disponible, la intrusión marina puede provocar un intercambio iónico inverso (Custodio y Llamas, 1976). Así las arcillas saturadas en  $\text{Ca}^{2+}$

son capaces de ceder este ion al agua a cambio del  $\text{Na}^+$  disuelto. En el acuífero cársico que nos ocupa, este mecanismo puede estar favorecido por la presencia de la materia orgánica aportada por la zona pantanosa. De acuerdo a los experimentos realizados por Meisel et al. (1979) en el laboratorio, las sales sódicas de los ácidos húmicos son capaces de intercambiar el sodio con iones alcalinos y alcalinos térreos, entre ellos el calcio.

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:

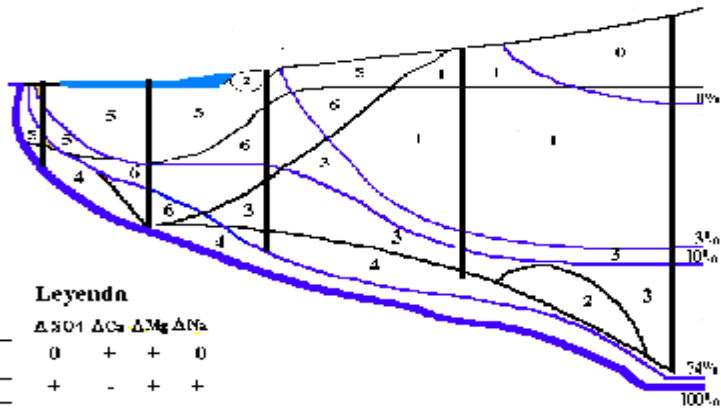


En la figura 3b se muestra cómo varía la magnitud  $\Delta \text{Mg}^{2+}$  con el porcentaje de mezcla. Como se puede apreciar, en la zona de difusión del acuífero, por lo general, tienden a primar los procesos de disolución de calcita con dolomitización, mientras que la disolución de dolomita con precipitación 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 de tiempo estudiado, los procesos geoquímicos que tuvieron 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 la materia orgánica por parte de la zona pantanosa, las oscilaciones de las mareas, el régimen de precipitación y de alimentación del acuífero, así como el grado de explotación del mismo por el hombre. Sobre esas bases se pueden distinguir hasta 7 zonas donde se producen series de procesos hidrogeoquímicos característico (Fig. 3).

**0 2 4 6 8 10 12 14 Dist. a la Costa (km)**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....



**Leyenda**

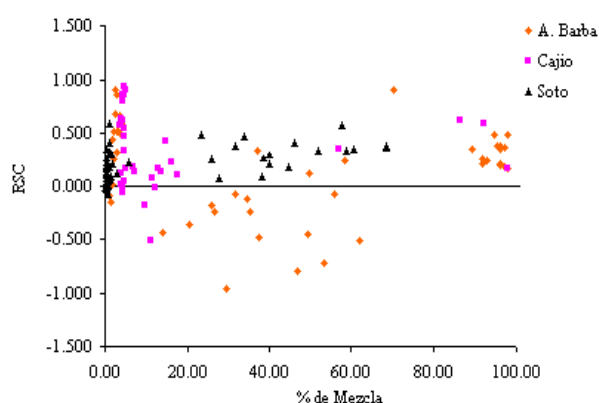
	$\Delta S O_1$	$\Delta C_2$	$\Delta M_2$	$\Delta N_2$
0	0	+	+	0
1	+	-	+	+
2	-	+	+	-
3	-	+		
4		1	-	1
5	-			+
6	-	-	-	+
6	-	1	-	-

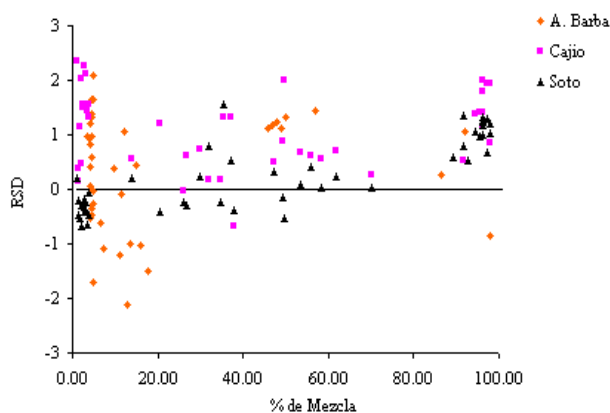
Figura 3. Procesos hidrogeoquímicos en el sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana.

### Relaciones de saturación de la calcita (RSC), la dolomita (RSD) y el yeso (RSY)

En las figuras 4a y 4b se muestran los resultados de las determinaciones de RSC y RSD respectivamente en las muestras analizadas en este trabajo. Estos resultados pueden resumirse como sigue: en la porción de agua dulce de los pozos más alejados de la costa (Sotolongo Díaz 10-11 m), las aguas tienden a encontrarse ligeramente saturadas respecto a la calcita e insaturadas con relación a la dolomita; en la zona de mezcla, tanto del área de recarga (Sotolongo Díaz 40 m) como de la zona de emisión del acuífero (Playa Cajío 2 y 17 m, Alvaro Barba 2 m), las aguas tienden a encontrarse más o menos saturados respecto tanto a la calcita como a la dolomita, con la excepción de las muestras de Alvaro Barba tomadas a 17 m, las cuales por lo general, se encuentran insaturadas con relación a la calcita y la dolomita durante todo el año. Con respecto al yeso todas las aguas se encuentran insaturadas, aunque las de la zona de contacto de la interfaz agua dulce-agua de mar (Playa Cajío 23 m y Alvaro Barba 34 m), presentan las menores insaturaciones.

El carácter agresivo o incrustante de las aguas y las magnitudes de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  extraídos o depositados en el decursar del tiempo geológico, especialmente durante el Cuaternario, han debido variar como consecuencia de las fluctuaciones glaciostáticas y los procesos regionales de descenso y ascenso neotectónico que han tenido lugar en esta área (Iturralde-Vinnet, 1981), así como a los cambios climáticos ocurridos en ese intervalo (Molerio y Flores, 1997), todo lo cual ha dejado huellas en el acuífero, que se pone de manifiesto en la distribución del cavernamiento y en la deposición de calcita y dolomita a diferentes profundidades en los pozos perforados en la región.





a) b)

Figura 4. Variación de las relaciones de saturación con respecto a la calcita (a) y a la dolomita (b) con el porcentaje de agua de mar en la mezcla en el período de enero del 1997 a julio de 1998.

## 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), 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  $\text{Cl}^-$  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 la interfaz en que el agua subterránea hace contacto con el agua de mar. Estos procesos tienden a producir a su vez, incrementos en los contenidos de calcio a expensas del material carbonatado del acuífero. Estos cambios dependen del porcentaje de agua de mar en la mezcla y 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 por cavernamiento, así como producir un mayor deterioro de la calidad del agua.

## BIBLIOGRAFIA

1. Aminot, A. (1974). Geochimie des eaux d'aquiferes karstiques. 2- Les analyses chimiques en Hydrologie Karstique. Ann. Speleol., 29 (4): 462-486.
2. Appelo, C.A.J. and D. Postma (1993). Geochemistry, Groundwater and Pollution. Balkema, Rotterdam, 536 pp.
3. Back, W. and B.B. Hanshaw (1981). Chemical characterization of cave, cove, caleta and karst creation in Quintana Roo. Geological Society of America Abstracts., 94 th Annual Meeting: 23 (7), 400.
4. 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.
5. Bitton, G. (1994). Role of Microorganisms in Biogeochemical Cycles. In: Wasterwater

Microbiology. Ed. Wiley-Liss, 51-73.

6. Custodio E. y R. Llamas (1976). 2<sup>a</sup> Ed. Hidrología Subterránea, Ed.: Omega, Barcelona, 2350 pp.
7. 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.
8. Drever J.I. (1998). The Geochemistry of Natural Waters. 2<sup>0</sup> Edition. Prentice Hall, New Jersey, 437 pp.
9. 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.
10. 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.
11. Iturralde - Vinent M.A. (1981). Nuevo modelo interpretativo de la evolución geológica de Cuba. Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio, (3): 51-58.
12. Meisel J., B. Lakatus and G. Mády (1978). Biopolymer-metal complex systems. VII. Study of ion exchange and redox capacity of peat humic substances. Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae 28: 75-82.
13. Molerio, L.F. y E. Flores (1997). Paleoclimas y paleocarsos: los niveles de cavernamiento y la variabilidad del clima tropical en el golfo de México y el Caribe. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguiedad, Bilbao, 225-223.
14. Schoeller, H. (1962). Les eaux souterraines. Ed. Masson, Paris, 642 pp.

[Volver al índice del V Taller](#)

[Volver al índice de Talleres](#)