

EVOLUCION QUIMICA Y RELACIONES EMPIRICAS EN AGUAS NATURALES IV- CUENCA JARUCO-AGUACATE.

Juan Reynerio. Fagundo Castillo

Centro Nacional de Termalismo "V́ctor Santamarina"

RESUMEN

En la cuenca Jaruco-Aguacate, en provincia La Habana, se realizaron estudios de modelación matemática con datos hidroquímicos correspondientes al período 1983-1989, con vistas a encontrar ecuaciones empíricas que relacionen la composición química con la conductividad eléctrica y de ese modo, controlar en lo sucesivo, la calidad de estas aguas en términos de macrocomponentes y total de sólidos solubles mediante mediciones de conductividad eléctrica. Los modelos, en todos los casos líneas rectas que pasan por el origen de coordenadas y fueron ajustados, por lo general, mediante datos hidroquímicos correspondientes período 1983-1986, mientras que para la validación de los modelos se utilizaron datos del período 1987-1989.

ABSTRACT

Whit the aim to control in future, the water quality in terms of macroconstituents and mineralization by mean of electric conductivity measurements, mathematical modelation studies with hydrochemical data from the 1983-1989 period at Jaruco-Aguacate basin, La Havana province, were performed in order to found empirical relationships between chemical composition and electric conductivity, The mathematical models were fitted with hydrochemical data from the 1983-1986 period, and validated with data from 1987-1989 period.

INTRODUCCION

Con el objetivo de facilitar el procesamiento de la información hidroquímica fue implementado un sistema automatizado de tratamiento de datos denominado SAPHIQMA, una nueva versión que integra el sistema SAMA (Alvarez et al, 1990a; 1990b) y el sistema SAPHIQ (Alvarez y Fagundo, 1991), versión modificada y con algunas mejoras del programa AGMAR (Fagundo et al, 1986).

Mediante SAPHIQ se depura la información hidroquímica, eliminando aquellos datos que presentan errores analíticos o incongruencias en sus relaciones iónicas (que no concuerdan con las características hidrogeoquímicas).

En trabajos anteriores se estudiaron los factores que determinan cómo las aguas naturales adquieren su composición química en el proceso de interacción con rocas de diferente naturaleza litológica, y cómo evolucionan como resultado de procesos naturales y antrópicos (Fagundo 1990a, 1990b). Se estableció además la posibilidad de controlar la composición química mediante mediciones de conductividad eléctrica, determinando previamente las relaciones de dependencia matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica, la cual se obtiene al procesar datos hidroquímicos que reflejen las fluctuaciones debidas al ciclo del agua. Se tomó como ejemplo la cuenca del río San Marcos, en la Sierra del Rosario, Pinar del Río, donde se escurren en forma superficial y subterránea, varias corrientes a través de distintos tipos de rocas: efusivo-sedimentarias, serpentinitas, terrígeno- carbonatadas y carbonatades de diferentes edades geológicas

(Fagundo et al, 1991). En esos ejemplos, la litología constituía el factor dominante en el modo de adquisición de la composición química de las aguas, cuyos patrones hidrogeoquímicos no variaron durante los seis años en que se llevó a cabo la investigación. Las ecuaciones de mejor ajuste fueron de tipo lineal en todos los casos.

En este nuevo trabajo de la serie se estudia el comportamiento químico-físico de las aguas de la cuenca Jaruco-Aguacate, en la provincia de La Habana, representativas de acuíferos desarrollados en una llanura cársica cerrada, limitada por secuencias impermeables. Su objetivo práctico, es dejar establecido los modelos de correlaciones matemáticas entre la concentración de cada ion y la conductividad eléctrica, con vistas a estimar mediante las mediciones de este último parámetro la composición química y el total de sólidos solubles.

La introducción de estos modelos permitirá además la racionalización de un gran volumen de análisis químico que debe realizar periódicamente la correspondiente Dependencia Provincial del INRH.

Otro objetivo del trabajo es la utilización de los citados modelos empíricos para obtener información en relación con el modo en que las aguas adquieren su composición química y las propiedades hidrogeológicas de estos tipos de acuíferos.

MATERIALES Y METODOS

Se utilizaron los datos hidroquímicos históricos de la red de calidad que controla el INRH en la provincia de La Habana, correspondientes a la cuenca Jaruco-Aguacate durante el período 1983-1989. Esta cuenca fue muestreada anualmente en dos ocasiones: período seco y húmedo respectivamente. La ubicación de las estaciones de dicha red atendió a la localización y distribución espacial, así como al volumen de extracción anual.

Los análisis químicos y físicos se realizaron mediante las técnicas recomendadas por Standard Methods (1971).

Los datos fueron procesados estadísticamente mediante el sistema SAPHIQ (Alvarez y Fagundo, 1991), calculándose la media aritmética y otros estadígrafos para cada especie iónica en el período considerado. Un tratamiento estadístico más amplio de los datos hidroquímicos de estas cuencas, ha sido realizado recientemente por Santiago (1990; 1993).

La modelación matemática de la composición química en función de la conductividad eléctrica fue realizada mediante el sistema de programas SAMA (Alvarez et al, 1990a, 1990b).

Las ecuaciones de mejor ajuste fueron determinadas mediante ecuaciones de regresión polinómica desde uno a quinto grado que pasa por el origen de coordenadas, donde la selección se establece mediante una prueba de significación de Fisher.

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

Si las diferencias obtenidas por un polinomio de orden n y otro de orden n+1 no son significativas, el sistema selecciona el polinomio de grado menor.

La validez de los modelos se determinó mediante el índice de similitud IS entre el valor real y el calculado por modelación matemática, donde:

$$IS = \sum_{i=1}^n R_1 R_2$$

siendo

$$R_1 = \frac{C_i \text{ modelo}}{C_i \text{ real}} \quad \text{si } C_i \text{ modelo} < C_i \text{ real}$$

$$\text{ó } R_1 = 1 / R_1 \quad \text{si } C_i \text{ modelo} > C_i \text{ real}$$

$$\text{y } R_2 = \frac{C_i \text{ real}}{\sum_{i=1}^n \text{iones reales}}$$

Además se empleó el módulo de análisis de "cluster" disponible en el sistema CSS, versión B640 (StatSoff, 1987).

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA

La cuenca subterránea Jaruco-Aguacate ocupa la parte centro este del territorio de la provincia La Habana. Esta región que constituye una llanura cársica, está rodeada por alturas bastante erosionadas las cuales sirven de divisoria de las aguas del escurrimiento superficial que se origina de manera momentánea durante las lluvias. El alto grado de carsificación determina que la mayor parte de este escurrimiento se infiltre rápidamente hacia el acuífero subterráneo.

Esta llanura tiene una gran homogeneidad litológica, pues en ella predominan las calizas, calizas margosas y margas fundamentalmente, de las formaciones Güines, Cojimar, Rosario, Husillo, Caobas, Colón y Jaruco, todas del Mioceno. Limitan estas secuencias, rocas menos permeables como margas, calizas arcillosas y aleurolitas del intervalo Cretácico-Paleógeno, así como serpentinitas de la asociación ofiolítica Mesozoica (Academia de Ciencias, 1990). En la figura 1 se muestra la ubicación de los pozos, las litologías presentes en la cuenca objeto de estudio y las la dirección de los flujos.

En la actualidad el movimiento de las aguas subterráneas en la subcuenca Jaruco está afectado por la explotación del campo de pozos del acueducto del Gato, siendo del noreste al sureste. En la subcuenca Aguacate, donde es menor la explotación, este sigue siendo del oeste al este. Estas subcuencas tienen dos grandes puntos de emisión: uno por los manantiales de Ojo del Agua al suroeste (Jaruco) y otro por los manantiales de Bello al este (Aguacate).

RESULTADOS Y DISCUSION

Caracterización hidroquímica y determinación de correlaciones matemáticas

En las tablas 1 y 2 se presentan los resultados de la caracterización químico-física de las aguas de la cuenca Jaruco-Aguacate. Las concentraciones medias han sido expresadas en

meq/l (tabla 1) y % de meq/L (tabla 2), Como indicadores de mineralización se tomaron: el total de sólidos solubles (TSS) en mg/l, la dureza en mg/l y la conductividad eléctrica a 25 °C (CE) en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Como puede apreciarse (Tablas 1 y 2), 15 pozos (Catalina 1, Catalina 2, Catalina 3, San Antonio, Chorrillos, Chalut, Santa Cruz, Carmen, Bainoa 4, Bainoa 6, Ronera, Aguirre, Rubio, Ho Chi Min y El Gato), de la cuenca Jaruco-Aguacate poseen aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas con un valor medio de sólidos solubles totales (TSS) de 432 mg/l. Estos pozos se encuentran ubicados en una litología semejante constituida fundamentalmente por rocas carbonatadas del Mioceno. En la figura 2 se ilustra los patrones hidrogeoquímicos correspondientes.

En el caso de la subcuenca Aguacate (Tab. 2), además de las aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas (pozos Aguacate 1, Aguacate 2, Activo, Villena y Calderón), se observan otras facies hidroquímicas: bicarbonatadas cloruradas cálcicas con relativamente alto contenido de sodio (acueducto Madruga) y bicarbonatadas cálcico-magnesianas (acueducto del Central Boris Luis Santa Coloma). Este comportamiento se debe a la influencia de otras litologías además de las calizas como puede observarse en la figura 1. Las aguas del pozo que abastece Madruga reflejan, en su composición química, la influencia de las calizas margosas del Cretácico, mientras que las que abastecen al Central, reflejan la influencia de las serpentinitas del complejo ofiolítico, ricas en Mg^{2+} y pobres en Ca^{2+} (Fig. 2). La composición química de estas aguas no ha sufrido cambios apreciables en el tiempo en que han sido sometidas a la explotación para el abasto, tal como se desprende del comportamiento de las series cronológicas obtenidas por el sistema SAPHIQ, las cuales se exponen en las figuras 3a y 3b.

En las figuras 3a y 3b se presenta la variación temporal del TSS de las aguas de algunos de los acueductos de la subcuenca Jaruco: a) Catalina 1; b) Bainoa 4. Como puede apreciarse, el TSS en cada caso, experimenta sólo una tendencia fluctuacional debido a los cambios en el régimen de lluvias y alimentación del acuífero.

En las figuras 4a y 4b se puede apreciar que las aguas de dos pozos representativos de la subcuenca Aguacate: a) Aguacate 1, b) Madruga, tampoco han experimentado cambios temporales significativos en su mineralización, reflejándose en las series cronológicas del TSS sólo fluctuaciones de tipo estacional.

Teniendo en cuenta las características que han sido discutidas en los párrafos anteriores, se pudiera establecer, que para los fines de modelación matemática, todos los datos hidroquímicos de la cuenca Jaruco-Aguacate del tipo bicarbonatadas cálcicas (que poseen la composición química y la conductividad eléctrica de las aguas) pudieran ser agrupados y procesados por SAMA en su conjunto. Sin embargo, queda la duda de que todas estas aguas sean completamente homogéneas desde el punto de vista hidroquímico. Por esa razón se decidió procesar los datos mediante un sistema exploratorio de datos, tal como el método de análisis de "cluster"; así estudiar la matriz de índices de similitud (IS) determinada procesando datos hidroquímicos del período 1987-1989 mediante los modelos de correlación creados a partir de datos del período 1983-1986.

Tabla 1. Valores medios de las concentraciones iónicas (meq/l), de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), del TSS (mg/l) y de la dureza (mg/l) de las aguas muestreadas en la cuenca Jaruco-Aguacate.

Subcuenca	Acueducto	N	HCO_3^-	Cl ⁻	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	CE	TSS	Dureza
Jaruco	Catalina 1	9	4,30	0,75	0,16	4,30	0,44	0,47	476	399	237
Jaruco	Catalina 2	7	4,10	0,82	0,22	4,31	0,26	0,58	482	397	228
Jaruco	Catalina 3	6	4,30	0,81	0,29	4,49	0,39	0,51	532	411	244
Jaruco	Chorritos	4	5,14	1,21	0,22	5,37	0,42	0,80	682	499	289
Jaruco	San Antonio	8	5,21	0,72	0,36	5,01	0,63	0,65	620	484	282
Jaruco	Chalut	5	4,83	0,60	0,23	5,11	0,30	0,25	531	439	270
Jaruco	Santa Cruz	6	4,90	0,65	0,32	4,86	0,55	0,47	562	452	270
Jaruco	Carmen	5	5,08	0,72	0,32	5,06	0,27	0,81	564	474	266
Jaruco	Bainoa 4	7	4,86	0,57	0,19	4,61	0,57	0,44	549	436	259
Jaruco	Bainoa 6	7	4,62	0,71	0,30	4,69	0,51	0,44	558	432	259
Jaruco	Ronera	7	4,98	0,67	0,33	5,02	0,43	0,53	584	461	272
Jaruco	Aguirre	4	4,66	0,63	0,09	4,91	0,17	0,30	484	418	300
Jaruco	Rubio	7	5,07	0,73	0,40	4,89	0,63	0,68	599	475	276
Jaruco	Ho Chi Min	5	4,26	0,67	0,18	4,43	0,25	0,43	499	394	234
Jaruco	El Gato	4	4,15	0,63	0,21	3,85	0,64	0,48	498	382	309
Aguacate	Aguacate 1	7	4,41	0,74	0,19	4,40	0,54	0,50	516	411	247
Aguacate	Aguacate 2	3	4,92	0,66	0,18	4,77	0,46	0,53	567	446	262
Aguacate	Activo	2	4,70	0,63	0,16	4,61	0,36	0,51	522	425	248
Aguacate	Villena	5	3,94	0,78	0,16	3,89	0,38	0,63	479	373	213
Aguacate	Calderón	3	4,41	0,59	0,28	4,51	0,42	0,36	487	407	246
Aguacate	Madrugá	7	3,72	1,37	0,24	3,77	0,41	1,14	542	393	209
Aguacate	Boris Luis	6	5,79	1,07	0,53	3,99	2,38	1,02	717	549	319

Tabla 2. Valores medios de las concentraciones iónicas (% meq/l) y tipo hidroquímico según el criterio de Kurlov, de las aguas muestreadas en la cuenca Jaruco-Aguacate.

Subcuenca	Acueducto	N	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	Tipo de agua
Jaruco	Catalina 1	9	82,5	14,4	3,1	82,5	8,3	9,2	1
Jaruco	Catalina 2	7	79,9	15,8	4,3	83,9	4,9	11,2	1
Jaruco	Catalina 3	6	79,8	14,9	5,3	83,3	7,2	9,5	1
Jaruco	Chorritos	4	80,2	16,7	3,1	80,6	6,3	13,1	1
Jaruco	San Antonio	8	83,0	11,4	5,6	79,5	10,1	10,4	1
Jaruco	Chalut	5	85,5	10,6	3,9	90,3	5,3	4,4	1
Jaruco	Santa Cruz	6	83,5	11,1	5,4	82,7	9,4	7,9	1
Jaruco	Carmen	5	82,9	11,8	5,3	82,7	4,3	13,0	1
Jaruco	Bainoa 4	7	86,4	10,2	3,4	81,8	10,4	7,8	1
Jaruco	Bainoa 6	7	82,0	12,7	5,3	83,5	8,9	7,6	1
Jaruco	Ronera	7	83,2	11,2	5,6	83,9	7,2	8,8	1
Jaruco	Aguirre	4	86,5	12,0	1,5	91,3	3,3	5,4	1
Jaruco	Rubio	7	81,8	11,7	6,5	78,8	10,1	11,1	1
Jaruco	Ho Chi Min	5	83,2	13,2	3,6	86,7	4,9	8,4	1
Jaruco	El Gato	4	85,2	10,2	4,6	81,0	6,7	12,3	1
Aguacate	Aguacate 1	7	82,5	14,1	3,4	82,3	10,3	7,4	1
Aguacate	Aguacate 2	3	85,4	11,5	3,1	82,5	8,3	9,2	1
Aguacate	Activo	2	85,7	11,4	2,9	84,2	6,5	9,3	1
Aguacate	Villena	5	80,8	16,0	3,2	79,6	7,7	12,7	1
Aguacate	Calderón	3	83,5	11,2	5,3	85,2	8,2	6,6	1
Aguacate	Madruga	7	69,9	25,6	4,5	70,9	7,7	21,4	2
Aguacate	Boris Luis	6	78,2	14,6	7,2	53,7	32,5	13,8	3

Tipo de agua: 1- bicarbonatada cálcica, 2- bicarbonatada clorurada cálcicas sódica; 3- bicarbonatada cálcica magnésica.

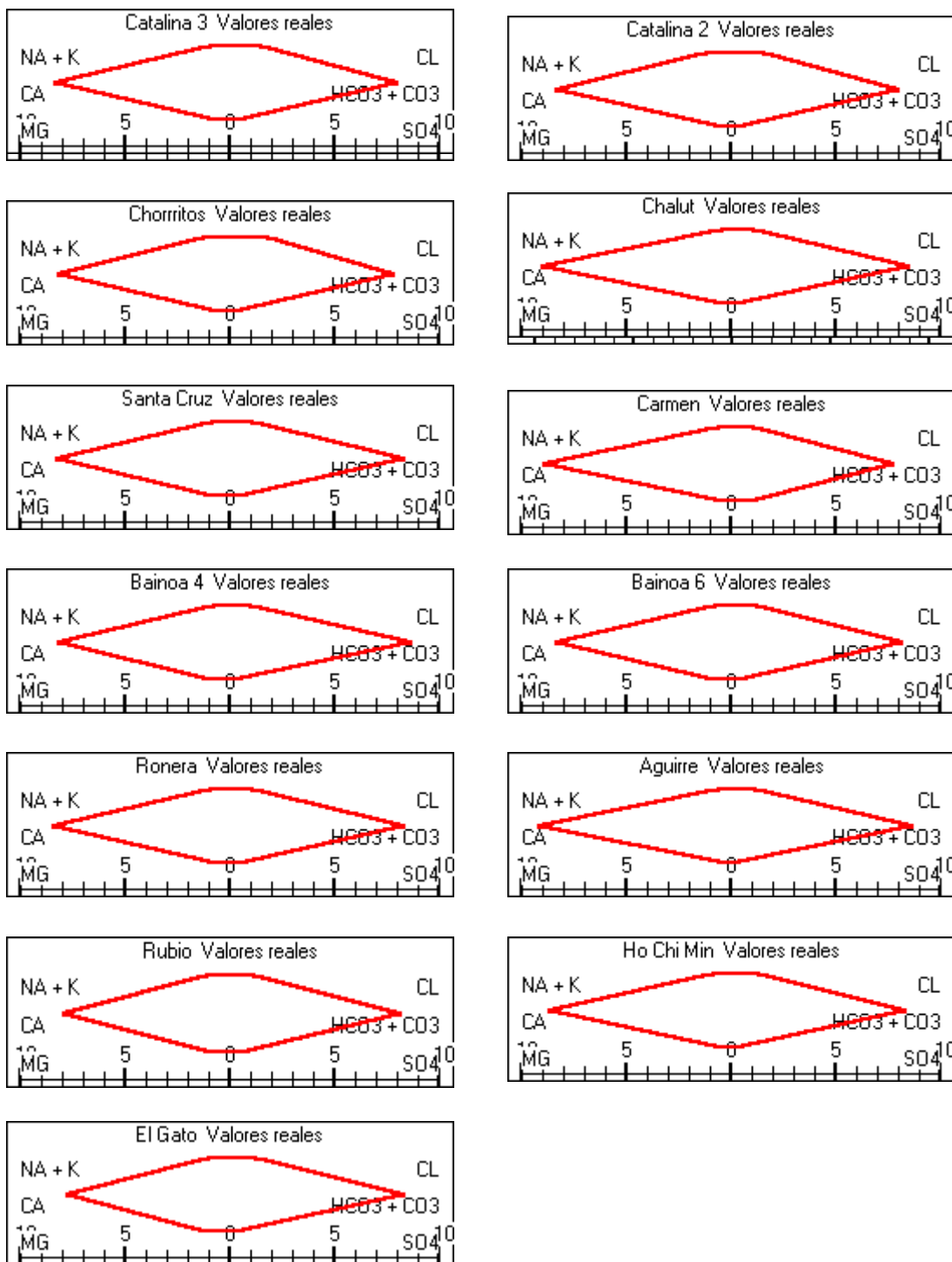


Figura 2a. Patrones hidrogeoquímicos que caracterizan las aguas que drenen la subcuenca Jaruco

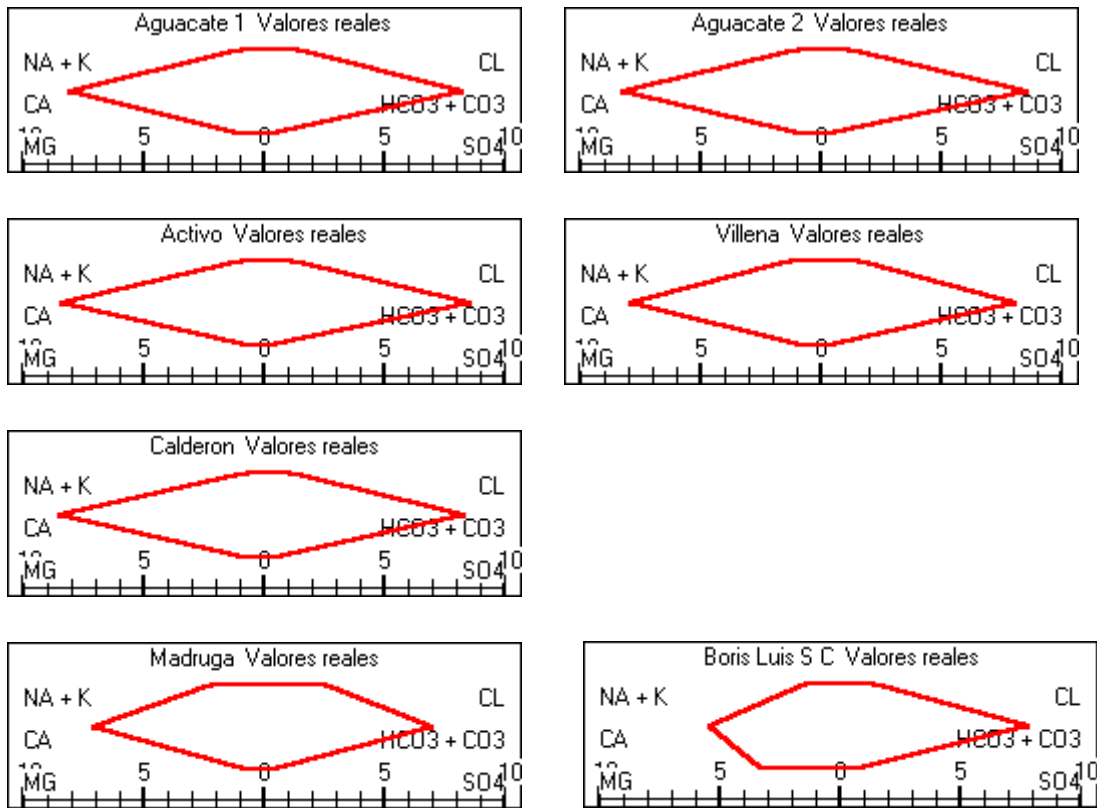


Figura 2b. Patrones hidrogeoquímicos que caracterizan las aguas que drenan la subcuenca Aguacate.

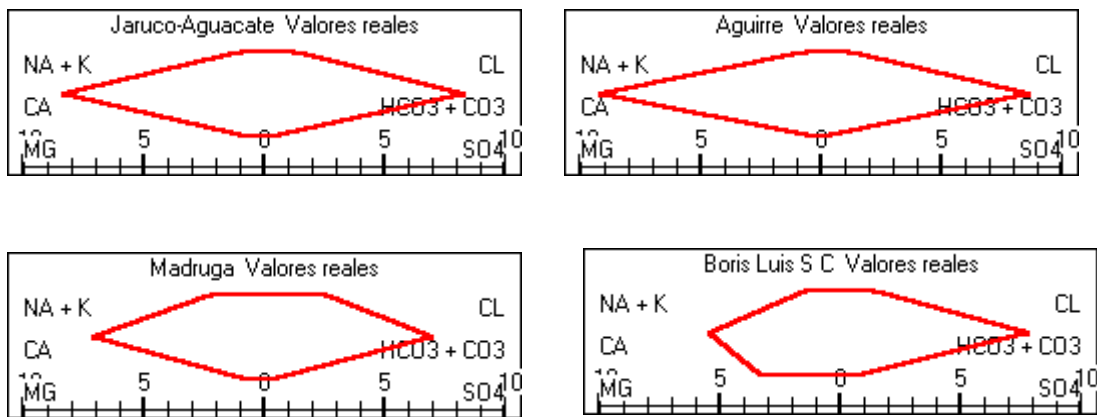


Figura 2c. Patrones hidrogeoquímicos que caracterizan todas las aguas que drenan la cuenca Jaruco-Aguacate.

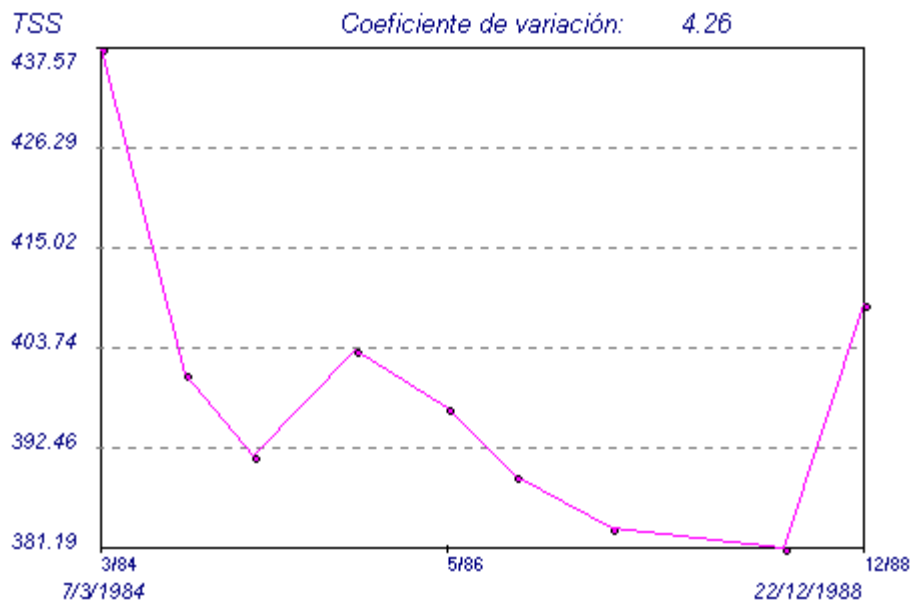


Figura 3a. Variación temporal del TSS de las aguas del Acueducto Catalina 1 (subcuenca Jaruco).

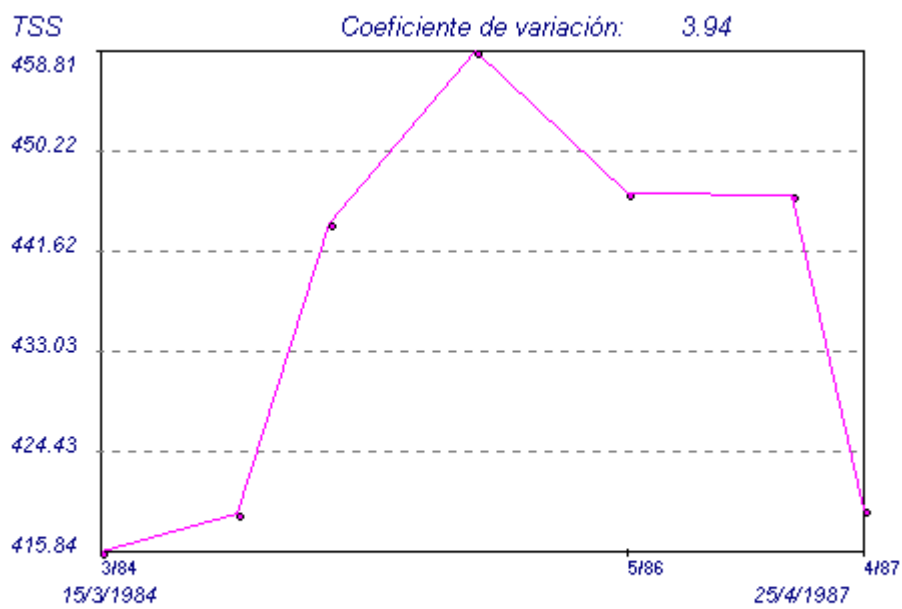


Figura 3b. Variación temporal del TSS de las aguas del Acueducto Binao 4 (subcuenca Jaruco).

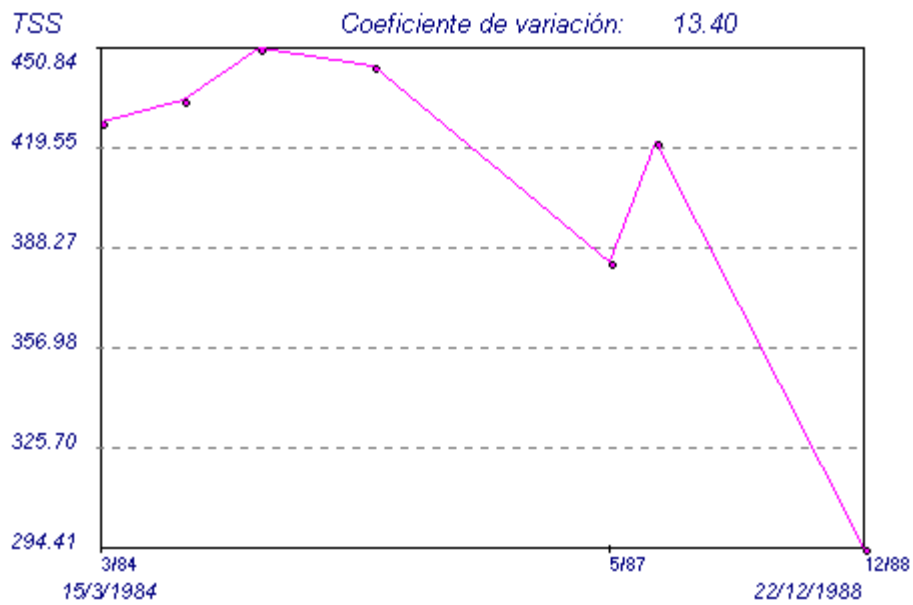


Figura 3c. Variación temporal del TSS de las aguas del Acueducto Aguacate 1 (subcuenca Aguacate).

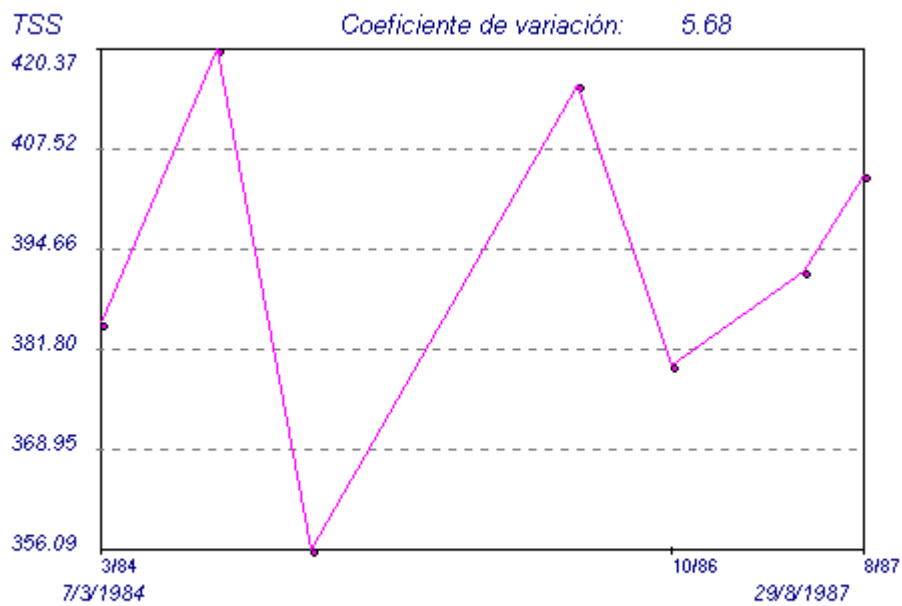


Figura 3d. Variación temporal del TSS de las aguas del Acueducto Madruga (subcuenca Aguacate).

Empleo de un método explorativo de datos

El análisis de "cluster", también llamado de enjambres o racimos, constituye una herramienta de descripción de datos cuantitativos y cualitativos que fue utilizada primeramente por los biólogos con fines taxonómicos, y su empleo con fines hidrogeoquímicos ha comenzado a popularizarse a partir de 1981 (Valdés, Fagundo y Pajón, 1981; De La Cruz y Valdés, 1985; Callejón, Pulido Bosch y Valenzuela, 1984; Pulido Bosch, 1989; Fagundo et al, 1996). Este método consiste en seleccionar las mayores similitudes entre parejas de datos. Una vez agrupadas todos los casos, el gráfico que resulta (dendrograma) permite visualizar en forma rápida los grupos de variables afines y distinguirlos de aquellos que guardan poca relación con el resto.

En la figura 5 se muestra el dendrograma obtenido al procesar por este método una matriz formada por 6 variables (composición iónica media expresada en % meq/L) y 21 casos, correspondientes al número de acueductos tomados en la cuenca para este estudio. Como medida de similitud entre los casos se tomó la distancia euclideana y como criterio de unión el de los vecinos más lejanos.

Como puede apreciarse en la figura 5, tomando como distancia de corte un 25 % de la máxima distancia, se obtienen 2 cluster para las aguas del tipo HCO_3^- - Ca^{2+} , constituidos por 8 y 11 casos respectivamente, quedando sin agrupar otros dos casos, constituidos por las aguas que presentan las otras facies hidroquímicas. El primer cluster agrupa las aguas de 7 acueductos de la subcuenca Jaruco y 1 acueducto de la subcuenca Aguacate. El segundo cluster integra las aguas de 7 acueductos de la subcuenca Jaruco y 4 de la subcuenca Aguacate. Los casos no incluidos en los cluster anteriores y que se presentan como "outlying" en el dendrograma, corresponden a las aguas de los acueductos Madruga y Boris Luis Santa Coloma, con un comportamiento anómalo con relación a las restantes aguas de la cuenca.

Procesamiento de datos hidroquímicos

Teniendo en cuenta que las aguas de la cuenca Jaruco Aguacate adquieren su composición mediante un proceso de interacción agua roca controlada fundamentalmente por la litología presente, se debe esperar que los datos hidroquímicos se ajusten significativamente a líneas rectas que pasan por el origen de coordenadas, en forma similar a lo que ocurre en un proceso de interacción agua rocas en el laboratorio (Fagundo et al., 1991). Como los datos hidroquímicos de cada pozo son tomados, por lo general, al final de este proceso de interacción, lo real es que para encontrar buenas correlaciones matemáticas es necesario tomar en consideración todo el camino de reacción, esto es desde que el agua de lluvia se infiltra en el terreno hasta que alcanza la zona de emisión o es captado en el pozo. Cuando a los datos hidroquímicos de los pozos se le añaden los de las lluvias esto sí se logra.

Los valores de las pendientes de las ecuaciones ajustadas para cada variable, mediante el procesamiento por SAMA de los datos hidroquímicos de los pozos de la cuenca Jaruco-Aguacate, aplicando el modelo de la línea recta que pasa por el origen de coordenadas, se presentan en la tabla 3. En general se aprecian magnitudes similares entre sí en las pendientes de las aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas (con excepción del pozo Aguirre donde son más altas las pendientes correspondientes a los iones HCO_3^- y Ca^{2+} que en las restantes aguas. Sin embargo, las magnitudes de las pendientes de las aguas de los pozos

Madruga y Boris Luis Santa Coloma muestran diferencias apreciables con respecto a las restantes.

Tabla 3. Valores de las pendientes de las líneas de regresión ajustadas mediante SAMA, correspondientes a los datos hidroquímicos del período 1983-1986 en la cuenca Jaruco-Aguacate.

SC	Acueducto	N	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺
J	Catalina1-1	6	0,009042	0,001528	0,000330	0,008922	0,001024	0,000954
J	Catalina1-2	5	0,008836	0,001596	0,000578	0,009140	0,000614	0,001291
J	Catalina1-3	4	0,008222	0,001405	0,000772	0,008676	0,000832	0,000962
J	Sananton-1	4	0,008591	0,001203	0,000553	0,008302	0,000937	0,001108
J	Chorritos-1	3	0,008916	0,001310	0,000232	0,009062	0,000727	0,000847
J	Chalut1-1	4	0,008954	0,001076	0,000483	0,009344	0,000643	0,000485
J	SantaCruz-1	4	0,009182	0,001195	0,000375	0,008877	0,000828	0,001047
J	Carmen-1	4	0,009152	0,001320	0,000546	0,008920	0,000574	0,001525
J	Bainoa4-1	5	0,009049	0,001029	0,000320	0,008530	0,000958	0,000910
J	Bainoa6-1	5	0,008422	0,001266	0,000551	0,008246	0,001055	0,000937
J	Ronera-1	5	0,008408	0,001166	0,000633	0,008426	0,000802	0,000978
J	Aguirre-1	3	0,010640	0,001280	0,000360	0,011060	0,000220	0,001000
J	Rubio-1	4	0,008192	0,001273	0,000767	0,007982	0,001084	0,001160
J	Hochimin-1	3	0,008957	0,001228	0,000501	0,008998	0,000577	0,001110
J	Gato-1	2	0,008982	0,001059	0,000538	0,008376	0,000982	0,001288
A	Aguacate1-1	4	0,008558	0,001368	0,000407	0,008557	0,000922	0,000855
A	Aguacate2-1	2	0,008255	0,001058	0,000203	0,007518	0,001159	0,000840
A	Activo-1	2	0,008991	0,001190	0,000307	0,008811	0,000680	0,000997
A	Villena-1	4	0,008282	0,001618	0,000410	0,008256	0,000788	0,001291
A	Calderón-1	2	0,008999	0,001203	0,000579	0,009194	0,000882	0,000706
A	Madruga-1	5	0,006895	0,002504	0,000385	0,006708	0,000829	0,002247
A	SanColo-1	6	0,008380	0,001516	0,000693	0,005964	0,003050	0,001574

El resultado de la validación de los modelos se muestra en la tabla 4. En la misma se observan los valores de los índices de similitud medios (IS) entre los datos reales y los obtenidos por modelación. Tomando como criterio de buena semejanza entre los datos reales y los obtenidos mediante los modelos matemáticos para los objetivos de las estimaciones matemáticas, más del 80 % de similitud, se puede apreciar que se obtienen buenos resultados del procesamiento de los datos de las aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas con los correspondientes modelos obtenidos con datos de aguas similares, con excepción del pozo Aguirre, que en algunos casos, presenta IS inferiores al 80 %. También se obtienen IS bajos al procesar datos de aguas bicarbonatadas cálcicas de las subcuencas Jaruco y Aguacate con modelos correspondientes a las aguas de los tipos bicarbonatadas cloruradas cálcicas sódicas (Madruga) y bicarbonatadas cálcicas magnésicas (Boris Luis Santa Coloma), aunque sí se obtienen buenos resultados cuando se procesan los datos hidroquímicos de esta agua con sus correspondientes modelos.

Tabla 4. Matriz de correlación de IS usando datos de validación y modelos calculados con datos de modelación.

	C1-2	C2-2	C3-2	SA-2	Ch-2	ch-2	SC-2	C-2	B4-2	B6-2	Ro-2	A-2	Ru-2	Ho-2	G-2	A1-2	A2-2	Ac-2	V-2	Ca-2	M-2	B-2
C1-1	0,883	0,888	0,852	0,873	0,875	0,887	0,839	0,921	0,863	0,834	0,881	0,829	0,901	0,867	0,901	0,924	0,881	0,938	0,830	0,853	0,743	0,611
C2-1	0,885	0,888	0,850	0,881	0,872	0,885	0,836	0,929	0,847	0,895	0,851	0,819	0,890	0,872	0,903	0,908	0,894	0,932	0,853	0,840	0,768	0,612
C3-1	0,863	0,910	0,895	0,870	0,929	0,842	0,905	0,955	0,904	0,928	0,882	0,781	0,909	0,901	0,900	0,894	0,842	0,893	0,873	0,897	0,779	0,675
SA-1	0,851	0,900	0,889	0,885	0,929	0,832	0,881	0,929	0,912	0,908	0,893	0,785	0,929	0,879	0,914	0,903	0,846	0,883	0,866	0,916	0,777	0,644
Ch-1	0,872	0,874	0,845	0,874	0,887	0,901	0,833	0,918	0,857	0,891	0,887	0,836	0,886	0,872	0,902	0,899	0,880	0,962	0,817	0,830	0,722	0,589
ch-1	0,854	0,835	0,812	0,855	0,879	0,904	0,833	0,909	0,849	0,888	0,895	0,824	0,873	0,879	0,876	0,873	0,873	0,949	0,773	0,840	0,689	0,574
SC-1	0,880	0,874	0,854	0,892	0,882	0,887	0,846	0,926	0,866	0,886	0,897	0,839	0,912	0,862	0,915	0,911	0,886	0,944	0,821	0,850	0,735	0,598
C-1	0,887	0,875	0,837	0,884	0,871	0,893	0,836	0,919	0,847	0,885	0,886	0,826	0,898	0,854	0,905	0,892	0,891	0,939	0,834	0,841	0,764	0,603
B4-1	0,861	0,885	0,865	0,872	0,910	0,859	0,858	0,907	0,887	0,881	0,891	0,810	0,911	0,862	0,904	0,903	0,850	0,917	0,818	0,881	0,731	0,602
B6-1	0,851	0,902	0,888	0,874	0,939	0,826	0,889	0,933	0,923	0,915	0,887	0,780	0,918	0,880	0,906	0,901	0,832	0,887	0,886	0,931	0,778	0,656
Ro-1	0,856	0,907	0,896	0,878	0,939	0,830	0,896	0,953	0,920	0,922	0,894	0,784	0,919	0,891	0,911	0,891	0,836	0,836	0,866	0,910	0,774	0,643
A-1	0,807	0,753	0,721	0,787	0,731	0,897	0,695	0,800	0,713	0,754	0,808	0,999	0,768	0,748	0,807	0,774	0,915	0,848	0,687	0,688	0,626	0,499
Ru-1	0,837	0,888	0,900	0,881	0,940	0,801	0,906	0,922	0,919	0,908	0,869	0,754	0,909	0,894	0,891	0,898	0,815	0,847	0,899	0,948	0,810	0,685
Ho-1	0,879	0,880	0,856	0,886	0,884	0,885	0,845	0,944	0,861	0,894	0,898	0,832	0,906	0,866	0,914	0,903	0,891	0,937	0,823	0,846	0,741	0,599
G-1	0,863	0,882	0,863	0,886	0,907	0,848	0,865	0,911	0,893	0,884	0,888	0,795	0,919	0,859	0,911	0,907	0,859	0,896	0,845	0,900	0,762	0,624
A1-1	0,867	0,921	0,882	0,875	0,921	0,853	0,875	0,928	0,906	0,911	0,887	0,796	0,917	0,888	0,904	0,903	0,846	0,909	0,853	0,893	0,762	0,631
A2-1	0,797	0,852	0,890	0,860	0,931	0,782	0,884	0,883	0,926	0,870	0,845	0,730	0,892	0,877	0,856	0,882	0,837	0,830	0,889	0,920	0,770	0,650
Ac-1	0,873	0,885	0,863	0,883	0,903	0,878	0,851	0,930	0,873	0,892	0,899	0,829	0,910	0,869	0,911	0,901	0,869	0,941	0,826	0,849	0,737	0,593
V-1	0,863	0,917	0,904	0,886	0,941	0,818	0,870	0,914	0,910	0,918	0,882	0,762	0,902	0,900	0,906	0,901	0,825	0,867	0,919	0,907	0,821	0,647
Ca-1	0,866	0,856	0,827	0,870	0,879	0,895	0,851	0,930	0,861	0,897	0,888	0,830	0,896	0,872	0,895	0,897	0,955	0,951	0,797	0,856	0,712	0,610
M-1	0,738	0,802	0,830	0,776	0,788	0,663	0,782	0,738	0,788	0,786	0,739	0,615	0,757	0,798	0,733	0,784	0,659	0,704	0,860	0,810	0,905	0,667
B-1	0,739	0,784	0,792	0,795	0,800	0,715	0,791	0,807	0,821	0,781	0,747	0,662	0,798	0,776	0,774	0,794	0,728	0,742	0,854	0,795	0,760	0,831

C1: Catalina, C2: Catalina2, C3: Catalina3, SA: San Antonio, Ch: Chorritos, ch: Chalut, SC: Santa Cruz, C: Carmen, B4: Baintoa4, B6: Baintoa6, Ro: Ronera, A: Aguirre, Ru: Rubio, Ho: Hohimin, G: El Gato, A1: Aguacate1, A2: Aguacate2, Ac: Activo, V: Villena, Ca: Calderón, M: Madruga, B: Boris Luis Santa Coloma, -1: Fichero de datos usados para la modelación, -2: Fichero de datos usados para la validación de los modelos.

En la tabla 5 se muestran los valores de la composición química relativa (en % meq/l), de la conductividad eléctrica promedio (en $\mu\text{S}/\text{cm}$), así como de las pendientes de las variables hidroquímicas correspondientes a los tipos de aguas agrupados tanto por el método de análisis "cluster": A-1 (Aguirre), J-A-1 (Jaruco-Aguacate), M-1 (Madruga) y BL-1 (Boris Luis Santa Coloma), con los cuales se puede controlar la calidad de las aguas de toda la cuenca mediante inferencias matemáticas (estimación de la composición química) a partir de mediciones de conductividad eléctrica. Como puede apreciarse, la magnitud de las pendientes son proporcionales a las concentraciones, tal como debía esperarse.

Tabla 5. Características químico-físicas y pendientes de las ecuaciones de regresión lineal correspondientes a los tipos de aguas determinados por análisis "cluster" y mediante el análisis de la matriz de correlación de la tabla 4.

Fichero del modelo	N	Concentración iónica datos de validación (en % meq/L)						
		Pendiente de la línea recta de los modelos						
		HCO_3^-	Cl	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	CE
A1	3	86,5	12,5	1,0	91,7	3,8	4,5	479
		0,010640	0,001280	0,000360	0,011060	0,000220	0,001000	
J-A 1	72	83,1	12,3	4,6	82,4	8,0	9,6	538
		0,008720	0,001280	0,000492	0,008629	0,000854	0,001024	
M-1	5	70,6	25,4	4	68,5	8,5	23,0	541
		0,006895	0,002504	0,000385	0,006708	0,000829	0,002247	
BL-1	6	79,1	14,4	6,5	56,4	28,7	14,9	728
		0,008380	0,001516	0,000693	0,005964	0,003050	0,001574	

A: Aguirre, J-A: Jaruco-Aguacate, M: Madrugá, SC: Boris Luis Santa Coloma. Datos del período 1983-1986.

En la tabla 6 se presenta una matriz de IS medios entre datos reales y obtenidos por los modelos (juegos de ecuaciones lineales cuyas pendientes aparecen en la tabla 5). En general, las mayores similitudes se obtienen al procesar los ficheros de datos con los correspondientes ficheros de modelo. Sin embargo, muy pobre similitud se obtiene al procesar los datos de los diferentes tipos de aguas con los modelos de otros grupos.

Tabla 6. Matriz de índices de similitud (IS) entre los valores reales de la composición iónica y los valores obtenidos por modelación.

IS	Fichero de validación de datos (1982-1985).			
Fichero del modelo	A-2 (N=1)	J-A2 (N=37)	M-2 (N=2)	BL-2 (N=2)
A-1 (N=3)	0,999	0,774	0,627	0,499
J-A1 (N=72)	0,812	0,897	0,760	0,630
M-1 (N=5)	0,615	0,764	0,905	0,667
BL-1 (N=4)	0,662	0,782	0,760	0,831

Datos usados para la modelación: Jaruco-Aguacate 1983-1986 (J-A1); El Gato 1987-1987 (G-1); Madrugá 1984-1986 (M-1); Boris Luis Santa Coloma 1984-1985 (SC-1).

Datos usados para la validación de los modelos: : Jaruco-Aguacate 1987-1988 (J-A2); Madrugá 1987-1987 (M-2); Boris Luis Santa Coloma 1986-1987 (SC-2).

Simulación matemática de la composición química mediante relaciones estequiométricas y conductividades teóricas.

Teniendo en cuenta que la cuenca Jaruco-Aguacate puede ser caracterizada desde el punto de vista hidrogeoquímico, mediante la composición química relativa (en % meq/L) que se presenta en la tabla 2, y que la relación entre la composición iónica y la conductividad eléctrica es de tipo lineal (expresada por una línea recta que pasa por el origen de coordenadas), se puede tomar como composición de cada ion la expresada como valor medio en % de meq/L, como conductividad eléctrica la correspondiente también para cada uno de los tipos de aguas presentes en la cuenca. Con este juego de datos unitarios entonces se puede hallar las relaciones C_i (concentración de cada ion i)/CE y mediante dichas relaciones, estimar la composición química de las aguas de la red de calidad (Tab. 7).

Tabla 7. Valores de las concentraciones iónicas y conductividades iónicas medias de los grupos de aguas determinados en la cuenca Jaruco Aguacate (Aguirre, el resto de las aguas bicarbonatadas cálcicas de Jaruco-Aguacate, Madruga y Boris Luis Santa Coloma), así como de las relaciones matemáticas entre estas magnitudes con las cuales se crearon los modelos de simulación.

Fichero del modelo de simulación	N	Concentración iónica datos de validación (en meq/L)						
		Pendiente de la línea recta de los modelos						
		HCO ₃ ⁻	Cl	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	CE
S A 1	3	4,66	0,63	0,09	4,91	0,17	0,30	484
		0,009628	0,001302	0,000186	0,010145	0,000351	0,000620	
S J-A 1	72	4,71	0,69	0,26	4,62	0,45	0,55	538
		0,008755	0,001283	0,000483	0,008680	0,000836	0,001022	
S M-1	5	3,72	1,37	0,24	3,77	0,41	1,14	452
		0,006863	0,002528	0,000443	0,006956	0,000756	0,002103	
S BL-1	6	5,79	1,07	0,53	3,99	2,38	1,02	717
		0,008075	0,001492	0,007390	0,005565	0,003319	0,001423	

A: Aguirre, J-A: Jaruco-Aguacate (sin datos de Aguirre), M: Madruga, BL: Boris Luis Santa Coloma. Valores de los contenidos iónicos medios del período 1983-1986.

Los resultados de la simulación de la composición química de las aguas de la cuenca Jaruco-Aguacate, mediante este método, se ilustra en la tabla 8 con la ayuda de los valores de IS obtenidos al procesar los ficheros de datos del período 1986-1989, así como con los datos hidroquímicos de cada uno de los pozos o grupos de pozos estudiados. Como puede apreciarse, el IS medio entre los datos reales y los obtenidos por este método de simulación no difiere apreciablemente del IS medio obtenido por correlaciones matemáticas entre la composición química y la conductividad eléctrica real (Tab. 6).

Este método sencillo, también permite controlar la composición química de las aguas mediante simples mediciones de conductividad eléctrica en aquellos sitios con pocos datos, donde la litología es el factor determinante en el modo de adquisición de la composición química.

Tabla 8. Matriz de índices de similitud (IS) entre los valores reales de la composición iónica de los ficheros de validación y de los creados con todos los datos, obtenidos mediante modelos de simulación (creados con las relaciones que se muestran en la tabla 7).

Fichero del modelo	A-2 (N=1)	Aguirre completo (N=4)	J-A2 (N=37)	J-A completo (N=109)	M-2 (N=2)	Madruga completo	BL-2 (N=2)	BL completo (N=6)
S A-1 (N=2)	0,895	0,913						
S J-A1 (N=2)			0,896	0,900				
S M-1 (N=2)					926	0,915		
BL-1 (N=2)							0,871	0,890

S: Simulación, A: Aguirre, J-A: Jaruco-Aguacate, M: Madruga, BL: Boris Luis Santa Coloma.

CONCLUSIONES

La litología constituye el factor determinante en el modo de adquisición de la composición química en la cuenca Jaruco- Aguacate, donde existen tres tipos de aguas, caracterizadas por las facies hidroquímicas: $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$; $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ y $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$. Esta composición química relativa no ha variado apreciablemente desde el año 1982 hasta el presente. Las ecuaciones de mejor ajuste que relacionan la concentración iónica con la conductividad eléctrica son de tipo lineal en todos los casos. Mediante cuatro juegos de estas ecuaciones se puede controlar la composición química de las aguas de la red de explotación de esta región mediante simples mediciones de conductividad eléctrica. También se puede utilizar con estos fines, un método de simulación a partir de relaciones iónicas y conductividades eléctricas teóricas.

BIBLIOGRAFÍA

Academia de Ciencias (1990). Mapa Geológico de Cuba. Instituto de Geología y Palentología. C. Habana. Hojas 3 y 11.

Alvarez E. , I. Vinardell, J.R. Fagundo, E. Reguera, M.E. Cardoso (1990a). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. II- Sistema Automatizado para el Monitoreo de las Aguas. Voluntad Hidráulica 1989, 83: 15-25.

Alvarez, A. I. Vinardell, J.R. Fagundo, J. Vega, E. Reguera (1990b). Sistema automatizado de tratamiento de datos hidroquímicos para el chequeo de la calidad de las aguas. Estudios Geológicos, Madrid, 45 (5-6); 409-414.

Alvarez, E. y J.R. Fagundo (1991). SAPHIQ, un sistema para el procesamiento automatizado de datos hidroquímicos. Revista CENIC Ciencias Químicas 22 (1): 59-65.

Callejón S.M, A. Pulido Bosch, P. Valenzuela (1984). Aplicación de los análisis "cluster" al estudio de características físico- químicas de aguas subterráneas. Estudios Geológicos, Madrid, 40: 193-200.

De La Cruz A., J.J Valdés (1985). Estudio de las aguas kársticas de la Sierra del Pan de Guajaibón y sus inmediaciones mediante métodos matemáticos exploratorios de datos. *Voluntad Hidráulica*, 68: 25-34.

Dudley J.R. (1972). Realibility of water analysis. General Technical Reports TDR No 092721.

Fagundo J. R., J.J. Valdés, M.E. Cardoso, A. de la Cruz (1986). Algoritmo para el cálculo de parámetros e índices químico-físicos y geoquímicos en aguas naturales altamente mineralizadas. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 12 (1/2), 72-76.

Fagundo J.R. (1990a). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. I- Estudio mediante simulación química del efecto de la litología. *Voluntad Hidráulica*, 83: 28-37.

Fagundo J.R. (1990b). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. Efecto de los factores geológicos, hidrogeológicos y ambientales. *Hidrogeología*, Granada, 33-46.

Fagundo J.R., J.E. Rodríguez, J.M. Pajón, E. Franco, E. Alvarez, I. Vinardell, J. Vega, G. Benítez (1991). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. III- Cuenca del río San Marcos, Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. *Voluntad Hidráulica*, 85: 8-18.

Fagundo J.R., J.J. Valdés y J.E. Rodríguez (1996). *Hidroquímica del Karst*. Univ. Granada (España), 304 Pags.

Fagundo J.R., J.J. Valdés, M.E. Cardoso, A. De La Cruz (1986). Algoritmo para el cálculo de parámetros e índices químico-físicos y geoquímicos en aguas naturales altamente mineralizadas. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 12 (1/2): 72-76.

Pulido Bosch A. (1989). *Caracterización hidroquímica del campo de Dalías (Almería)*. Ed. Inst. Andaluz de Reforma Agraria, España, 265 Pags.

Santiago J.F. (1990). *Caracterización de las aguas subterráneas cársicas de las provincias Habana y Ciudad Habana*. Tesis para la opción del grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Ciudad Habana.

Santiago J.F. (1993). Determinación indirecta de la concentración de macrocomponentes en aguas cársicas mediante análisis de asociación y regresión. En: *Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst*, Matanzas 1992). Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 171-182.

Standard Method (1971). 13ª Edición.

StatSoft (1987). *Complete Statistical System (CSS)*. Versión B640.

Valdés J.J, J.R. Fagundo, J.E. Pajón (1981). Aplicación de métodos numéricos al estudio hidroquímico de las aguas de la cuenca del río Cuyaguaje. *Ingeniería Hidráulica*, 2 (3): 215-286.