

Métodos estadísticos en el estudio hidrogeoquímico del sistema acuífero Costera Sur de Camagüey, Cuba

Gladis Yera Digat
Constantino de Miguel Fernández
Juan R. Fagundo Castillo

Resumen

Se muestran los resultados de la aplicación de técnicas estadísticas avanzadas en el estudio hidrogeoquímico del sistema acuífero Costera Sur de la provincia de Camagüey (Cuba), contando para ello con los resultados de monitoreo hidroquímico e hidrodinámico que por más de 27 años ha realizado el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos; se dispone además de información geológica, hidrogeológica, de explotación y de precipitaciones. En la investigación fueron empleadas técnicas estadísticas univariadas, pruebas no paramétricas de suma de rangos, prueba de la curtosis y técnicas estadísticas multivariadas (análisis factorial clásico y análisis cluster), las que han permitido obtener, entre otros, los siguientes resultados: la media de los macroconstituyentes es más alto en el período seco que en el período húmedo, pero estas diferencias no son notables para $\alpha = 0,01$; el régimen de explotación influye notablemente en la composición química de las aguas, para $\alpha = 0,01$; los macroconstituyentes en las aguas cumplen con la ley de distribución normal, las condiciones hidrológicas extremas y un intenso régimen de explotación provocan la pérdida de las condiciones de normalidad; cuatro variables causales, encabezadas por los procesos de intrusión salina, determinan alrededor del 78 % de la variabilidad del sistema; la agrupación automática mediante los cluster, permite obtener grupos de pozos con características semejantes de potabilidad.

Palabras clave

Acuífero cársico, estadística multivariada, hidrogeoquímica, intrusión salina.

Statistical methods used in the hydro-chemical study on the aquiferous system of the Southern coast, Camagüey

Abstract

This work presents the results of the application of advanced statistical techniques in the hydro geochemical study on the aquiferous system in the southern coast of Camaguey province; which were based on the results of hydrochemical and hydrodynamic monitoring conducted by the National Institute of Hydraulic Resources over the past 27 years in addition to the geological and hydrogeological data available on exploitation and precipitation. The implementation of univariate and multivariate statistical techniques (classic factor and cluster analysis), non-parametric sum of range procedures and kurtosis test provided the following results: the average value of macro-constituents is higher during the dry season than during the wet season; however, these differences are not significant for $\alpha = 0,01$; the composition of water for $\alpha = 0,01$ is greatly influenced by the exploitation rate; the macro constituents of the waters comply with the normal distribution law; abnormal conditions occur as a result of extreme hydrologic conditions and intensive exploitation. Four causal variables, led by saline intrusion processes, represent at about 78% of the system variability. A series of pits having similar potability characteristics can be obtained by automatic cluster grouping.

Key words:

Carsic aquifer, multivariate statistics, hydrogeochemistry, saline intrusion.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la civilización humana ha traído como consecuencia una mayor y más intensiva explotación de las aguas subterráneas; en el caso particular de los acuíferos cársicos costeros abiertos al mar, esto define su alto nivel de vulnerabilidad.

El territorio cubano está constituido en más del 65 % por un medio geológico cársico que contiene aproximadamente el 80 % de los recursos totales de agua subterránea (Molerio 2004); gran parte de estos recursos se encuentran afectados por procesos de intrusión salina o en peligro inminente de estarlo.

En la provincia de Camagüey el 20 % del volumen de agua cuantificada es aportado por los acuíferos costeros, siendo el Costera Sur el más importante por su extensión y la magnitud de sus recursos al contener el 82 % del volumen total de aguas subterráneas que se extraen en la provincia.

Este acuífero puede describirse como una franja paralela a la línea costera de ancho variable entre 15 y 20 km, limita al norte con la zona central de la provincia, al oeste con la provincia de Ciego de Ávila, al este con la provincia las Tunas, y al sur con el Mar Caribe (Figura. 1).

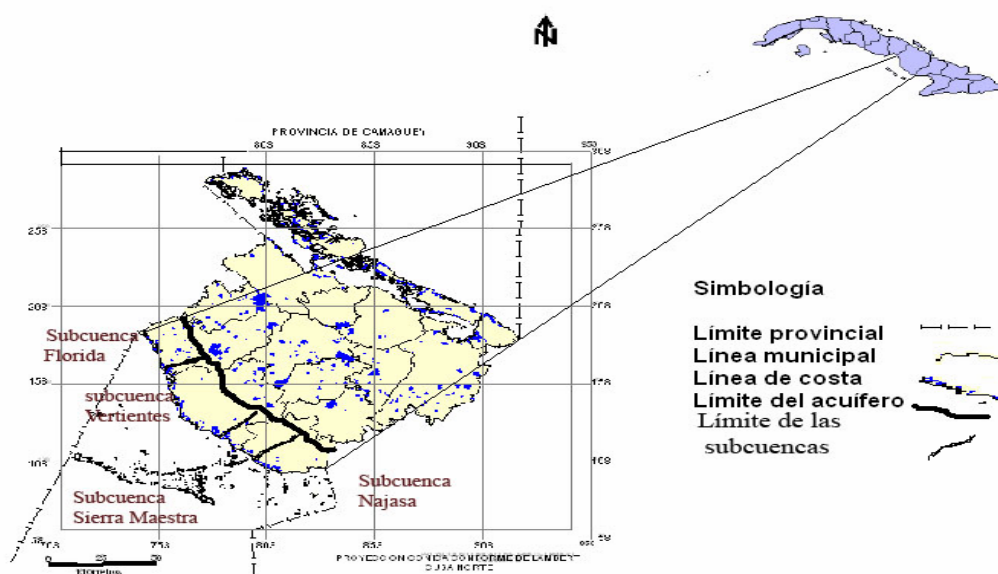


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

Atendiendo a la importancia económica y social de las aguas subterráneas del acuífero Costera Sur, y al hecho de haber mostrado afectaciones en sus condiciones de potabilidad, se hace necesario conocer los mecanismos que determinan las características de calidad de sus aguas para realizar una explotación sostenible de estos recursos. Para ello se propone el empleo de los métodos estadísticos, ampliamente utilizados para caracterizar las aguas subterráneas así como para evaluar sus características de calidad.

Se emplearon técnicas estadísticas univariadas, pruebas no paramétricas de suma de rangos, prueba de la curtosis y técnicas estadísticas multivariadas (análisis factorial clásico y análisis cluster) con los objetivos siguientes:

1. Determinar cómo influyen el ciclo hidrológico y el régimen de explotación en las características de calidad de las aguas.
2. Valorar el ajuste de las variables hidrogeoquímicas a la ley de distribución normal.
3. Definir las variables causales de las características hidroquímicas.
4. Crear grupos de pozos con características semejantes de potabilidad.

Condiciones geológicas y estructurales del área de estudio

Las rocas presentes en el territorio de la actual Cuba son el resultado de complejos procesos de evolución de rocas originadas en ambientes diversos que fueron evolucionando en paleoambientes ya desaparecidos y en el ambiente actual.

En el territorio insular predominan rocas sedimentarias originadas como consecuencia de la acumulación de materiales en la superficie terrestre, formadas en ambiente marino, que afloran a la superficie o como resultado de la actividad biógena. Cuba forma parte de la placa Norteamericana, y al sur del oriente cubano se encuentra el límite con la placa del Caribe, que se desplaza hacia el este a razón de 15 mm anuales.

El megabloque del archipiélago cubano se subdivide a su vez a lo largo de fallas transversales, diagonales y longitudinales, en un conjunto

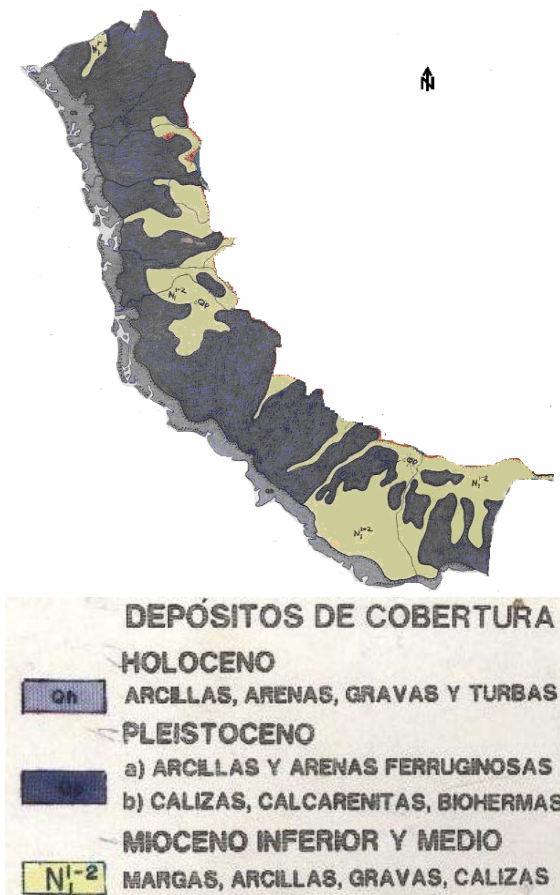
de unidades de distintos órdenes, con magnitudes que oscilan entre cientos de kilómetros, hasta cientos de metros. En este mosaico morfoestructural se encuentra el mesobloque Camagüey, limitado en su extremo occidental por la falla La Trocha y en la parte oriental por la falla Nipe-Guacanayabo (Iturralde *et al.* 2006).

En el Eoceno Medio, Cuba comienza una etapa geotectónica caracterizada por el predominio de los movimientos verticales que subdividieron el territorio en diferentes bloques a los cuales se superpusieron las grandes transgresiones marinas del Neógeno hasta el Cuaternario, que depositaron capas de cobertura generalmente carbonatada y de origen terrígeno provenientes del material erosionado y redepositado en valles de ríos y en la línea de costa que constantemente cambiaba su posición sobre las estructuras antiguas del basamento correspondiente al área del mesobloque.

En todo el sur de la provincia de Camagüey, sobre el basamento, se desarrolla la cobertura platafórmica del Neógeno, de carácter neoaυτόctono del Mioceno temprano (Figura 2). Dicha cobertura la componen las formaciones Arroyo Palma y Güines que pueden llegar a alcanzar espesores entre 250 y 300 m. Esta cobertura yace discordante sobre el substrato.

La Formación Arroyo Palma, de edad Mioceno Inferior-Medio, se presenta en el área en pequeños afloramientos de 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 los sedimentos de esta formación se supone de aguas neríticas, platafórmicas, en condiciones de bahías tranquilas, con predominio de sedimentación lodosa-carbonatada, en algunos lugares las calcarenitas transicionan hacia las facies periarrecifal. Al comienzo del Mioceno temprano predominaba la deposición de sedimentos gruesos, alimentada por el proceso de erosión activa en las tierras colindantes, a consecuencia del avance de la trasgresión; con el avance de esta, se impone una nueva sedimentación de tipo pelítico-carbonatada, donde las dos componentes estaban en equilibrio oscilatorio.

Pueden estar cubiertas por la Formación Güines o por depósitos más jóvenes del Cuaternario.



Fuente: Atlas de Camagüey / 1989
 Figura 2. Mapa geológico del área.

La Formación Güines se descubre en muchos pozos o calas del territorio. Se compone de calizas fuertes, masivas, cristalinas, blancas hasta rosadas, muy cavernosas, con organismos marinos y lentes de arcillas. Las rocas están fuertemente recristalizadas o dolomitizadas y en la parte inferior de la formación se intercalan desde calizas arcillosas hasta margas; este fenómeno también ocurre en la cercanía de las transiciones laterales hacia la Formación Arroyo Palma, aunque en el área casi siempre Güines yace concordante sobre Arroyo Palma y raramente discordante y transgresivamente sobre rocas paleogénicas (Eoceno Medio). El ambiente de sedimentación probablemente fuera de aguas someras, cálidas, tranquilas, hasta moderadamente agitadas. Por su parte los depósitos del Cuaternario

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

Reservas y uso de las aguas subterráneas

El acuífero se divide a lo largo de la línea de costa en 4 subcuencas (Figura 1) y 16 sectores de explotación:

- 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 acuífera media del acuífero es de 50 m con un gradiente hidráulico medio de 0,0006 y volumen de recursos explotable de alrededor de 280 Hm³. 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.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de realizar un adecuado control de las aguas subterráneas en el sistema acuífero Costera Sur, a partir de la década de los 70 el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos comenzó el diseño de una red de monitoreo sistemático, que quedó totalmente conformada a comienzos de la década de los 80 y que se mantiene hasta la actualidad, la cual incluía la observación hidrodinámica e hidroquímica.

La red de observación hidroquímica contiene muestreo en la superficie de los pozos y en profundidad, con frecuencia de observación semestral o anual. Esta red ha sufrido modificaciones en el tiempo, algunos pozos dejaron de ser monitoreados y otros fueron incorporados, determinando irregularidades en las observaciones. Al examinar la cantidad y calidad de la información hidroquímica en la superficie de los pozos, se decidió incorporar al estudio 77 pozos de observación, que tienen la característica de poseer los mayores

records de observación y una distribución espacial más o menos homogénea, incluyendo un total de 1 892 muestras. En cada muestra fueron analizados los macroconstituyentes fundamentales. (CO_3^- , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), las SST y algunos parámetros físicos (pH y conductividad eléctrica).

En las Tablas 1A, 1B, 1C y 1D se puede apreciar, para cada una de las subcuencas, los pozos incluidos, sus coordenadas geográficas, el período de observación y el número de muestras superficiales tomadas en cada período hidrológico.

Tabla 1A. Red de observación de la subcuenca Florida

No	Pozo	Coordenadas		Observación		No de observaciones		
		Este	Norte	Inicio	Final	Seco	Húmedo	Total
1	399	756,70	193,99	may-82	abr-92	9	7	16
2	710	758,22	199,27	nov-81	abr-01	17	11	28
3	674	753,51	188,76	nov-81	abr-07	21	19	40
4	7915	335,83	311,90	nov-84	nov-07	17	14	31
5	10844	766,80	190,75	Abr-85	nov-07	16	11	27
6	11606	333,554	309,665	nov-81	nov-07	20	14	34
7	11663	328,48	303,34	nov-81	nov-07	16	16	32
8	11674	761,53	190,27	nov-81	nov-07	23	18	41
9	B1-F	753,02	194,22	abr-85	nov-07	20	21	41
10	B4-F	327,75	310,20	abr-85	nov-07	17	15	32
11	B10-F	328,412	306,118	dic-82	nov-07	15	12	27
12	L1-F	328,25	312,10	abr-85	nov-07	18	16	34
13	680	325,65	308,45	abr-90	nov-04	8	10	18
14	11706	330,10	315,70	abr-83	may-01	11	4	15
15	374	758,4	191,61	abr-84	nov-07	4	4	8
16	7910	334,90	314,55	nov-81	nov-07	6	5	11
17	357	336,137	305,562	Nov-90	nov-07	7	8	15
18	11659	338,30	302,98	nov-81	nov-07	13	8	21
	Total					258	213	471

Tabla 1B. Red de observación de la subcuenca Vertientes

No	Pozo	Coordenadas		Observación		No de observaciones		
		Este	Norte	Inicio	Final	Seco	Húmedo	Total
1	B11-V	334,753	297,899	nov-82	nov-07	18	17	35
2	102	340,60	276,90	nov-81	may-07	20	8	28
3	132	346,20	274,00	abr-81	abr-99	15	8	23
4	359	334,07	282,50	abr-81	abr-96	16	11	27
5	5765	329,15	297,55	nov-81	abr-91	10	8	18
6	11704	345,15	288,3	abr-81	may-90	10	8	18
7	742	341,70	291,05	abr-81	nov-07	19	12	31
8	11605	330,47	294,75	abr-81	abr-89	9	6	15
9	B6-V	342,05	268,55	abr-85	abr-99	12	5	17
10	7673	332,92	299,91	abr-81	nov-07	19	14	33
11	11683	333,53	297,75	abr-84	nov-07	13	13	26
12	11662	337,15	295,45	abr-81	nov-07	15	13	28
13	124	344,00	270,20	abr-81	may-07	17	5	22
14	506	340,71	300,25	abr-81	may-07	21	14	35
15	5758	353,65	259,30	abr-88	may-07	15	2	17
16	10430	345,10	278,30	nov-81	may-07	19	7	26
17	L1-V	337,35	291,42	abr-83	nov-07	15	17	32
18	10499	335,50	274,60	oct-81	may-07	23	7	30
19	9033	338,60	274,90	nov-84	may-07	23	10	33
20	11104	339,80	266,80	nov-84	abr-01	11	6	17
21	B3-V	333,4	293,38	abr-82	may-03	10	8	18
22	B5-V	338,70	269,70	abr-82	abr-01	19	6	25
23	B8-V	334,40	284,45	nov-81	may-07	20	10	30
24	B9-V	341,55	270,60	nov-81	abr-99	16	8	24
25	B10-V	339,40	272,45	abr-82	abr-02	18	10	28
	Total					403	233	636

Tabla 1C Red de observación de la subcuenca Sierra Maestra

No	Pozo	Coordenadas		Observación		No de observaciones		
		Este	Norte	Inicio	Final	Seco	Húmedo	Total
1	3999	365,60	256,30	oct-81	may-90	6	6	12
2	9270	373,65	273,25	abr-81	abr-84	4	2	6
3	10270	372,12	258,20	abr-81	oct-89	8	9	17
4	B4-SM	364,30	248,05	abr-85	abr-07	19	8	27
5	B11-SM	366,25	364,70	abr-85	oct-89	5	5	10
6	B3-SM	355,90	250,65	abr-88	abr-04	15	4	19
7	B1-SM	349,65	254,60	nov-85	may-05	15	8	23
8	B5-SM	359,00	248,80	nov-85	may-91	4	3	7
9	B7-SM	361,60	254,65	abr-88	may-90	3	2	5
10	B2-SM	353,75	255,55	abr-86	may-05	17	7	24
11	B9-SM	372,70	254,85	abr-85	oct-89	5	5	10
12	9255	366,45	245,70	abr-81	abr-90	10	6	16
13	161	346,25	266,55	abr-81	abr-89	7	1	8
14	L1-SM	355,672	255,136	abr-96	nov-06	11	5	16
15	5672	353,707	258,859	nov-81	abr-07	20	8	28
16	B13-SM	352,30	255,50	abr-84	oct-00	13	6	19
	Total					162	85	247

Tabla 1D. Red de observación de la subcuenca Najasa.

No	Pozo	Coordenadas		Observación		No de observaciones		
		Este	Norte	Inicio	Final	Seco	Húmedo	Total
1	B10-N	397,60	233,04	abr-90	oct-98	8	8	16
2	B8-N	393,415	232,917	abr-90	may-07	18	10	28
3	L3-N	379,417	245,732	abr-82	oct-89	8	7	15
4	6734	382,10	240,50	abr-81	may-07	21	8	29
5	8595	377,95	234,40	abr-81	oct-00	17	11	28
6	B5-N	377,492	238,016	abr-84	abr-07	23	13	36
7	B3-N	391,07	235,80	abr-84	abr-07	23	19	42
8	B4-N	386,75	233,85	abr-84	abr-07	24	19	43
9	L2-N	386,297	238,403	abr-83	abr-07	24	12	36
10	B6-N	371,40	240,05	abr-84	abr-07	23	13	36
11	613	392,207	237,896	abr-81	abr-07	24	19	43
12	761	383,92	237,30	nov-84	abr-07	20	14	34
13	611	390,39	240,50	nov-81	abr-00	17	12	29
14	C2-N	386,45	248,95	abr-81	abr-98	14	7	21
15	220	380,900	236,100	abr-81	may-07	19	9	28
16	L1-N	374,527	244,456	nov-85	may-07	15	8	23
17	B7-N	396,688	237,398	abr-90	may-07	18	12	30
18	B1-N	385,260	243,185	abr-84	may-07	16	5	21
	Total					332	206	538

Prueba de suma de rangos

Los métodos no paramétricos no suponen conocimiento acerca de las distribuciones de las poblaciones, excepto que estas son continuas; estos procedimientos se usan con mayor frecuencia en el análisis de datos. Dentro de las pruebas no paramétricas se destaca la prueba U de suma de rango, como una alternativa no paramétrica de la prueba t bimuestral, conocida como prueba de Wilcoxon o prueba de Mann-Whitney. Consiste en probar si dos poblaciones son las mismas, o si una probablemente produzca observaciones mayores que la otra (Miller *et al.* 2005).

Con el objetivo de probar si existen diferencias en la composición química de las aguas en los distintos períodos hidrológicos, se propone implementar la prueba de suma de rangos, para ello se debe seleccionar un grupo de pozos, en cada uno de los pozos las observaciones registradas deben ser separadas por períodos hidrológicos, dando lugar a las **Muestra I** (fin seco) y **Muestra II** (fin húmedo), se determinan los estadísticos fundamentales de ambas muestras y en los casos en se detecten diferencias será necesario dar respuesta a la siguiente interrogante ¿son notables estas diferencias a un nivel de significación $\alpha = 0,01?$, para ello los datos de cada macroconstituyente deben ser ordenados en forma creciente de su magnitud, destacando a qué muestra pertenecen; el lugar que ocupan en el ordenamiento se denomina rango. En caso de existir nexos entre valores pertenecientes a diferentes muestras, se le asigna a cada una de las observaciones la media de los rangos que tienen conjuntamente.

La suma de los rangos de las muestras es W_1 y W_2 , respectivamente. Cuando n_1 y n_2 exceden 8, la distribución muestral de U_1 (o U_2) siendo, $U_1 = W_1 - \frac{n_1(n_1+1)}{2}$ se aproxima a la distribución normal con media, y varianza. $\sigma_{U1}^2 = \frac{n_1 * n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}$. En consecuencia, cuando n^2 es mayor

que 20 y n^1 es al menos 9, se puede utilizar el estadístico, $Z = \frac{U_1 - \mu_{U1}}{\sigma_{U1}^2}$

(Walpole *et al.* 2008). La hipótesis nula se rechaza si $Z < -2,575$ o $Z > 2,575$.

Cuando no se cumplen las condiciones expuestas anteriormente, para n_1 y n_2 , se hace necesario emplear la tabla de valores críticos para la prueba de suma de rangos, atendiendo al nivel de significación seleccionado; debe señalarse que los autores del trabajo no cuentan con la tabla para los valores críticos de la prueba de dos colas, con $\alpha = 0,01$, por lo que se empleó para estimar el valor crítico de U_1 la interpolación entre los valores tabulados de U_1 para $\alpha = 0,002$ y $\alpha = 0,02$ en este caso se acepta la hipótesis nula cuando el valor calculado de U_1 es mayor que el valor crítico.

Se plantean como hipótesis a contrastar:

H_0 : No difiere la composición química de las aguas en los distintos períodos hidrológicos.

H_1 : Difiere la composición química de las aguas en los distintos períodos hidrológicos.

Para valorar si el régimen de explotación al que ha estado sometido el acuífero afecta la composición química de las aguas subterráneas se procede a analizar, en cada uno de los pozos seleccionados, las series de tiempo de cada uno de los macroconstituyentes, si han ocurrido cambios en su comportamiento y si estos cambios se mantiene en el tiempo será necesario valorar si estos cambios son apreciables a un nivel de significación $\alpha = 0,01$, para ello se propone diseñar una prueba no paramétrica de suma de rangos para los componentes mayoritarios fundamentales del agua (HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+), y las SST.

En cada uno de los pozos se conformaron 2 muestras, la **Muestra I** constituida por las observaciones realizadas antes del cambio y la **Muestra II** con las observaciones después del cambio, para el análisis deben ser seleccionados pozos que cumplan con la condición de que ambas muestras están constituidas al menos por 8 observaciones. La metodología de trabajo es similar a la descrita anteriormente. En este caso las hipótesis a contrastar son las siguientes:

H_0 : El régimen de explotación no influye en la composición química de las aguas.

H_1 : El régimen de explotación influye en la composición química de las aguas.

Ajuste de las variables a la normalidad

Con el interés de poder realizar predicciones acerca del comportamiento de las principales variables hidrogeoquímicas (HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y SST), y utilizar correctamente distintas técnicas estadísticas, se prueba su ajuste al modelo de distribución normal, para un nivel de significación $\alpha = 0,01$ empleando para ello la prueba de la curtosis, con la variable estandarizada $Z_{curtosis}$:

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

Se plantean como hipótesis a contrastar:

H_0 : La variable cumple con la ley de distribución normal

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

La hipótesis nula se rechaza si $Z < -2,575$ o $Z > 2,575$. Si el valor calculado no excede el valor crítico entonces el gráfico de frecuencia de la variable se puede ajustar a la curva de distribución normal.

Métodos estadísticos multivariados

Bajo la denominación de métodos multivariados, multivariantes, multivariados se conocen una serie de técnicas estadísticas cuyo objetivo fundamental es resumir y sintetizar grandes conjuntos de datos y variables, en función de ciertos objetivos, de cara a obtener información válida que permitan una mejor comprensión del fenómeno objeto de estudio (González 1997); en hidrogeoquímica estas técnicas son de gran interés.

Los métodos estadísticos multivariados son la rama de la estadística y del análisis de datos que estudia, interpreta y elabora material estadístico sobre la base de $p > 1$; variables que pueden ser cualitativas, cuantitativas o la mezcla de ambas (Mallo 1985).

Las técnicas multivariantes deben reducir al máximo la subjetividad y los a priori, su campo científico de aplicación está relacionado con la variación de algunas de las características del espacio evidencias, pretende explicar la variación conjunta o sincronizada,

más o menos intensa, lo que permite medir el grado de asociación entre variables.

En las técnicas multivariadas se parte de haber realizado observaciones de las variables medibles y se busca lograr un nuevo sistema de atributos, calculados a partir de los ya existentes, que satisfagan los siguientes requisitos:

- Sean independientes entre si.
- Si entre todos los atributos existen algunas relaciones, el número de variables del nuevo sistema debe ser menor que el que existía.
- El nuevo sistema de variables se obtiene a partir de una relación lineal homogénea de los atributos originales.

La distribución normal multivariada aparece en el sistema de variables aleatorias multivariadas como una generalización de la distribución normal univariada de las propiedades (Alfonso 1989).

Análisis factorial clásico

Al procesar los datos mediante el método de análisis factorial clásico se tiene en cuenta que este tipo de análisis es muy similar a la técnica de componentes principales, ambas se basan 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. A diferencia del análisis de componentes principales, que se basa en la varianza, el análisis factorial clásico se basa en la propiedad de la correlación (Bouza & Sistachs 2004).

Los 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 y el coeficiente de cada muestra respecto a las nuevas variables.

Cada una de las nuevas variables es linealmente independiente, y la varianza explicada es progresivamente menor, por lo general, 4 ó 5 factores suelen explicar la mayor parte de la varianza de la

población (entre 70-80 %). La primera de las nuevas variables tiene la máxima varianza y así sucesivamente para el resto de las nuevas variables. Se recomienda retener únicamente aquellas componentes cuya varianza λ_2 sea mayor que 1, esto se basa en el hecho de que cualquier factor debe representar más variación que las variables originales estandarizadas. Aunque en la práctica muchas veces se retienen factores cuyos valores propios sean aproximadamente igual a 1, aunque menor que él.

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. Si las nuevas variables van a estar no correlacionadas debe realizarse una rotación ortogonal, la más popular de estas rotaciones ortogonales es la llamada Varimax que persigue los siguientes 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 requeridas de la matriz de factores.

El proceso anteriormente descrito permite estudiar la estructura de los datos a partir de la matriz de correlación de las variables estudiadas, conocido como el modo R del análisis factorial.

Análisis de Cluster

Las técnicas de agrupación son de gran utilidad a la hora de procesar información, se emplean con el objetivo de identificar grupos de elementos de composición relativamente homogénea, a partir del estudio de las regularidades correspondientes al conjunto de atributos usados para su descripción (Alfonso 1989).

Estos métodos de clasificación están compuestos de procedimientos automáticos destinados a definir clases de individuos lo más semejante posible. Se llaman clases a los subconjuntos de individuos del espacio de representación que pueden ser identificados por ciertas zonas del espacio donde existe una gran densidad de individuos y que en la zona del espacio que separa estos subconjuntos existe una baja densidad de puntos.

Se define la división sobre la base de una medida de similitud o distancia entre los puntos y grupos. Dentro de los métodos más usados de agrupación se encuentra el de las K-medias, este método permite realizar la agrupación en forma de nube de puntos alrededor del centro de gravedad, que corresponde con el individuo medio. En los análisis cluster se emplean distintas medidas de distancia, de ellas la más usada es la distancia Euclidiana. En este trabajo se emplea la agrupación en cluster mediante el método de las K-medias.

RESULTADOS

Variaciones hidrogeoquímicas en el tiempo

Dentro de las variables que pueden influir en la variación en el tiempo de las características hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas, en los acuíferos cársicos costeros abiertos al mar, se destacan el ciclo hidrológico y el régimen de explotación, con el objetivo de probar hasta qué punto influyen estas variables fueron diseñadas pruebas no paramétricas de suma de rangos.

Influencia del ciclo hidrológico

Para valorar si los períodos hidrológicos influyen notablemente en la composición química de las aguas subterráneas fue seleccionado un grupo de 34 pozos que cumplen con la condición de poseer el mayor récord de observación en el área de estudio.

Al analizar en cada uno de los pozos los valores medios de los componentes fundamentales del agua (HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) y las SST, para los distintos períodos hidrológicos, se pudo apreciar que al finalizar el período seco es más alto que al terminar el período húmedo, pero al aplicar la prueba de suma de rangos solo 6 pozos muestran en su comportamiento diferencias notables.

En las Tablas 2A y 2B se puede apreciar los pozos en que se rechaza la hipótesis nula y los valores de Z y U_1 asociados.

Tabla 2A. Pozos con cambios apreciables

Pozo	Valores de Z calculados					
	HCO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	SST
674	-2,708					
1160 6	-2,939		-3,062			-2,799
B1-F		-2,739				
B4-N	-3,106	-4,121		-3,448	-3,106	-3,937

Tabla 2B. Pozos con cambios apreciables.

Pozo	n_1	n_2	$U_{Tabulado}$ $\alpha = 0.02$	$U_{Tabulado}$ $\alpha = 0.002$	Valores de U_1 calculados					
					HCO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	SST
710	17	11	29	44				33,5		
B8- N	18	10	27	41	35,5					

Cuando se analiza la ubicación geográfica de cada uno de los pozos destacados en el análisis anterior, se puede observar que estos se encuentran en zonas intensamente explotadas o cerca de la zona descarga del acuífero.

En la Tabla 3 se puede apreciar la relación de medias *muestraI/muestraII* de los pozos con diferencias notables, pero estas diferencias no son tales que impidan trabajar la información como una muestra única en cada pozo.

Tabla 3. Relación *muestraI/muestraII*

Pozo	HCO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	SST
710				1,53		
674	1,18					
11606	1,29		1,38			1,13
B1-F		1,23				
B8-N	1,45					
B4-N	1,34	1,72		1,84	1,54	1,44

Se debe plantear 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, según los resultados obtenidos en la prueba de suma de rangos para $\alpha = 0,01$ generalmente no son significativas; lo que quiere decir 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.

Influencia del régimen de explotación

La explotación de las aguas subterráneas en el acuífero ha sufrido cambios considerables en el tiempo, después de los intensos períodos de explotación de las décadas del 70 y 80, y en algunas áreas anterior a esta fecha, se produjo una drástica reducción de las áreas de cultivo en Vertientes, Sierra Maestra y Najasa, en la década de los 90 con la llegada del período especial, mientras que en gran parte de la subcuenca Florida y algunos sectores de la subcuenca Vertientes, en esta última década, fueron explotados con mayor intensidad, para riego de arroz, por parte de entidades militares.

Para estudiar la evolución en el tiempo de los macroconstituyentes fueron seleccionados 53 pozos en los cuales fueron analizadas las series de tiempo, en las que se apreciaba en cierto momento de su observación cambios en su comportamiento y estos cambios generalmente están asociados en fecha a cambios en el régimen de explotación en el área en que se encuentran ubicados. Con el objetivo de valorar si los cambios observados son apreciables a un nivel de significación de $\alpha = 0,01$, se diseñó una prueba no paramétrica de suma de rangos para los componentes mayoritarios fundamentales del agua (HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) y las SST.

En cada pozo se realizaron ensayos sucesivos en la conformación de las **Muestra I** y **Muestra II**, hasta definir la estructura que logra maximizar los valores de Z o minimizar los valores de U_1 , precisando lo mejor posible el momento de cambio de régimen de explotación. En las Tablas 4A y 4B se pueden apreciar los pozos en que se rechaza la hipótesis nula y los valores de Z y U_1 asociados.

En la Tabla 5 se presenta la relación entre las medias *muestraI/muestraII*, en mg/l, de los pozos que muestran diferencias notables en su comportamiento. Al detallar cómo se manifiesta esta relación por subcuencas se debe señalar que en algunos sectores de Florida y Vertientes se aprecia un aumento considerable de los contenidos de la **Muestra II**, en relación a la **Muestra I**, determinando valores de la relación *muestraI/muestraII* en el orden de 0,27 y 0,76; en las restantes áreas del acuífero, las más extensas, generalmente muestran un descenso considerable en los contenidos de los macroconstituyentes, determinando que la relación *muestraI/muestraII* fluctúe entre 1,12 y 3,06. Los pozos que no muestran diferencias notables en su comportamiento se encuentran ubicados en áreas con algunas de las características siguientes:

- Áreas muy tranquilas, con muy baja explotación, relativamente alejadas de las costas.
- Áreas con una alta explotación, homogénea en el tiempo.

Como casos excepcionales se tienen los pozos L2-N y 761 que muestran más de un cambio en su comportamiento químico. A modo de conclusión se debe señalar que en el acuífero los cambios en el régimen de explotación han determinado cambios apreciables en el comportamiento químico de sus aguas.

Tabla 4A. Pozos con cambios apreciables

No	Pozo	Fecha De cambio	n_1	n_2	Valores de Z calculados					
					HCO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	SST
1.	7915	4/89	9	22	-3,52					-3,35
2.	11663	10/88	12	20		-3,91				
3.	11674	5/97	22	19		-5,13		-2,61		
4.	B1-F	4/95	19	22		-3,93	-3,73			-3,22
5.	674	10/93	20	20		-3,53	-2,75			-2,68
6.	B5-N	4/01	26	10	-2,93	-2,93				-2,97
7.	B3-N	10/93.	24	18	-5,05	-5,41	-4,88	-3,76	-4,89	-5,39
8.	B4-N	10/93	18	25		-2,82	-4,01			-2,93
9.	613	5/93	23	20	-4,80	-4,83	-5,11	-3,23	-4,30	-5,43

Tabla 4B. Pozos con cambios apreciables

No	Pozo	Fecha de cambio	n_1	n_2	U_{Tabulado} $\alpha = 0.02$	U_{Tabulado} $\alpha = 0.002$	Valores de U_1 calculados					
							HCO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	SST
1.	710	4/95	20	8	34	21		27,5				
2.	11606	4/93	19	15	75	55		51,0			55,0	
3.	680	5/97	8	10	13	6		9,5				
4.	B11-V	10/97	18	17	82	61	40,0	64,0	69,0	39,0		40,0
5.	359	10/88	16	11	41	27	23,5					31,0
6.	11683	5/92	14	12	38	25				14,0		
7.	124	10/01	13	9	63	45	1,5		7,0			2,0
8.	506	4/94	18	17	82	61	13,0		25,0			36,0
9.	10430	10/96	18	8	30	18			22,0			
10.	L1-V	4/92	14	18	65	46	8,0	34,0	25,0	46,0		2,0
11.	10499	10/89	13	17	59	38	40,0			42,0		
12.	9033	4/95	15	18	70	51	14,5	47,0	57,5			23,0
13.	B9-V	4/92	16	8	26	15	3,0		5,5	18,0		4,0
14.	B10-V	10/87	9	19	38	25						32,0
15.	B4-SM	4/93	10	17	38	25	4,0	13,5	11,5		33,5	0,0
16.	B1-SM	4/96	9	13	23	14		0,0	6,5		10,0	0,0
17.	B2-SM	4/97	12	12	31	20		4,5				
18.	5672	4/96	18	10	41	27	31,5	29,0	14,5			14,0
19.	8595	5/91	19	9	38	25				30,5		
20.	611	10/90	13	16	51	35		41,5	42,0		39,0	45,0
21.	220	4/93	18	10	41	27	30,0		27,0			
22.	L1-N	4/00	14	9	26	15			6,0			19,0

Tabla 5. Relación *muestraI/muestraII* de los pozos con cambios en el tiempo

No	Pozo	Valores de Z calculados					
		HCO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	<i>SST</i>
1.	710		1,54				
2.	7915	0,73					0,76
3.	11606		0,74			0,52	
4.	11663		0,68				
5.	11674		0,57		0,67		
6.	B1-F		1,29	1,30			1,12
7.	674		1,24	1,32			1,18
8.	680		0,81				
9.	B11-V	0,60	0,27	0,46	0,30		0,49
10.	359	1,21					1,14
11.	11683				0,51		
12.	124	1,45		1,59			1,41
13.	10430			0,29		0,68	
14.	L1-V	0,65	0,53	0,54	0,43		0,64
15.	10499	1,29			1,20		
16.	9033	1,42	0,80	1,36			1,28
17.	B9-V	1,70		1,42	1,44		1,41
18.	B10-V						1,18
19.	506	1,64		1,66			1,32
20.	B4-SM	1,31	1,77	1,64		1,33	1,37
21.	B1-SM		1,50	1,58		1,71	1,45
22.	B2-SM		2,45				
23.	5672	1,48	1,33	1,69		1,65	1,41
24.	8595				0,64		
25.	B5-N	0,72	0,63				0,73
26.	B3-N	1,60	3,06	1,90	2,08	2,33	1,98
27.	B4-N		1,40	1,49			1,29
28.	613	1,81	1,64	2,10	1,41	1,59	1,71
29.	611		2,90	1,61		2,30	1,65
30.	220	1,30		1,30			
31.	L1-N			1,74			1,23

Ajuste de las variables a la normalidad

De los 77 pozos analizados, alrededor del 90 % de ellos ajustan 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 o condiciones de sobreexplotación. Las condiciones hidrológicas extremas en el área se dieron en el período seco de 1987, después de una intensa sequía de más de dos años, asociada también a altos niveles de explotación. 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).

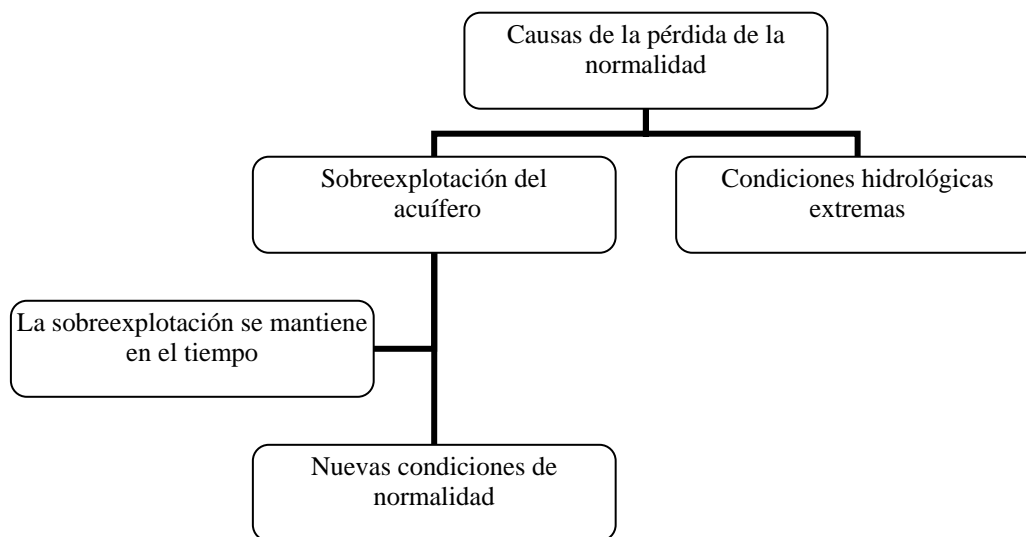


Figura 3. Pérdidas de la normalidad en las variables.

Factores que determinan la hidroquímica en el acuífero

Para definir los factores que determinan la composición química de las aguas en el acuífero se propone emplear, dentro de las técnicas estadísticas multivariantes, el análisis factorial clásico, realizando la rotación de los ejes mediante el método Varimax, cuyo objetivo es que las proyecciones de las variables originales sobre los ejes estén o bien cerca de los extremos o bien cerca del origen (González 1997). La matriz de observación está conformada por los valores medios de los 9 macroconstituyentes fundamentales y las SST, es de orden 77×10 (770 elementos).

La matriz de correlación estimada entre variables es del orden 10×10 , (Tabla 6) destacándose, por su significación, la correlación entre 7 pares de variables:

- SST con Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} y SO_4^{2-}
- Cl^- con Na^+ y Mg^{2+}
- SO_4^{2-} con Na^+

Tabla 6. Matriz de correlación de las variables

	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SST
CO_3^{2-}	1,00	0,05	0,29	0,08	-0,02	0,13	0,34	0,23	0,23	0,26
HCO_3^-		1,00	0,11	0,16	-0,05	0,36	0,41	0,21	-0,12	0,37
Cl^-			1,00	0,49	-0,04	0,61	0,79	0,89	0,22	0,93
SO_4^{2-}				1,00	-0,02	0,18	0,22	0,78	0,11	0,70
NO_3^-					1,00	0,04	-0,05	0,00	-0,05	0,01
Ca^{2+}						1,00	0,60	0,38	-0,06	0,60
Mg^{2+}							1,00	0,60	0,11	0,75
Na^+								1,00	0,22	0,96
K^+									1,00	0,18
SST										1,00

Analizando las características geológicas del área de estudio, el posible origen de los distintos macroconstituyentes en las aguas y las asociaciones entre pares de variables destacadas, se puede plantear a modo de conclusión que las relaciones de dependencia más fuertes están determinado por los procesos de mezcla de agua dulce-agua salada propio de la intrusión salina.

En el análisis factorial, excluyendo las SST, se obtienen 4 valores propios mayores que 1, mostrando que 4 variables causales explican más del 78 % de la variabilidad del sistema, en la Tabla 7 se puede valorar qué por ciento de la varianza total del sistema es explicado por cada una de las nuevas variables.

Tabla 7. Matriz de valores propios

Factores	Valores propios	% Varianza total	%acumulado
1	3,544	39,376	39,376
2	1,358	15,085	54,461
3	1,109	12,327	66,788
4	1,013	11,253	78,040

Las nuevas variables se obtienen como combinación lineal de las variables originales, en la Tabla 8 se puede apreciar el grado de asociación de las variables originales con los nuevos factores, atendiendo al tamaño de la muestra (77 pozos) se consideran cargas significativas aquellas mayores de 0,62.

Tabla 8. Matriz de vectores propios

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
CO_3^{2-}	-0,03900	0,23897	0,76625	0,02530
HCO_3^-	0,02281	0,70072	-0,24600	-0,17834
Cl^-	0,68775	0,51490	0,37692	0,04808
SO_4^{2-}	0,91439	0,02014	-0,08331	-0,03624
NO_3^-	-0,00600	-0,02544	-0,05005	0,97674
Ca^{2+}	0,20243	0,79703	0,05930	0,13599
Mg^{2+}	0,31891	0,77723	0,35406	-0,01803
Na^+	0,90073	0,31747	0,20876	0,01704
K^+	0,22537	-0,26135	0,70306	-0,09899

Quedan definidas las variables causales de la hidrogeoquímica en la cuenca Costera Sur de Camagüey, de la siguiente forma:

Variable 1: El proceso de intrusión salina explica más del 39 % de la varianza del sistema.

$$Y_1 = 0,69Cl^+ + 0,91SO_4^{2-} + 0,90Na^+$$

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

$$Y_2 = 0,70HCO_3^- + 0,80Ca^{2+} + 0,78Mg^{2+}$$

Variable 3: La actividad agrícola explica cerca del 12 % de la varianza.

$$Y_3 = 0,77CO_3^- + 0,70 K^+$$

Variable 4: El empleo de fertilizantes explica más del 11 % de la varianza.

$$Y_4 = 0,98NO_3^-$$

Condiciones de potabilidad en el acuífero

Para valorar las características de potabilidad del acuífero se parte del análisis de la media de los macroconstituyentes en cada pozo, al compararlas se aprecian grandes diferencias, incluso entre pozos con relativa cercanía geográfica. El nivel de heterogeneidad observado impide describir de forma general las características de potabilidad, por lo que se hace necesario formar grupos de pozos más homogéneos, empleando para ello el análisis de cluster, por el método de las K-medias.

Con el objetivo de definir el número de grupos existentes en el área fueron analizados diferentes formas de agrupación (2 cluster, 3 cluster, 4 cluster, 5 cluster y 6 cluster). De las estructuras ensayadas la agrupación en 3 cluster muestra mayor homogeneidad en los grupos formados.

Clasificación en tres cluster

En la clasificación en tres cluster los pozos quedan agrupados de la siguiente forma:

Cluster 1: formado por 2 pozos (B10-N y B9-SM)

Cluster 2: formado por 6 pozos (11704, B8-N, B6-N, 613, 9270 y B1-SM)

Cluster 3: formado por 69 pozos (los restantes)

Se analiza cada uno de los cluster formados, en orden decreciente del número de pozos que lo conforman.

Cluster 3

Al analizar la información hidrogeoquímica en cada uno de los pozos que conforman el cluster 3 se puede apreciar que los valores medios de los macroconstituyentes y las SST se encuentran por debajo de las

CMA (concentración máxima admisible), con excepción del pozo B11-SM, en que se exceden las *SST* alrededor del 10 %.

Al detallar en todas las muestras registradas en cada pozo, se puede apreciar que en 55 de ellos todas sus observaciones muestran macroconstituyentes y *SST* por debajo de las CMA y en muchos de ellos se reportan valores que no excedan las CMD (concentraciones máximo deseables), la relación Cl^-/HCO_3^- generalmente presenta valores por debajo de 0,5, propio de aguas normales, que no están afectadas por proceso de intrusión salina. En este cluster solo 14 pozos en algún momento de su período de observación han reportado pérdida de alguna de las condiciones químicas de potabilidad, mostrando relación Cl^-/HCO_3^- entre 0,5 y 1,3 lo que denota que han estado afectados por ligeros procesos de intrusión salina. En la Tabla 9 se muestran los estadísticos principales del cluster.

Tabla 9. Estadísticos fundamentales del cluster 3

Cluster 3	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	<i>SST</i>
promedio	2,1	294,3	81,5	18,5	7,6	71,6	27,8	39,9	2,1	545,5
desv. est	1,9	73,5	43,6	13,2	20,3	18,3	10,2	29,1	4,0	147,0
Cv	0,9	0,2	0,5	0,7	2,6	0,3	0,4	0,7	1,9	0,3
mín	0,0	120,6	29,9	3,9	0,5	29,2	12,5	11,1	0,0	239,7
máx	8,1	581,9	216,4	57,9	165,8	111,6	81,2	155,8	25,0	1171,6

Para cada uno de los pozos se señalan los momentos y los macroconstituyentes en que se han sobrepasado las CMA.

- Pozo 710. En abril de 1987 las *SST* y en el período 1990-1991 el ión Cl^- .
- Pozo B11-V. En mayo de 1999 el ión Cl^- .
- Pozo 506. En abril de 1987 las *SST* y octubre del 2001 el ión Cl^- y las *SST*.

- Pozo 5765. En abril de 1983 el ión Cl^- .
- Pozo 742. En abril de 1989 los iones Cl^- , Na^+ y las *SST*.
- Pozo 11683. En los periodos octubre de 1999 y abril del 2005 se presentó problemas con el ión Cl^- y las *SST*, al igual que en abril del 2001 el ión Cl^- .
- Pozo B3-V. En abril de 1982 el ión Cl^- .
- Pozo B8-V. En octubre del 2005 el ión Cl^- y las *SST*.
- Pozo B3-N. Desde abril de 1985 hasta octubre de 1990 el ión Cl^- y las *SST*.
- Pozo 611. Algunos de los valores reportados del ión Cl^- y las *SST* hasta abril de 1990.
- Pozo B7-N. En diversas ocasiones en el pozo fueron reportados valores de los iones Cl^- , Na^+ y las *SST*.
- Pozo 10270. El ión Cl^- en abril de 1987 y octubre de 1988, al igual que las *SST* en abril de 1985, 1986 y octubre de 1987.
- Pozo B11-SM. El ión Cl^- en abril de 1987 y el Na^+ en octubre de 1986 y todas las *SST*.
- Pozo 5672. En abril de 1987 el ión Cl^- .

El análisis anterior permite identificar el ión Cl^- y las *SST*, como los elementos que con más frecuencia se presenta por encima de las concentraciones máximas admisibles y los pozos B3-N, 611 y B7-N, y B11-SM como los casos más críticos en el mantenimiento de las condiciones químicas de potabilidad; los pozos en cuestión por muchos años presentaron aguas no potables, pero a partir del inicio de la década del 90 mejoraron considerablemente sus características de calidad.

En sentido general puede plantearse que en el cluster se agrupan pozos que poseen aguas cuyas propiedades químicas son adecuadas para su uso, lo que permiten clasificarlas como *aguas potables*.

Cluster 2.

Al estudiar los pozos que conforman el cluster 2 se pudo apreciar que los valores medios reportados muestran elevadas concentraciones del ión Cl^- , entre 1,5 a 4 veces las CMA, el contenido de Na^+ generalmente se encuentra alrededor de las CMA (en algunos pozos por encima y en otros por debajo) las concentraciones de *SST* llegan a estar entre 1,1 y 1,5 las

CMA para el agua potable, en la Tabla 10 se pueden observar los estadísticos fundamentales del cluster.

Tabla 10. Estadísticos fundamentales del cluster 2

Cluster 2	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SST
promedio	5,5	341,6	503,0	77,1	4,5	141,9	64,4	211,3	0,9	1350,1
desv. est	9,3	166,9	231,2	48,4	4,2	60,9	15,5	45,8	1,0	209,3
Cv	1,7	0,5	0,46	0,6	0,9	0,4	0,2	0,2	1,2	0,2
mín	0,0	40,1	351,3	13,0	0,0	84,8	49,2	152,6	0,0	1064,0
máx	24,0	535,1	963,9	146,4	11,8	234,7	91,9	262,4	2,4	1553,1

La mayoría de los pozos que conforman el cluster presentan en sus observaciones relación Cl^- / HCO_3^- en el intervalo de 1,3 a 2,8 por lo que sus aguas muestran un nivel moderado de contaminación por agua de mar. Como caso excepcional en el cluster tenemos el pozo B1-SM que presenta un nivel de contaminación que puede ser calificado como alto. A continuación se analiza en cada uno de los pozos que conforman el cluster, el comportamiento de los componentes químicos fundamentales:

- Pozos 11704 y B8-N. Los iones Cl^- , Na^+ y las SST se han mantenido en todas las observaciones por encima de las CMA.
- Pozos B6-N. Las concentraciones del ión Cl^- y las SST en todas las observaciones se han mantenido por encima de los valores máximos admisibles, en ocasiones también el catión Na^+ .
- Pozo 613. Los iones Cl^- , Na^+ y las SST han sufrido variaciones en el tiempo, disminuyendo a partir del comienzo de la década del 90, hasta adquirir las condiciones de potabilidad de algunos componentes en distintas fechas, el ión Na^+ en abril de 1990, las SST en octubre de 1996 y el ión Cl^- en el 2001.
- Pozo 9270. Prácticamente todas las muestras tomadas presentan concentraciones de Cl^- , Ca^{2+} y SST superior a las CMA.
- Pozo B1-SM. Las concentraciones del ión Cl^- en todas las muestras tomadas se encuentran por encima de las

CMA, a pesar de ello se ha producido una disminución considerable a partir de mayo de 1993, (de entre 4.5 y 6 veces descendió hasta cerca de 3 veces lo normado). Las concentraciones de Ca^{2+} se mantuvo por encima de las CMA hasta abril de 1995, el ión Na^+ se mantuvo por encima de lo normado hasta abril de 1987. Los contenidos de SST en todas las mediciones reportadas se encontraban entre 1,1 y 2 veces por encima de C.M.A.

A modo de conclusión se puede plantear que los pozos que conforman este cluster presentan *aguas no potables*.

Cluster 1.

El cluster 1 se encuentra conformado por dos pozos que tienen la característica de poseer los más altos contenidos de Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y SST observados en el área de estudio. Al analizar los valores medios de los macroconstituyentes debe destacarse que las concentraciones de Cl^- están entre 2,5 y 4,3 veces la CMA, el Na^+ es de alrededor de 4 veces CMA, y las SST entre 2,5 y 3,3 veces CMA. En la Tabla 11 se pueden apreciar los estadísticos principales del cluster.

Tabla 11. Estadísticos fundamentales del cluster 1

Cluster 1	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SST
promedio	4,7	350,7	1100,7	447,2	6,7	112,4	66,8	820,4	8,0	2917,7
desv. est	6,6	43,0	665,5	391,9	0,5	60,2	49,6	72,7	6,5	512,7
Cv	1,4	0,1	0,6	0,9	0,1	0,5	0,7	0,1	0,8	0,2
mín	0,0	320,3	630,1	170,1	6,4	69,8	31,8	769,0	3,4	2555,2
máx	9,4	381,1	1571,3	724,4	7,1	155,0	101,9	871,8	12,6	3280,2

A modo de resumen se debe plantear que las aguas presentes en los pozos son aguas no potables, que se diferencian de las presentes en el cluster 2 por ser aguas de más baja calidad.

CONCLUSIONES

En los pozos del acuífero la media de los macroconstituyentes es más alta en el periodo seco que en el periodo húmedo pero la diferencia puede considerarse no apreciable, a un nivel de significación de 0,01. El régimen de explotación influye notablemente en la composición química de las aguas, a un nivel de significación de 0,01.

Los macroconstituyentes en las aguas cumplen con la ley de distribución normal; las condiciones hidrológicas extremas y un intenso régimen de explotación en la cercanía del pozo provoca pérdida en las condiciones de normalidad, si se mantienen estas condiciones de explotación en el tiempo se alcanzan nuevas condiciones de normalidad.

En el acuífero son 4 las variables causales del quimismo y determinan alrededor del 78 % de la variabilidad del sistema. Las nuevas variables son combinación lineal de las originales. La agrupación automática mediante 3 clusters permite obtener grupos de pozos con características semejantes de potabilidad.

REFERENCIAS

- ALFONSO, J. R. 1989: *Estadística en las Ciencias Geológicas*. Ed. ISPJAE, La Habana.
- BOUZA, C. & V. SISTACHS. 2004: *Estadística Teoría y Ejercicios*. Ed. Félix Varela, La Habana.
- GONZÁLES, A. 1997: *Problemas de salinización en el acuífero litoral del occidente de Huelva*. Universidad de Huelva. España.
- ITURRALDE-VINENT, M. 2006: *Naturaleza Geológica de Cuba*. En: *Tabloide Universidad para Todos*. Primera parte. Editorial Academia.
- MALLO, F. 1985: *Análisis de componentes principales y técnicas factoriales asociadas*. Universidad de León. España.
- MILLER, I.R; FREUND, J.E. & R. LOHNSON. 2005: *Probabilidades y Estadística para Ingenieros*. Parte II. 4 ed. Editora Félix Varela. La Habana.

MOLERIO, L. 2004: Proceso de cavernamiento (espeleogénesis) en sistemas hipogenéticos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* XXV (2) : 39-43.

WALPOLE, R. E.; MAYERS, R. H. & MYERS, SH. L. 2008: Probabilidades y Estadística para Ingenieros. Parte II. ed. Editora Félix Varela, La Habana.

Gladis Yera Digat

Máster en Ingeniería Hidráulica. Profesora Asistente.
Sede Universitaria Municipal Carlos M. de Céspedes,
Universidad de Camagüey. Cuba.

gladis.yera@reduc.edu.cu

Constantino de Miguel Fernández

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Auxiliar Consultante.
Departamento de Geología. Instituto Superior
Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.

cdemiguel@ismm.edu.cu

Juan R. Fagundo Castillo

Doctor en Ciencias. Investigador Titular de Mérito.
Centro Nacional de Termalismo Víctor Santamarina, Cuba.

juanrfag@infomed.sld.cu