

# Hidrogeoquímica del sistema acuífero de la costera sur de Camagüey



M. Sc. Ing. GLADIS YERA DIGAT

Subdirectora docente de la Sede Universitaria Municipal de Céspedes. Universidad de Camagüey.

E-mail: [gladis.yera@reduc.edu.cu](mailto:gladis.yera@reduc.edu.cu)



Dr. CONSTANTINO DE MIGUEL FERNÁNDEZ

Profesor auxiliar del Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa. E-mail: [cdemiguel@ismm.edu.cu](mailto:cdemiguel@ismm.edu.cu)

## ► INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas que más preocupa hoy a la comunidad científica mundial es la preservación de la cantidad y calidad de las aguas dulces disponibles para dar solución a las necesidades económicas y sociales de la humanidad. Cerca de la quinta parte de estas necesidades se satisface a expensa de las aguas subterráneas, que en muchas ocasiones el hombre usa de forma inadecuada.

Dentro de las aguas subterráneas se destacan por su alto nivel de vulnerabilidad los acuíferos cársicos costeros abiertos al mar, muchas veces sobreexplotados y afectados por procesos de intrusión salina. En estos acuíferos generalmente no se conocen los mecanismos que determinan las características de calidad de sus aguas, lo que impide que se realice una explotación sostenible de este recurso.

En la provincia de Camagüey el 20% del volumen de agua cuantificada es aportada por los acuíferos costeros, siendo el acuífero Costera Sur el más importante por su extensión y la magnitud de sus recursos (aporta el 82% del volumen total de aguas

subterráneas extraídas en la provincia). El acuífero en cuestión es una franja paralela a la línea costera de ancho variable entre 15 y 20 km<sup>2</sup>, que limita al norte con la zona central de la provincia, al oeste con la provincia de Ciego de Ávila, al este con la provincia de Las Tunas, y al sur con el mar Caribe. En la figura 1 aparece la ubicación geográfica del área de estudio, ocupando partes de 6 hojas cartográficas a escala 1:100 000: Hoja 4480 (Júcaro), Hoja 4580 (Florida), Hoja 4479 (Cayo Algodón Grande), Hoja 4579 (Vertientes), Hoja 4578 (Cándido González) y Hoja 4678 (Amancio Rodríguez)

## Condiciones geológicas y estructurales

Cuba pertenece a la placa Norteamérica, al sur del Oriente cubano pasa el límite con la placa del Caribe, que se desplaza hacia el este. El Megabloque del Archipiélago Cubano se subdivide a lo largo de fallas transversales, diagonales y longitudinales; en este mosaico morfoestructural se encuentra el mesobloque Camagüey, limitado en sus extremos por las fallas La Trocha y Nipe-Guacanayabo.

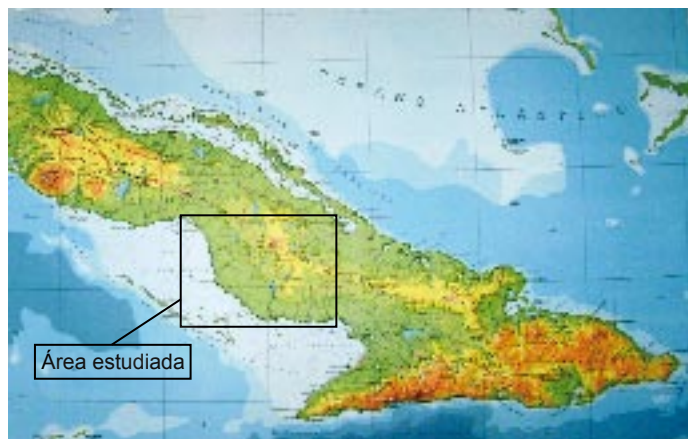


Figura 1: Ubicación geográfica del área de estudio.

### Mapa geológico del área de estudio

En el área se encuentran rocas de edad miocénica, representadas por las formaciones Arroyo Palma y Güines, y depósitos no consolidados del cuaternario. En la Fig. 2 se puede observar el mapa geológico del área de interés

La Formación Arroyo Palma (Mioceno inferior – medio), comprende aleurolitas blancuzcas hasta amarillo cremoso o arcillas y margas muy calcáreas, sin estratificación clara, y calizas arcillosas cavernosas, con distribución regular tanto en dirección vertical como horizontal. El ambiente de acumulación de aguas neríticas, plataformicas, en condiciones de bahías tranquilas, con predominio de sedimentación lodosa - carbonatada en algunos lugares calcarenitas. Pueden estar cubiertas por Fm. Güines o por depósitos más jóvenes del Cuaternario.

La Formación Güines (Mioceno medio), comprende calizas fuertes, masivas, cristalinas, blancas hasta rosadas, muy cavernosas, con organismos marinos y lentes de arcilla. Sus rocas están fuertemente recristalizadas o dolomitizadas y en la parte inferior de la formación se intercalan desde calizas arcillosas hasta margas; generalmente Güines yace concordante sobre Arroyo Palma y raramente discordante y transgresivamente sobre rocas paleogénicas. El ambiente de sedimentación es de aguas someras, calidas, tranquilas, hasta moderadamente agitadas.

Tabla 1: Distribución de muestras hidroquímicas por subcuencas.

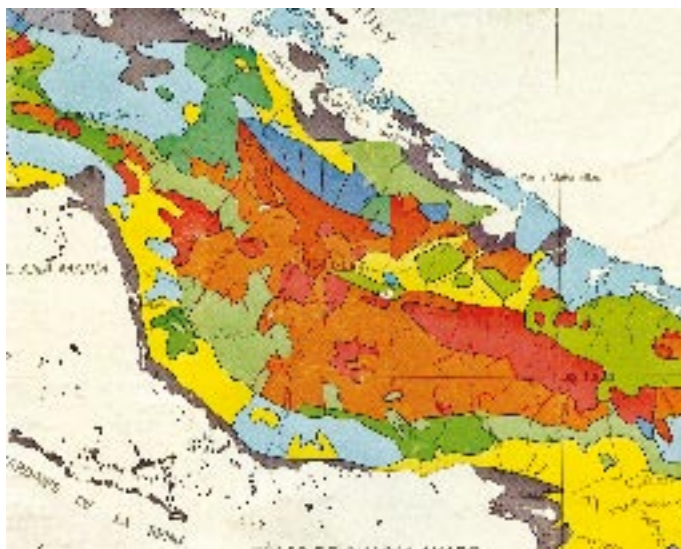
Subcuenca	Número de pozos	Observaciones hidroquímicas		
		Fin seco	Fin húmedo	Total
Florida	18	259	211	470
Vertientes	25	403	233	636
Sierra Maestra	16	159	84	243
Najassa	18	335	206	541
Total	77	1 156	734	1 890

### Reservas y uso de las aguas subterráneas

El acuífero cársico de interés se divide a lo largo de la línea costera en 4 subcuencas, de oeste a este: Subcuenca Florida (sectores de explotación CI-1 al CI-4); Subcuenca Vertientes (sectores de explotación CI-5 al CI-13), Subcuenca Sierra Maestra (sectores de explotación CI-14 y CI-15), Subcuenca Najasa (sector de explotación CI-16).

La potencia media del acuífero es de 50 m, con un gradiente hidráulico medio de 0.0006, el volumen de recursos explotable de alrededor de 280 hm<sup>3</sup>. Las reservas de agua subterráneas han sido destinadas fundamentalmente al riego de arroz, pastos y caña, y en algunos casos se combina con la explotación de aguas superficiales.

Figura 1: Mapa geológico del área.



### Información hidrogeológica primaria

Como resultado del monitoreo de la red pozos de observación de las aguas subterráneas se cuenta en la provincia con una base de datos hidrogeológica en la superficie y en profundidad; con frecuencia de observación que puede ser semestral o anual, recogida con más o menos regularidad.

Para el presente trabajo fueron seleccionados 77 pozos de la red de monitoreo, que poseen la mayor cantidad y calidad de las observaciones, así como una distribución espacial más o menos homogénea.

En la tabla 1 aparecen desglosados (por subcuencas y por períodos hidrológicos) las muestras hidroquímicas superficiales seleccionadas, después de un riguroso análisis de calidad de la información, donde fueron analizados el pH, conductividad eléctrica y los contenidos de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y SST (sales solubles totales).

Con el objetivo de valorar si los períodos hidrológicos influyen notablemente en la composición química de las aguas subterráneas, fue analizado el comportamiento de los 35 pozos. En cada uno de los pozos seleccionados, las observaciones fueron separadas por períodos hidrológicos (fin seco y fin húmedo) y se pudo apreciar que la media de los contenidos al finalizar el período seco es más alta que el observado al terminar el período húmedo; pero, ¿son notables estas diferencias?; con el objetivo de definir esto se diseñó una prueba no paramétrica denominada *Prueba de suma de rangos* para cada uno de los componentes mayoritarios del agua ( $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ) y las SST.

Se comienza la prueba clasificando los datos conjuntamente, como si formaran una sola muestra, en orden creciente de su magnitud, en caso de existir nexos entre valores pertenecientes a diferentes muestras, asignándole a cada una de las observaciones la media de los rangos que tienen conjuntamente. La suma de los rangos de las muestras son  $w_1$  y  $w_2$ , respectivamente. La decisión recae sobre los estadígrafos  $U_1$ ,  $\mu_{u1}$ ,  $\sigma_{u1}^2$  y  $Z$  donde:

$$U_1 = W_1 - \frac{n_1(n_1+1)}{2}; \sigma_{u1}^2 = \frac{n_1 * n_2 (n_1+n_2+1)}{12} \text{ y } Z = \frac{U_1 - \mu_{u1}}{\sigma_{u1}}$$

Se plantean entonces las siguientes hipótesis:

$H_0$ : La composición química de las aguas en los períodos hidrológicos no difiere.

$H_1$ : La composición química de las aguas en los períodos hidrológicos difiere.

La hipótesis nula pretende probar que en la composición química de las aguas subterráneas no influye considerablemente el régimen de lluvias, a un nivel de significación de  $\alpha = 0.01$ , contra la hipótesis alternativa de que las lluvias influyen considerablemente. La hipótesis nula se rechaza si  $Z < -2.575$  ó  $Z > 2.575$ .

En la tabla 2 se puede apreciar los pozos en que se rechaza la hipótesis nula, en al menos un componente y los valores de  $Z$  asociados.

	$HCO_3$	$Cl^-$	$Ca^{2+}$	$Na^+$	$Mg^{2+}$	SST
710		1.53				
674	1.18					
11606	1.29		1.38			1.13
B1-F		1.23				
B8-N	1.35					
B4-N	1.34	1.72		1.84	1.54	1.44

Tabla 3: Relación FinSeco / FinHúmedo.

Al analizar cada uno de los pozos en que se detectó diferencias notables entre los períodos hidrológicos, para un nivel de significación de 0.01 pudimos observar que estos, generalmente, se encontraban cerca de la zona de descarga o en zonas intensamente explotadas.

En la tabla 3 se puede apreciar la relación de medias de los pozos con diferencias notables, pero estas diferencias no son tales que impidan trabajar la información como una muestra única para cada pozo.

Se puede concluir que los contenidos de los elementos fundamentales al finalizar el período seco alcanzan valores más altos que los que se tienen al finalizar el período húmedo, pero que estas diferencias, en sentido general, no son notables; y que los procesos que traen consigo un incremento de los contenidos de los distintos elementos en el agua, se encuentran en equilibrio dinámico con los procesos de precipitación.

#### Prueba de normalidad

Con el objetivo de realizar predicciones y emplear correctamente distintas técnicas estadísticas, se analizó la posibilidad de ajustar las distintas variables hidrogeoquímicas a un modelo teórico de distribución; probando primeramente con la ley de distribución normal. Para las variables aleatorias continuas la densidad de probabilidad normal, o simplemente distribución nor-

No.	Pozos	Muestras		Valores de Z calculados					
		$n_1$	$n_2$	$HCO_3$	$CL$	$Ca^{2+}$	$Na^+$	$Mg^{2+}$	SST
1	710	17	11	-1.434	-1.788	-0.659	-2.822	-1.529	-2.187
2	674	21	19	-2.708	-1.463	-1.259	-0.541	-0.948	-2.505
3	11606	20	14	-2.939	-0.018	-3.062	-0.122	-0.962	-2.799
4	B1-F	20	21	-1.630	-2.739	-0.196	-0.000	-1.460	-0.026
5	B8-N	18	10	-2.613	-1.127	-2.205	-1.127	-1.462	-1.726
6	B4-N	24	19	-3.106	-4.121	-2.311	-3.448	-3.106	-3.937

Tabla 2: Pozos con componentes que poseen diferencias notables.

mal, es la más importante de todas leyes de distribución teóricas, se dice que una variable aleatoria  $X$  se distribuye normalmente si su función de densidad está dada por:

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < \infty$$

El primer análisis para evaluar la normalidad de una variable se basa en la observación del gráfico histograma de frecuencia de las variables y la comparación de estos gráficos con el gráfico de distribución normal de las probabilidades. Además del análisis antes descrito, se puede evaluar la normalidad a partir de una prueba basado en la esbeltez de la distribución (curtosis).

La prueba de la curtosis se aplica a cada una de las variables, empleando para ello unas nuevas la variable estandarizada denominada  $Z_{curtosis}$  que se obtiene de la siguiente forma:

$$Z_{curtosis} = \frac{Curtosis}{(24/N)^{1/2}}$$

Se plantean entonces las siguientes hipótesis:

$H_0$ : La variable cumple con la ley de distribución normal

$H_1$ : La variable no cumple con la ley de distribución normal

El valor calculado de  $Z_{curtosis}$  se compara con el valor crítico para un nivel de confianza de  $\alpha = 0.01$ , la hipótesis nula se rechaza si:  $Z < -2.575$  ó  $Z > 2.575$ .

Si el valor calculado no excede el valor crítico, entonces el gráfico de frecuencia se puede ajustar a la curva de distribución normal.

De los 77 pozos analizados, alrededor del 90% de ellos ajusta sus variables hidrogeoquímicas a la ley de distribución normal. Los pozos con variables que desvían su comportamiento de la normalidad se encuentran afectados por condiciones hidrológicas extremas y condiciones de sobreexplotación.

Las condiciones hidrológicas extremas en el área se dieron en el periodo seco de 1987, después de una

intensa sequía de más de dos años, asociada también a altos niveles de explotación del acuífero. Un régimen de sobreexplotación en la cercanía del pozo provoca pérdida en las condiciones de normalidad de las variables hidrogeoquímicas, si se mantienen estas condiciones de explotación en el tiempo se alcanzan nuevas condiciones de normalidad (figura 3).

### Causas que determinan el quimismo de las aguas en el acuífero

Para definir las variables que determinan el quimismo de las aguas en el acuífero se propone emplear, dentro de las técnicas estadísticas multivariantes, el análisis factorial clásico, que se basa en el reordenamiento o reducción del espacio evidencia, dando lugar a componentes o factores que pueden tomarse como variables causales de acuerdo a la interrelación existente entre las variables observadas. El análisis factorial clásico se basa en la propiedad de la correlación de las variables.

Las nuevas variables o factores se determinan de modo que expliquen la mayor varianza de la población, calculándose también la contribución de cada variable antigua a cada nuevo factor. La primera de las nuevas variables tiene la máxima varianza y así sucesivamente para el resto de las nuevas variables. Serán seleccionados únicamente aquellas componentes cuya varianza  $\lambda$  sea mayor que 1; esto se basa en el hecho de que cualquier factor debe representar más variación que las variables originales estandarizadas.

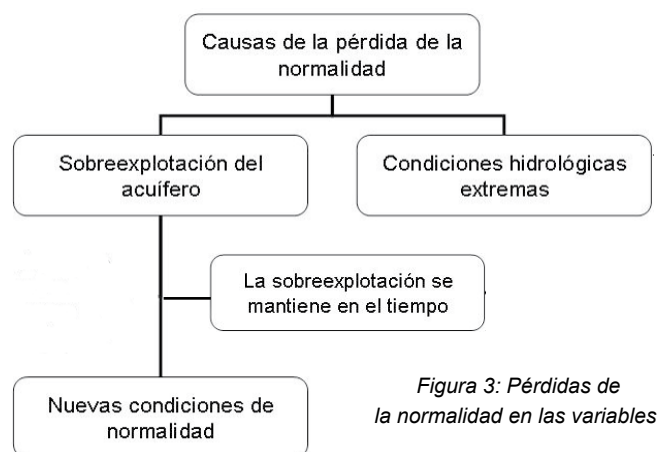
En el análisis factorial clásico debe realizarse la rotación de los ejes para lograr la máxima variabilidad de los factores, mejorar la interpretación de la matriz factorial y reducir el nivel de ambigüedades. El nuevo sistema de ejes factoriales, que se corresponde con una matriz factorial de estructura simple, deberá presentar carga lo más cercana posible a uno o a cero, respectivamente. Como las nuevas variables van a estar no correlacionadas, se realiza una rotación ortogonal por el método Varimax Normalizada. El método Varimax Normalizado persigue los objetivos:

- Simplificar las columnas de la matriz factorial.
- Alcanzar la máxima simplificación posible de las columnas de la matriz factorial.
- Maximizar la suma de las varianzas de las cargas requerida de la matriz de factores.

La matriz de correlación estimada entre variables es del orden  $10 \times 10$ , partiendo de la matriz observacional de orden  $77 \times 10$  (770 elementos).

En la tabla 4 se puede apreciar la matriz de correlación lineal, donde se destacan el alto nivel de asociación de las variables SST con el  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$ ; también se destaca las correlaciones  $Cl^- - Na^+$  y  $Cl^- - Mg^{2+}$ ; estos comportamientos son propios de aguas afectadas por procesos de intrusión salina.

Al realizar el análisis factorial, excluyendo las SST, se obtiene la matriz de valores propios donde se pue-



	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K	SST
CO <sub>3</sub>	1	-0,01	0,06	0,02	-0,01	0,07	0,06	0,04	0,13	0,05
HCO <sub>3</sub>		1	0,12	0,16	-0,06	0,33	0,43	0,22	-0,12	0,37
Cl			1	0,49	-0,03	0,63	0,79	0,89	0,22	0,93
SO <sub>4</sub>				1	-0,01	0,18	0,22	0,78	0,11	0,7
NO <sub>3</sub>					1	0,03	-0,05	-0	-0,04	0,01
Ca						1	0,6	0,38	-0,06	0,6
Mg							1	0,6	0,11	0,75
Na								1	0,22	0,96
K									1	0,18
SST										1

Tabla 4: Matriz de correlación de las variables.

de observar que 4 variables causales explican más del 76% de la variabilidad del sistema; en la tabla 5 se puede ver que porcentaje de varianza total es explicada por cada una de las nuevas variables.

Las nuevas variables se obtienen como combinación lineal de las variables originales. En la tabla 6 se puede apreciar el grado de asociación de las variables originales con los factores; atendiendo al tamaño de la muestra (77 pozos) se consideran cargas significativas aquellas mayores de 0.62.

Quedan definidas las siguientes variables causales de la geoquímica en la Costera Sur de Camagüey:

Variable 1: El proceso de intrusión salina explica más del 38% de la varianza del sistema.

$$Y_1 = 0.75 Cl^- + 0.84 SO_4^{2-} + 0.91 Na^+$$

Variable 2. La composición litológica del medio rocoso explica cerca del 15% de la varianza total.

$$Y_2 = 0.68 HCO_3^- + 0.80 Ca^{2+} + 0.79 Mg^{2+}$$

Variable 3. La actividad agrícola explica cerca del 12% de la varianza.  $Y_3 = 0.82 CO_3^{2-}$

Variable 4. El empleo de fertilizantes explica más del 11% de la varianza.  $Y_4 = 0.97 NO_3^-$

#### Variación del comportamiento hidroquímico en el tiempo

En sentido general que los contenidos de  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  y  $SST$ , igual que la relación  $Cl^-/HCO_3^-$ , a principios de la década de los años 60 eran altos y continuaron con un vertiginoso

ascenso en las zonas de alto nivel de explotación (fundamentalmente en partes de Florida y Najasa) hasta finales de la década del ochenta y principios de los noventa donde gran cantidad de las áreas que se dedicaban al cultivo del arroz dejaron de ser explotadas, por falta de combustible en el periodo especial, lo que trajo consigo que los contenidos de los elementos, fundamentalmente aquellos asociados a la intrusión salina ( $Cl^-$  y  $SST$ ) descendieran considerablemente.

A modo de ejemplificar las variaciones de los contenidos de  $Cl^-$  y de  $SST$  entre los años 1982 y 2007, se puede analizar el caso del pozo B3-N en la subcuenca Najasa, donde se pueden apreciar cambios bruscos a partir de octubre de 1993 (figura 4). Antes de la fecha señalada, se tuvo una media de  $Cl^-$  que ascendía a 305.1 mg/l, que luego descendió hasta alcanzar un valor medio de 99.6 mg/L; en el caso del contenido medios de las  $SST$ , estas descendieron de 1 040 mg/L a 525 mg/L. Mediante el empleo de modelación hidrogeoquímica se pudo conocer que en la superficie del pozo B3-N los contenidos de agua de mar que llegaron

Factores	Valores propios	% varianza total	% acumulado
1	3.454	38.487	38.487
2	1.338	14.868	53.355
3	1.067	11.854	65.219
4	1.014	11.267	76.486

Tabla 5: Matriz de vectores propios.

Tabla 6: Matriz de vectores propios.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
$CO_3$	-.148485	.140447	.81587	.045854
$HCO_3$	-.024954	.684706	-.23061	-.16848
$Cl$	.753275	.526309	.206893	.03438
$SO_4$	.843742	.021997	-.10446	-.01679
$NO_3$	.002078	-.040179	-.0299	.974164
$Ca$	.215271	.803272	.088412	.13287
$Mg$	.400655	.789896	.144749	-.03132
$Na$	.914578	.323996	.064224	.016912
$K$	.371599	-.257837	.603832	-.142498

a alcanzar el 3%, descendieron hasta valores próximos al 0.2%.

En el caso de la subcuenca Florida las variaciones en los contenidos se produjeron alrededor 1995 y la amplitud de las variaciones fue menor; asociado al hecho de que la actividad de riego no descendió tanto como en otras áreas.

A modo de resumen debe destacarse que las variaciones en los contenidos de los componentes del agua, si bien no ha sido homogénea en toda la cuenca, se observa un descenso general, vinculado a las limitaciones en el riego, determinando en el acuífero un notable retroceso del proceso de intrusión salina.

### Conclusiones

1.El contenido de macroelementos en el agua es mayor al culminar el período seco, pero estas diferencias son notables, para un nivel de significación de 0.01, solo cuando el pozo se encuentra próximo a la zona de descarga y de forma general en el territorio se cumple con la ley de distribución normal que solo se ve alterada si se sobreexplota la zona o se dan condiciones de sequía extremas.

2. Si se mantienen en el tiempo las condiciones de sobreexplotación se obtienen nuevas condiciones de normalidad.

3. Como variables causales del quimismo en el acuífero se tienen:

■ Proceso de intrusión salina.

$$Y_1 = 0.75 Cl^- + 0.84 SO_4^{2-} + 0.91 Na^+$$

■ Composición litológica.

$$Y_2 = 0.68 HCO_3^- + 0.80 Ca^{2+} + 0.79 Mg^{2+}$$

■ Actividad agrícola.  $Y_3 = 0.82 CO_3$

■ Empleo de fertilizantes.  $Y_4 = 0.97 NO_3^-$

4. Las condiciones de sobreexplotación determinan la evolución del proceso de intrusión salina en el acuífero.

### Recomendaciones

1. Continuar profundizando en el estudio de los procesos de adquisición de la composición química de las aguas subterráneas a partir de la modelación hidrogeoquímica.

2. Extender los estudios hidrogeoquímicos a otros acuíferos cársicos afectados por procesos de intrusión salina. ◀

### Bibliografía

- BARROS, O.: "Variabilidad de la intrusión en Cuencas costera Cársicas en Cuba", en revista *Voluntad Hidráulica* (pp. 87-88). La Habana, 1997
- CUSTODIO, E., Y M. R. LLAMAS: *Hidrología Subterránea*, Ed. Omega, S. A. Barcelona, España, 1996.
- FAGUNDO, J.; J. VALDÉS E I. RODRÍGUEZ: *Hidroquímica del Kars*. País Vasco, 1996.
- GONZÁLEZ, P.: "Contribución al conocimiento hidrogeoquímico de acuíferos cársicos costeros con intrusión marina. Sector Güiriquicán, Cuenca Sur de La Habana". Tesis Doctoral. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". La Habana, 2003.
- HERNÁNDEZ, A., Y H. LLANUSA: La intrusión salina y el manejo de los recursos hidráulicos en los acuíferos costeros. Sin editar (2006).
- MOLERIO, L.: "Desviaciones en la estimación de las profundidades de la interfase agua dulce-agua salada en los acuíferos cársicos costeros", en *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol XXIII No 3, 2002.
- PÉREZ, D.: La Explotación del Agua Subterránea. Un Nuevo Enfoque". Editora Géminis Ltd. Colombia, 1995.
- YERA, G., Y L. MOLERIO: "Hidrodinámica Geoquímica del Sistema Acuífero de la Costera Sur de Camagüey, Cuba", en *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*. País Vasco, 1996.

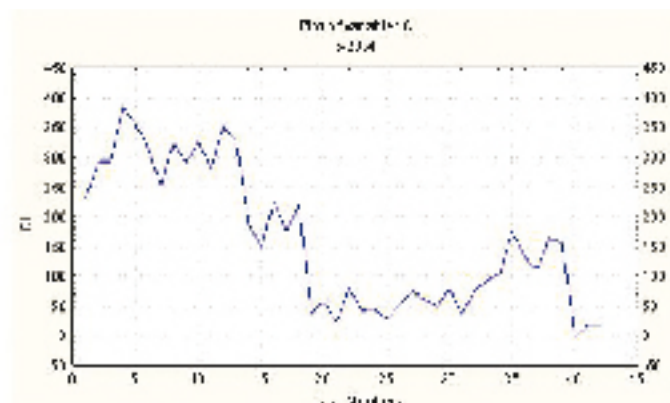
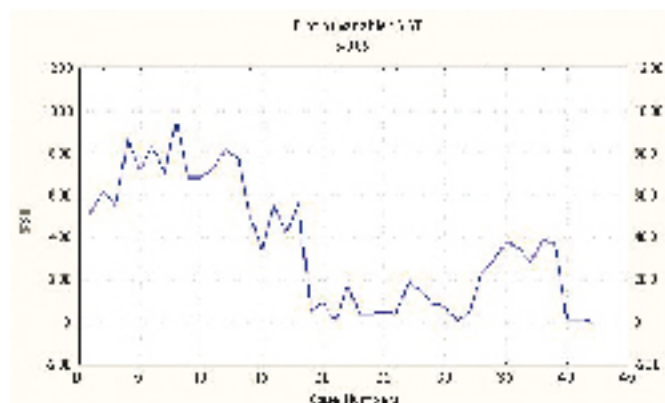


Figura 4: Comportamiento de los contenidos de  $Cl^-$  y SST en el pozo B3-N.