

EVOLUCION QUIMICA Y RELACIONES EMPIRICAS EN AGUAS NATURALES. III CUENCA DEL RIO SAN MARCOS, SIERRA DEL ROSARIO, PINAR DEL RIO, CUBA

RESUMEN:

En la cuenca del río San Marcos, donde producto de una compleja evolución tectónica afloran diferentes secuencias estratigráficas, las aguas adquieren una composición química que refleja las características de las respectivas litofacies: rocas efusivo-sedimentarias, ultrabásitas y calizas de diferente edad geológica. Mediante un sistema de procesamiento automatizado, se encontraron seis juegos de ecuaciones matemáticas que relacionan las concentraciones iónicas con la conductividad eléctrica, las cuales permiten caracterizar cada medio y, además, controlar en lo sucesivo, la calidad de estas aguas, en términos de macrocomponentes y mineralización mediante simples mediciones de conductividad eléctrica. Las ecuaciones de mejor ajuste fueron de tipo lineal. Se demostró que en esta región la litología es el factor dominante en el modo de adquisición de la composición química de las aguas.

Abstract

In San Marcos river basin, where as a result of a complicate tectonical evolution, various stratigraphic sequences occur, waters show chemical compositions with respective lithofacies' characteristics: sedimentary-efusive rock, ultrabasic rock and different geological-age limestone. Using an automated processing system 6 sets of mathematical equations relating ion concentrations to electrical conductivity are found, allowing each medium characterization and also consecutively controlling this water quality in terms of macro-components and water mineralization through simple electrical conductivity measurements. The best fitting equations were linear-type equations. It was shown that lithology was the main factor at the water chemical composition in the region.

INTRODUCCION:

Relaciones empíricas entre la conductividad eléctrica y una serie de parámetros químico-físicos característicos de las aguas naturales han sido reportadas en la literatura: mineralización (Bakalowicz, 1984), total de sólidos solubles (Keith Told, 1957), salinidad (Gutiérrez et al, 1974), dureza (Brag, 1977), raíz cuadrada de la fuerza iónica (Shuster y White, 1965); así como la concentración de los principales iones (Drake y Ford, 1974). El empleo de las ecuaciones de regresión correspondientes ha facilitado los cálculos de muchos de estos indicadores y han sido utilizadas incluso, para la caracterización de acuíferos (Fagundo, 1985).

Con respecto a la concentración iónica, sólo se han encontrado correlaciones significativas con los iones más abundantes, lo que ha limitado aparentemente el uso de ecuaciones de regresión en el control de la calidad de las aguas en forma extensiva. En un trabajo anterior (Alvarez et al, 1990) se presentó un sistema automatizado para el monitoreo de las aguas (SAMA), el cual permite de manera rápida y eficaz, encontrar y almacenar juegos de ecuaciones matemáticas (modelos empíricos), concentración iónica, conductividad eléctrica, que son características para un sitio o área donde la mayor parte de los factores que controlan el modo de adquisición química de las aguas se hace constante.

Aplicando este sistema a los análisis químicos efectuados a distintos intervalos de tiempo en un experimento de laboratorio sobre la disolución de rocas carbonatadas (Fagundo, 1990), se encontró que la magnitud de las pendientes de las líneas rectas correspondientes al ajuste de datos de contenido iónico conductividad eléctrica, dependía de la composición mineralógica de dichas rocas.

En el presente trabajo se exponen los resultados de la determinación de la composición química mediante modelación matemática, de las aguas de la cuenca del río San Marcos, Pinar del Río, donde desde 1984 se vienen realizando estudios sistemáticos entre especialidades cubanas y polacas, para determinar la intensidad de denudación química y el proceso de evolución del carso en condiciones de clima tropical (Pujina et al, 1984), con el objetivo de comparar los resultados con los de otras regiones cársticas ubicadas en otras latitudes. Además de presentar esta cuenca, calizas de diferentes edades geológicas, están representadas otras litologías, todo lo cual le confiere a esta región características excepcionales para los estudios relacionados con la determinación de la composición química de las aguas que se mueven por los distintos medios geológicos mediante modelación matemática.

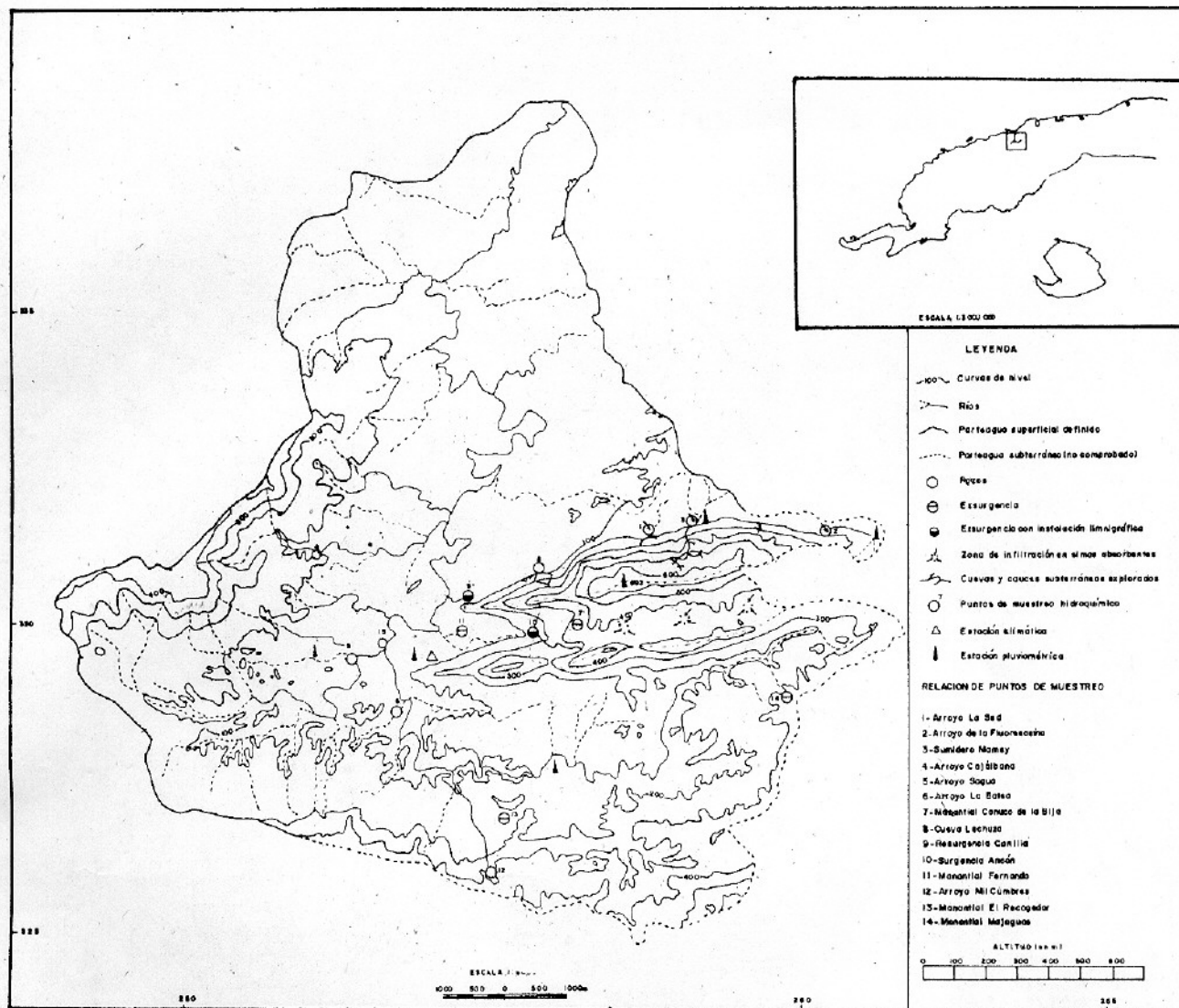
Características geológicas y geomorfológicas.

La cuenca del río San Marcos (ver figura 1), de unos 155 km² de superficie, se caracteriza por tener una constitución geológica zonal, determinada por la presencia de cuatro fajas de distinta composición que se suceden de Norte a Sur (figura 2). Estas son: las ofiolitas Cajalbana, la faja Felicitades, la faja Guajabón-Sierra Chiquita y la faja Rosario Norte. Estas fajas están en contacto tectónico según superficies de sobrecorrimiento y adicionalmente están deformadas en un conjunto de escamas tectónicas de menores proporciones.

Desde sus cabeceras hasta la desembocadura, el río San Marcos y sus

afuentes atraviesan estas fajas composicionales y se mueven por los diferentes medios geológicos, los que ejercen influencias en las propiedades químico-físicas de las aguas. Además del drenaje superficial, existe otro de tipo subterráneo que se desarrolla principalmente en las áreas cársticas, alimentado fundamentalmente por aportes alóctonos y autóctonos de los macizos.

En la figura 2 se muestra un mapa de la cuenca donde aparecen los principales medios geológicos, la red hidrográfica y la composición química (representada mediante diagramas circulares) de las aguas de esta región, donde pueden apreciarse cambios significativos desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo. De Sur a



1. Mapa de la cuenca del río San Marcos, donde se aprecian la red hidrográfica, las principales unidades geomorfológicas y los puntos de muestreo sistemático

Norte la cuenca fluvial se compone de la siguiente manera:

1. *Faja Rosario Norte*. Está constituida principalmente por rocas del Cretácico y Paleógeno, de las secuencias que Pszczolkowski *et al.* (1987) denominó Rosario Septentrional. Se compone de paquetes rocosos que tienen rumbos E-W, integrados respectivamente por calizas negras de grano fino, calizas areniscas y aleurolitas cuarzosas y conglomeraos, areniscas y aleurolitas. Las corrientes fluviales atraviesan estos paquetes litológicos o corren a lo largo de los más delizables.

2. *Faja Pan de Guajaibón-Sierra Chiquita*. Está constituida por rocas del Cretácico Superior propias de las formaciones Guajaibón (Albiano Cenomaniano) y Cacarajicara (Maestrichtiano). La primera está constituida por calizas micríticas masivas o de estratos gruesos con un horizonte intercalado de roca bauxítica. La segunda son calciruditas y calcarenitas de estratos gruesos.

3. *Faja Felicidades*. Está constituida por rocas efusiva-sedimentarias del Cretácico (formaciones Encrucijada y Quiñones) y horizontes de rocas clásicas del Paleógeno (Formación Mana-

cas). Las formaciones cretácicas son basaltos, diabasas e hialoclastitas, con intercalaciones de poco espesor de calizas, aleurolitas, tobas y silicitas. Las rocas del Paleógeno constituyen olistostromas polimíticos (brecha-conglomeraos, areniscas y aleurolitas).

4. *Faja de otiolitas Cajalbana*. Está compuesta por una mezcla de ultramafitas serpentinizadas con menor cantidad de gabros. Por partes está cubierta por cortezas lateríticas «in situ» o redepositadas. Entre sus límites afloran areniscas, conglomerados y aleurolitas del Eoceno Inferior (Formación Capdevila).

Las características geomorfológicas del área reflejan su complejidad litológica y tectónica. Se evidencian unidades geomorfológicas bien diferenciadas: las montañas bajas que constituyen el macizo de Cajalbana; la llanura ondulada al pie de la vertiente Norte del Pan de Guajaibón; las montañas bajas del Pan de Guajaibón y Sierra Chiquita; la depresión sinclinal elevada en la parte de Mil Cumbres, que como su nombre lo indica se caracterizan por presentar multitud de picos de tipo cónico.

El carso en la región está muy desarrollado en las secuencias carbonatadas, observándose abundante lapiaz, ponores, simas de absorción, dolinas y otras formas exocársicas. La morfología endocársica está representada por conductos y cavidades, en ocasiones con dimensiones notables, entre las que se destacan las cuevas del Mamey, Ancón y Lechuza. Entre la morfología no cársica se aprecian las formas fluviales (Barrancos y valles) y gravitacionales (deslizamientos y derrumbes).

MATERIALES Y METODOS

Durante el período 1984-1987 se realizó un muestreo sistemático en cuatro sitios de la cuenca: Sumidero Mamey, Resurgencia Canilla, Surgencia Ancón y Manantial Mil Cumbres, representativos respectivamente de las corrientes superficiales que se mueven por los efusivo-sedimentarios de la Faja Felicidades; resurgencia cársica en las secuencias carbonatadas del macizo del Pan de Guajaibón, alimentada por aportes alóctonos y autóctonos; emergencia cársica en las calcarenitas de la Sierra Chiquita, alimentada por aportes autóctonos solamente y manantial cársico de las calizas de la Faja Rosario Norte. Además de los muestreos sistemáticos se realizaron otros en períodos seco y húmedo respectivamente en sitios representativos de los restantes medios geológicos e hidrogeológicos; arroyos superficiales que se mueven por el medio vulcanógeno-sedimentario (excluyendo al arroyo Mamey), arroyos superficiales de la zona de las ultrabasitas, aguas tomadas en la zona de alimentación y en las cuevas del macizo del Pan de Guajaibón, en arroyos, manantiales y resurgencias asociadas a este macizo, otros manantiales asociados a las calizas de la Faja Rosario Norte y en el propio río San Marcos.

La temperatura, el pH, la conductividad eléctrica y los análisis químicos fueron realizados en condiciones de campo mediante las técnicas de Markowicz y Pulina (1979). El régimen

de precipitaciones, nivel de los ríos, así como sus gastos fueron controlados mediante las estaciones hidroclimáticas instaladas en esta región en el marco del programa de investigación al que hemos hecho referencia.

Con la información hidroquímica del período 1984-1987 se confeccionaron ficheros de datos, con los cuales, se determinaron, mediante el sistema SAMA (Alvarez *et al* 1990), los modelos de dependencia matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica. También se crearon ficheros de comprobación con valores correspondientes al período 1988-1989. A continuación se relacionan dichos ficheros:

- Mamey (fichero de datos, N = 24) - Sumidero del arroyo Mamey

- SMamey (fichero de comprobación, N = 4) - En el mismo sitio

- Efusivos (fichero de datos, N = 6) - Arroyos de la zona de los efusivo-sedimentarios (no incluido el arroyo Mamey)

- Cajalbana (fichero de datos, N = 6) - Arroyos de la zona de las rocas ultrabásicas

- Serpenti (fichero de comprobación, N = 7) - En la misma zona

- Alimenta (fichero de datos, N = 18) - Aguas de la zona de alimentación del sistema hidrológico Ancón

- Cuevagua (fichero de datos, N = 25) - Aguas tomadas en gours y degotes en las cuevas Mamey, Lechuza y Ancón

- RCuevagu (fichero de comprobación, N = 9) - Ríos transfluentes en las cuevas Mamey, Canilla y Ancón

- Canilla (fichero de datos, N = 28) - Resurgencia Canilla

- RCanilla (fichero de comprobación, N = 11) - En dicha resurgencia

- SAncón (fichero de datos, N = 23) - Surgencia Ancón

- Sur Ancón (fichero de comprobación, N = 13) - En el sitio anterior

- AncónII (fichero de datos, N = 7) - Resurgencia Ancón II

- Ancón2 (fichero de comprobación, N = 3) - El mismo sitio

- MilCumbr (fichero de datos, N = 14) - Manantial Mil Cumbres, en las calizas de la Faja Rosario Norte.

- Cumbres (fichero de comprobación, N = 3) - En el sitio anterior

- Manguaja (fichero de datos, N = 9) - Otros manantiales asociados a la Faja Rosario Norte

- SanMarco (fichero de datos, N = 8) - Río San Marcos desde su nacimiento hasta la porción media

- RSanMarc (fichero de comprobación, N = 4). En el mismo sitio anterior.

Finalmente, se crearon ficheros de datos con la información hidroquímica de todo el período de estudio (1984-1989), agrupada según las unidades o patrones hidrogeológicos determinados por evaluación de las pendientes de las ecuaciones de regresión obtenidas en el procesamiento de los datos originales:

- Efussedi (fichero de datos, N = 34) - Toda la información hidroquímica asociada a las secuencias efusivo sedimentarias

- Ultrabas (fichero de datos, N = 13) - Toda la información hidroquímica asociada a las ultrabasitas

- CalizaFG (fichero de datos, N = 140) - Toda la información hidroquímica asociada a las calizas y calcarenitas de los macizos Guajaibón y Chiquita, exceptuando la Resurgencia Ancón II

- Ancón2 (fichero de datos, N = 11) - Toda la información hidroquímica correspondiente a la Resurgencia Ancón II

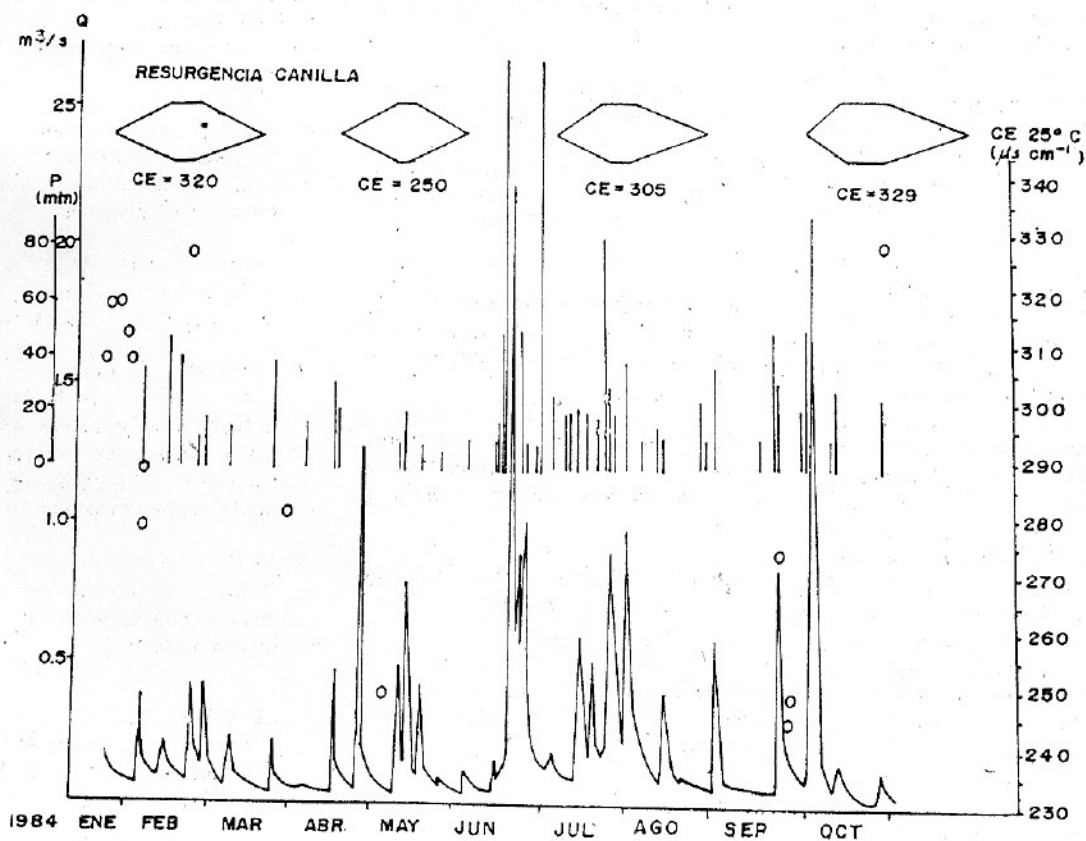
- CalizaFR (fichero de datos, N = 27) - Toda la información hidroquímica asociada a las calizas de la Faja Rosario Norte

- RíoSanMa (fichero de datos, N = 10) - Toda la información hidroquímica correspondiente al río San Marcos

Tabla 1. Valores medios de la concentración iónica (en % meq/l), total de sólidos solubles (en mg/l) y valores mínimos, medios y máximos, así como del coeficiente de variación de la conductividad eléctrica de las aguas de la cuenca del río San Marcos en el período 1984-1987

Ficheros de datos	N	Concentración iónica (% meq/l)							Conductividad eléctrica			
		HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na+K	TSS	Mínima	Media	Máxima	C.V.
Mamey	24	85,9	11,2	2,9	50,3	16,6	33,1	401	125	439	565	26,8
Efusivo	6	85,4	9,1	5,5	51,7	16,3	32,0	304	170	363	600	49,9
Cajalban	6	86,0	9,2	4,8	2,6	83,8	14,6	324	320	374	400	7,9
Alimenta	18	89,0	9,3	1,7	74,0	11,1	14,9	360	320	395	530	21,9
Cuevagua	21	81,6	14,9	3,5	75,3	10,5	14,2	240	185	276	375	18,4
RCuevagu	9	82,4	12,2	5,4	75,0	8,4	16,6	326	340	372	486	13,2
Canilla	28	83,5	11,6	4,9	69,9	11,9	18,2	265	210	293	360	11,6
SAncon	23	83,6	10,3	6,1	74,0	10,4	15,6	301	260	332	400	12,0
Fernando	9	85,5	8,5	6,0	75,8	12,4	11,8	378	365	435	520	12,7
AnconII	7	77,7	8,7	13,6	68,4	12,2	19,4	354	370	417	480	8,3
MilCumbr	14	79,9	8,2	13,9	75,9	7,5	16,6	434	430	483	560	7,9
Manguaja	9	84,0	6,7	9,3	71,2	9,2	19,6	529	472	581	735	14,1
San Marco	6	81,1	8,9	10,0	66,6	15,7	17,7	371	380	411	445	6,5

3. Variación de los caudales, la conductividad eléctrica (como expresión de mineralización) y la composición química, representada mediante diagramas de Stiff, de las aguas de la resurgencia Canilla, como consecuencia del régimen de precipitación durante el período enero-diciembre



RESULTADOS Y DISCUSION

Caracterización hidrológica e hidroquímica

La cuenca del río San Marcos está constituida por una red de drenaje superficial y otra de tipo subterránea. El sistema hidrológico puede subdividirse de la manera siguiente:

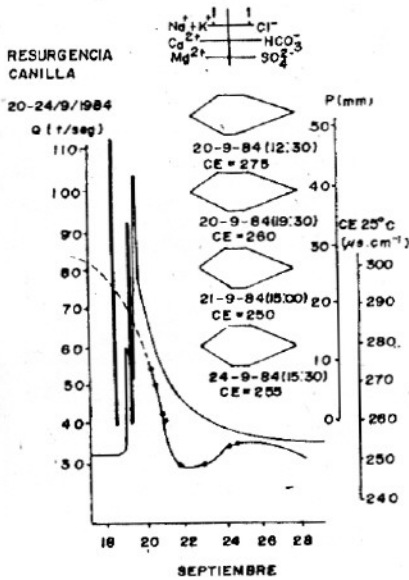
- Sistema hidrológico Canilla. Ocupa la porción Norte del macizo del Pan de Guajabón. Su cuenca de captación integra varias corrientes superficiales estacionales de breve recorrido epigeo, que penetran en el macizo por un sistema de ponores ubicados en la porción noroccidental. De ellos, el arroyo Mamey es el más importante y se origina en el medio efusivo-sedimentario. Estos arroyos, después de penetrar en el macizo se mezclan con

aguas autóctonas, organizan su circulación a nivel de los ríos superficiales y resurgen al exterior, en la misma porción noroccidental, en la denominada Resurgencia Canilla. A este sistema están asociadas las cuevas Mamey y Canilla.

En la zona de los efusivo-sedimentarios, las aguas son durante todo el año del tipo bicarbonatadas cálcico-sódicas. Las conductividades eléctricas, en el periodo estudiado, variaron entre 125 y 565 μScm^{-1} . En el arroyo Mamey el valor medio de esta magnitud fue de 439 μScm^{-1} . Al alcanzar el área cársica las aguas se transforman en bicarbonatadas cálcicas. La conductividad eléctrica media obtenida fue de 293 μScm^{-1} , con una variación entre 210 y 360 μScm^{-1} .

Sistema hidrológico Ancón. Su zona de alimentación se encuentra situada

4. Efecto de las precipitaciones en la variación de los caudales la conductividad eléctrica (como expresión de mineralización) y la composición química (representada mediante diagramas de Stiff) de las aguas de la resurgencia Canilla durante el periodo comprendido entre el 18 y el 28 de septiembre de 1984



5. Variación de la conductividad eléctrica (como expresión de mineralización) de las aguas muestreadas sistemáticamente durante el periodo 1984-1989 sumidero del río Mamey, resurgencia Canilla, surgencia Ancón y el manantial Mil Cumbres.

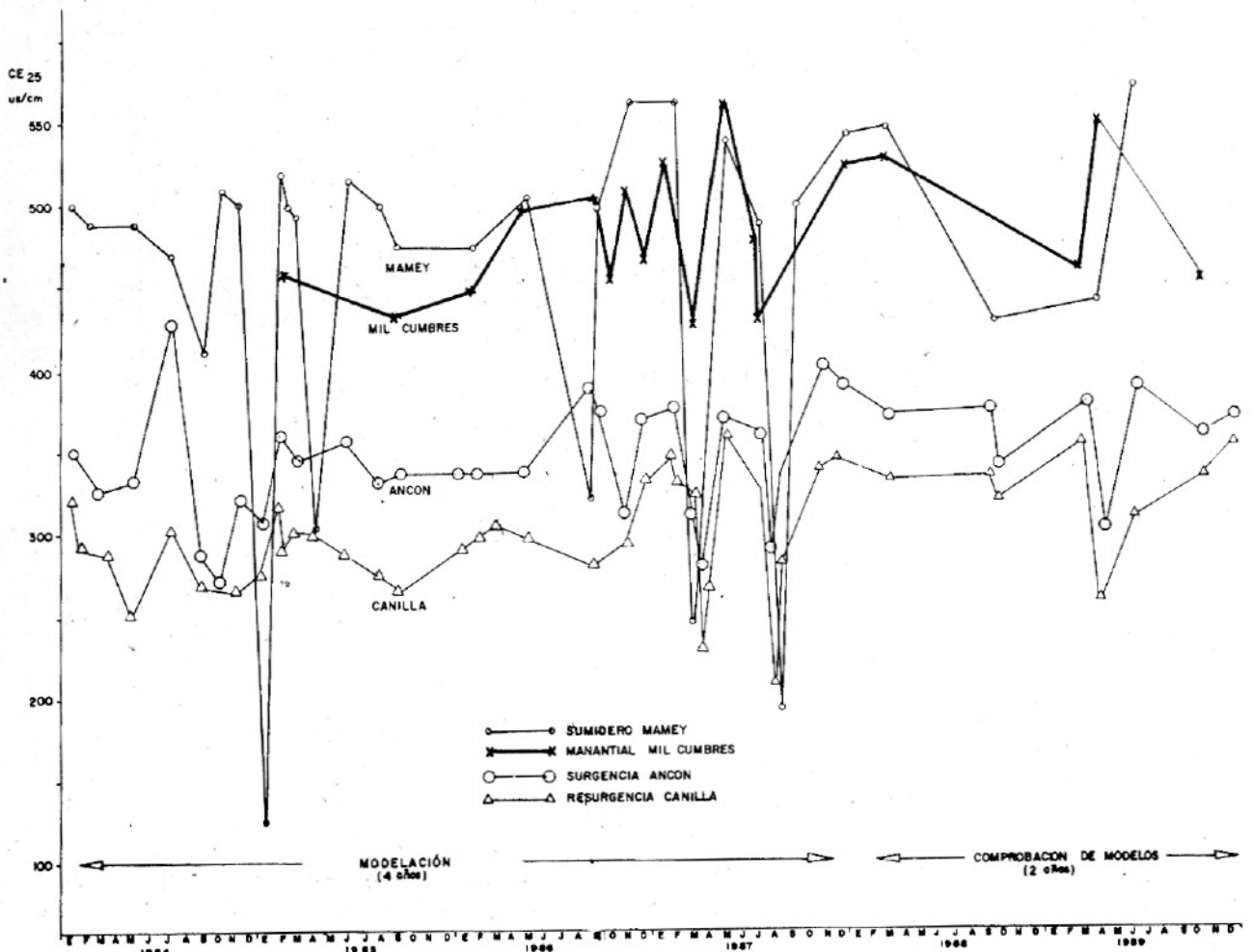


Tabla 2. Valores de los índices de similitud medios (IS) entre los datos hidráulicos originales (1984-1987) y los determinados por modelación utilizando los respectivos ficheros de modelos; así como los valores de las pendientes de las ecuaciones de regresión lineal correspondientes para cada ion (BCI)

Fichero de Datos	N	IS	HCO ₃	Cl	SO ₄	BCI x 0,001 Ca	Mg	Na+K
Mamey	24	0,901	10,133	1,316	0,350	5,936	1,951	3,912
Efusivo	6	0,872	9,338	0,995	0,610	5,658	1,780	3,505
Cajalban	6	0,937	10,349	1,101	0,583	0,313	9,970	1,750
Alimenta	18	0,907	10,377	1,077	0,202	8,622	1,293	1,741
Cuevagua	21	0,885	9,289	1,693	0,389	8,555	1,203	1,613
RCuevagu	9	0,883	9,342	1,384	0,612	8,505	0,941	1,892
Canilla	28	0,917	9,997	1,370	0,573	8,212	1,396	2,132
SAncon	23	0,919	9,782	1,197	0,716	8,651	1,214	1,830
Fernando	9	0,903	9,582	0,948	0,673	8,500	1,382	1,321
Ancon II	7	0,879	8,600	0,961	1,500	7,559	1,346	2,156
MilCumbr	14	0,905	9,058	0,946	1,615	8,821	0,867	1,931
Manangua	9	0,885	9,799	0,781	1,089	8,306	1,075	2,238
SanMarco	6	0,880	9,564	1,047	1,179	7,843	1,852	2,095

Tabla 3. Matriz de índices de similitud (IS) donde se relacionan los ficheros de datos (columnas) y los de modelos (filas)

Fichero de Modelo	Ficheros de datos (1984-1987)												
	Mamey 24	Efusivo 6	Cajalbari 6	Alimenta 18	Cuevagua 21	RCuevagu 9	Canilla 28	SAncon 23	Fernando 8	AnconII 7	MilCumbr 14	Man- guaja 9	San- Marco 6
AMAMEY	0,901	0,855	0,565	0,790	0,773	0,772	0,810	0,784	0,779	0,748	0,716	0,779	0,784
IEFUSIVO	0,874	0,872	0,552	0,768	0,767	0,766	0,796	0,777	0,778	0,789	0,747	0,775	0,789
ACAJALBA	0,559	0,532	0,937	0,548	0,498	0,522	0,542	0,533	0,513	0,482	0,487	0,516	0,522
AALIMENT	0,754	0,709	0,574	0,907	0,851	0,857	0,887	0,896	0,887	0,784	0,829	0,850	0,839
ACUEVAGU	0,744	0,733	0,541	0,879	0,885	0,873	0,887	0,892	0,884	0,818	0,850	0,839	0,829
ARCUEVAG	0,752	0,740	0,544	0,885	0,878	0,883	0,898	0,904	0,896	0,835	0,868	0,855	0,837
ACANILLA	0,796	0,765	0,566	0,902	0,880	0,879	0,917	0,909	0,896	0,830	0,852	0,861	0,862
ASANCON	0,764	0,736	0,570	0,905	0,874	0,887	0,906	0,919	0,906	0,826	0,871	0,868	0,856
AERNAND	0,740	0,720	0,560	0,888	0,856	0,861	0,884	0,897	0,903	0,828	0,863	0,885	0,852
AANCONII	0,758	0,788	0,527	0,834	0,847	0,838	0,857	0,849	0,857	0,879	0,872	0,841	0,866
AMILCUMB	0,719	0,733	0,531	0,868	0,856	0,866	0,865	0,887	0,890	0,862	0,905	0,872	0,843
AMANGUAI	0,767	0,750	0,548	0,890	0,854	0,859	0,891	0,902	0,901	0,854	0,878	0,885	0,862
ASANMARC	0,796	0,779	0,779	0,880	0,859	0,854	0,895	0,891	0,901	0,866	0,870	0,868	0,888

Tabla 4.

Valores de los índices de similitud entre los datos reales y los determinados por modelación al correlacionar por SAMA los datos hidroquímicos correspondientes al período 1988-1989 con los ficheros de los modelos creados con los datos del período 1984-1987

Fichero de datos	N	Fichero del modelo	IS
SMamey	4	AMAMEY	0,897
Serpenti	7	ACAJALBA	0,907
RCanilla	11	ACANILLA	0,907
SurAncon	15	ASANCON	0,902
MFernand	6	AERNAND	0,903
RAnconII	3	AANCON2	0,849
Cumbre	4	AMILCUB	0,888
RSanMarc	4	ASANMARC	0,920

Fichero de datos: smamey

Fichero del modelo: amamey

Índice de similitud del fichero = 0.89653

Diagrama de Stiff

Muestra # 1

Factor de corrección: 1



20-3-1988



IS = 0.948

Muestra # 4

Factor de corrección: 1



14-6-1989



IS = 0.922

6. Comparación mediante diagramas de Stiff de la composición química de las aguas del sumidero Mamey, determinada por análisis químico (izquierda) y modelación (derecha). Los datos hidroquímicos corresponden al fichero de comprobación (1988-1989). El fichero del modelo fue creado con los datos originales (1984-1987)

8. Comparación mediante diagramas de Stiff de la composición química de las aguas que emergen por la resurgencia Canilla, determinada por análisis químico (izquierda) y modelación (derecha). Los datos hidroquímicos corresponden al fichero de comprobación (1988-1989). El fichero del modelo fue creado con los datos originales (1984-1987)

Fichero de datos: serpenti

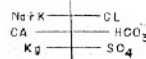
Fichero del modelo: acajaba

Índice de similitud del fichero = 0.93997

Diagrama de Stiff

Muestra # 1

Factor de corrección: 1



17-4-1989



IS = 0.978

Muestra # 5

Factor de corrección: 1



17-4-1989



IS = 0.976

7. Comparación mediante diagramas de Stiff de la composición química de las aguas que se mueven por el macizo Cajalbana, determinada por análisis químico (izquierda) y modelación (derecha). Los datos hidroquímicos corresponden al fichero de comprobación (1988-1989). El fichero del modelo fue creado con los datos originales (1984-1987).

9. Comparación mediante diagramas de Stiff de la composición química de las aguas que emergen por la surgencia Ancón, determinada por análisis químico (izquierda) y modelación (derecha). Los datos hidroquímicos corresponden al fichero de comprobación (1988-1989). El fichero del modelo fue creado con los datos originales (1984-1987)

en la porción central del macizo, que constituye una depresión elevada donde existe, con gran desarrollo, una serie de formas cársticas de absorción tales como dolinas y simas por donde de una manera rápida se infiltra la mayor parte de las precipitaciones y a través de un sistema de cavidades, se organiza el drenaje subterráneo que emerge en la Surgencia Ancón. El drenaje superficial en esta zona es prácticamente inexistente. Después de salir al exterior el río tiene un breve recorrido superficial, se vuelve a sumergir y finalmente resurge en la denominada Resurgencia Ancón II, muy cerca del río San Marcos.

Las aguas de este sistema son del tipo bicarbonatadas cálcicas durante todo el año. En el periodo estudiado, la conductividad eléctrica media fue de 394 μScm^{-1} en la zona de alimentación, 280 μScm^{-1} en las cuevas, 332 μScm^{-1} en la surgencia Ancón y 375 μScm^{-1} en la resurgencia Ancón II.

En la tabla 1 se presentan los valores medios de las concentraciones relativas (en % meq/L) de los distintos tipos de aguas presentes en la cuenca, de la mineralización (en mg/l), así como los valores medios, máximos, mínimos y el coeficiente de variación de la conductividad eléctrica de dichas aguas.

Sobre la base de las mediciones limnigráficas hechas durante el año hidrológico 1984-1985, así como su correlación con los aforos realizados se determinó que los gastos máximos correspondieron a los meses de noviembre y septiembre: 471 y 528 IS^{-1} respectivamente para el sistema Ancón y 254 y 211 IS^{-1} para el Canilla. Los valores mínimos se registraron en el mes de marzo 72 y 22 IS^{-1} para Ancón y Canilla respectivamente (Rodríguez et al 1989).

En la figura 3 se muestra la relación entre las precipitaciones, los caudales, la conductividad eléctrica del agua y su composición química, expresada mediante diagrama de Stiff (1951) durante ese año en la Resurgencia Canilla.

Una característica de estos arroyos, es la rapidez con que responden ante el estímulo de las precipitaciones, una vez llenos los depósitos subterráneos que lo componen. En esos casos se produce una rápida crecida, a la cual sigue una descarga también rápida, una vez que cesan las lluvias. En la figura 4 se expresa gráficamente el efecto de las precipitaciones en la variación de los caudales, la conductividad eléctrica y la composición química de las aguas (mediante diagramas

Fichero de datos: rcanilla

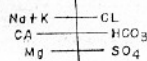
Fichero del modelo: acanilla

Índice de similitud del fichero = 0.89774

Diagrama de Stiff

Muestra # 5

Factor de corrección: 1



17-3-1989



IS = 0.970

Muestra # 5

Factor de corrección: 1



14-6-1989



IS = 0.911

Fichero de datos: surancón

Fichero del modelo: dancon

Índice de similitud del fichero = 0.90291

Diagrama de Stiff

Muestra # 2

Factor de corrección: 1



29-9-1988



IS = 0.932

Muestra # 11

Factor de corrección: 1



10-4-1989



IS = 0.944

de Stiff) de la Resurgencia Canilla en el periodo comprendido entre el 18 y el 28 de septiembre de 1984.

Como se aprecia en las figuras 3 y 4, como resultado de las precipitaciones tanto anuales como temporales, cambia la composición cuantitativa de las aguas de esta resurgencia. Sin embargo, desde el punto de vista cualitativo estas se mantienen en todo momento como bicarbonatadas cálcicas.

La fluctuación estacional de la mineralización de las aguas de la cuenca del río San Marcos estudiadas sistemáticamente, es por lo general grande como puede apreciarse en la figura 5 y se desprende del valor del coeficiente de variación de la conductividad eléctrica (tabla 1). Esta fluctuación es mayor, como es lógico, en las aguas de tipo superficial que en las subterráneas. El relativamente alto valor del coeficiente de variación de la conductividad eléctrica en las aguas subterráneas indica el alto grado de cavernosidad de este medio, especialmente en los sistemas Canilla y Ancón.

Sistema hidrológico Cajalbana. Lo constituyen los arroyos superficiales que vierten sus aguas al río San Marcos. Se alimenta directamente de las precipitaciones y de algunos manantiales que emergen en el propio curso. Sus aguas son del tipo bicarbonatadas magnesianas con una conductividad eléctrica media, en el periodo estudiado, de $353 \mu\text{Scm}^{-1}$, la cual fluctuó entre 320 y $365 \mu\text{Scm}^{-1}$.

Sistema hidrológico asociado a la Faja Rosario Norte. Está constituido por una serie de arroyos que se originan en manantiales que brotan en el contacto de las calizas con las secuencias impermeables de tipo terrígenas. Sus aguas son del tipo bicarbonatadas cálcicas, pero poseen un contenido ligeramente mayor de ion.

SO_4^{2-} y más elevado contenido de CO_2 que el resto de las aguas cársicas. En el manantial Mil Cumbres, representativo de este medio la conductividad eléctrica media fue de $430 \mu\text{Scm}^{-1}$, variando entre 403 y $460 \mu\text{Scm}^{-1}$.

Las aguas del río San Marcos, que resultan de la mezcla, son del tipo bicarbonatadas cálcicas, aunque reflejan un contenido ligeramente más elevado de SO_4^{2-} y Mg^{2+} que las propias del sistema cársico. La conductividad eléctrica media obtenida fue de $367 \mu\text{Scm}^{-1}$ con variación entre 310 y $445 \mu\text{Scm}^{-1}$.

Relaciones empíricas concentración iónica-conductividad eléctrica

En la tabla 2 se presentan las pendientes de las ecuaciones de regresión resultantes del ajuste de la información hidroquímica, correspondiente a los ficheros de datos confeccionados con la información original (periodo 1984-1987). Obsérvese que existe una estrecha relación entre la magnitud de estas pendientes y la composición química en $\%$ de meq/l de estas aguas (ver tabla 1), lo cual indica que en esta región la litología es el factor dominante en el modo de adquisición de la composición química de las aguas. Los índices de similitud entre la composición química real y la determinada por modelación matemática, que aparecen en la misma tabla 2, en la mayoría de los casos es superior al 80% . Esto quiere decir, que los juegos de ecuaciones de regresión determinados mediante el sistema SAMA, son satisfactorios para controlar la composición química y la mineralización de estas aguas, para lo cual sólo basta medir la conductividad eléctrica de las mismas. En esta tabla aparecen subrayadas las pendientes que

poseen un valor relativamente más elevado. Sobre el criterio de la semejanza se seleccionaron seis juegos de ecuaciones que poseen pendientes parecidas entre sí.

En la tabla 3 se muestra una matriz de índices de similitud, creada al procesar por el programa Modelo Polinómico del sistema SAMA, los datos hidroquímicos de todas las aguas muestreadas en el periodo 1984-1987 con todos los ficheros de modelos. Como puede apreciarse, los mayores valores de esta magnitud se obtienen cuando los modelos corresponden a los ficheros de datos con los cuales fueron obtenidos esos modelos (IS medio superior a un 84%). Además, se obtuvieron valores de IS relativamente altos al procesar los datos con modelos determinados con ficheros de datos correspondientes a medios geológicos similares.

Por tanto, a partir de los resultados presentados en las tablas 2 y 3 es posible seleccionar seis modelos o patrones hidrogeoquímicos, mediante los cuales se pueden caracterizar todas las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca, y además determinar la composición química en lo sucesivo, empleando dichos modelos o patrones, así como mediciones de conductividad eléctrica.

Con el objetivo de comprobar la validez de los patrones seleccionados se agruparon los datos originales (1984-1987) correspondientes a cada unidad geológico-hidrogeológica y se procedió a correlacionar con estos modelos, los datos hidroquímicos correspondientes a un periodo de tiempo ulterior (1988-1989). En la tabla 4 puede apreciarse que los valores de IS medios, entre los valores reales y los obtenidos por estos modelos es superior al 87% . En las figuras 6-10 se

Tabla 3. Valores medios de la concentración iónica (en $\%$ meq/l), total de sólidos solubles (en mg/l) y valores mínimos, medios y máximos, así como del coeficiente de variación de la conductividad eléctrica de las aguas de la cuenca del río San Marcos en el periodo 1984-1989

Fichero de Datos	N	Concentración iónica ($\%$ meq/l)							Conductividad eléctrica			
		HCO_3	Cl	SO_4	Ca	Mg	Na+K	TSS	Mínima	Media	Máxima	C.V.
Efussedi	34	85,7	10,9	3,4	50,9	16,5	32,6	388	125	429	600	30,8
Ultrabas	13	86,9	10,4	10,7	2,8	85,0	12,2	308	236	354	454	17,2
Caliza PG	140	84,6	11,1	4,3	73,4	11,3	15,3	302	185	339	572	21,4
Ancón 2	10	80,7	9,0	10,3	70,3	11,2	18,5	345	325	401	480	10,2
Caliza FR	27	80,6	7,6	11,8	73,6	8,5	17,9	469	425	509	735	13,0
RíoSanMar.	10	79,6	9,5	10,9	66,4	15,4	18,2	363	350	398	445	7,3

Tabla 6. Valores de los índices de similitud medios (IS) entre los datos hidroquímicos agrupados (1984-1989) y los determinados por modelación utilizando los ficheros de modelos originales; así como los valores de las pendientes de las ecuaciones de regresión lineal correspondientes para cada ion (BCI)

Fichero de Datos	N	IS	HCO ₃	Cl	RCi x 0,001		Ca	Mg	Na+K
					SO ₄				
Efussedi	34	0,894	10,013	1,276	0,393		5,947	1,933	3,802
Ultrabas	13	0,926	10,537	1,253	0,332		0,338	10,296	1,478
Caliza FG	140	0,898	9,764	1,284	0,495		8,465	1,308	1,770
Ancon 2	10	0,883	8,994	1,003	1,148		7,832	1,242	2,071
Caliza FR	27	0,393	9,570	0,912	1,405		8,751	1,005	2,131
RioSanMa	10	0,905	9,501	1,123	1,307		7,919	1,843	2,169

muestra, mediante diagramas de Stiff, la composición determinada por análisis químico en el periodo 1988-1989 (izquierda) y mediante los juegos de ecuaciones o modelos determinados al procesar los datos hidroquímicos del periodo 1984-1987 (derecha), correspondientes a los puntos de muestreo sistemático. Obsérvese la semejanza entre sí de ambas series de diagramas y el valor del IS correspondiente.

En la tabla 5 se exponen las concentraciones iónicas medias en porcentaje de meq/l, de la mineralización

(en mg/l), así como los valores mínimos, medios, máximos y de los coeficientes de correlación correspondientes a las nuevas unidades agrupadas bajo el criterio de la semejanza recíproca de las pendientes de sus ecuaciones de regresión. Las magnitudes de estas pendientes aparecen en la tabla 6.

En la tabla 7 se presentan los valores de los IS medios obtenidos al procesar los ficheros de comprobación (periodo 1988-1989) con los modelos determinados por el procedimiento de

agrupación señalado anteriormente. En todos los casos este valor es superior al 87 %, demostrándose que estos nuevos modelos también son válidos para la caracterización y control de la composición química de las aguas de la cuenca, sobre la base de mediciones de conductividad eléctrica. Dichos modelos corresponden a las aguas que se mueven por: las secuencias efusivo-sedimentarias, las rocas ultrabásicas, las calizas y calcarenitas de los macizos Guajaibón y Sierra Chiquita, las calizas de la Faja Rosario Norte, así

10. Comprobación mediante diagramas de Stiff de la composición química de las aguas del manantial Mil Cumbres, determinada por análisis químico (izquierda) y modelación (derecha). Los datos hidroquímicos corresponden al fichero de comprobación (1988-1989). El fichero del modelo fue creado con los datos originales (1984-1987)

Fichero de datos: cumbre

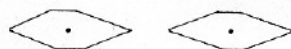
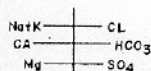
Fichero del modelo: amilcumb

Índice de similitud del fichero = 0,86 453

Diagramas de Stiff

Muestra # 1

Factor de corrección: 1



23-3-1988

IS = 0,920

Muestra # 2

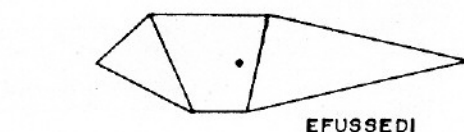
Factor de corrección: 1



16-3-1989

IS = 0,872

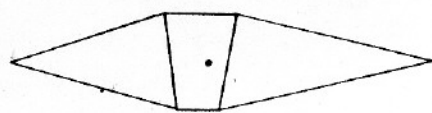
11. Patrones hidrogeoquímicos, representados mediante diagramas de Stiff normalizados (donde las concentraciones iónicas han sido calculadas para un valor de conductividad eléctrica que ofrezca una suma de aniones igual a la de cationes = 11 meq/l)



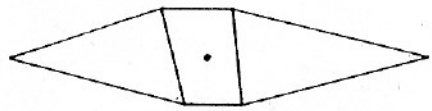
EFUSSEDI



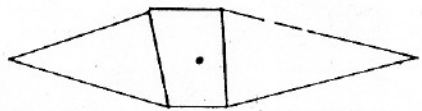
ULTRABAS



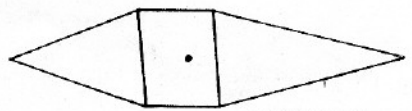
CALIZA FG



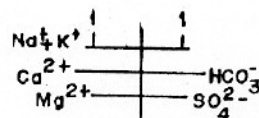
CALIZA FR



CANILLAZ



RIOSANMA



como las aguas de la Resurgencia Ancón II y del río San Marcos.

En la figura 11 se muestran los patrones hidrogeoquímicos expresados mediante diagramas de Stiff normalizados. Los mismos han sido calculados a partir de los juegos de ecuaciones matemáticas seleccionados anteriormente, que correlacionan la concentración iónica con la conductividad eléctrica.

El criterio de agrupación de los datos hidroquímicos sobre la base del IS medio tiene por supuesto, una base subjetiva. Si en lugar de un 87% de similitud media, se hubiese escogido un valor menor, el número de patrones hidrogeoquímicos se podría reducir a tres, por ejemplo, correspondientes a los efusivo-sedimentarios, las ultrabasitas y las calizas, pero en este caso, se perdería en la precisión de los resultados de la modelación.

CONCLUSIONES:

En la cuenca del río San Marcos en la Sierra del Rosario existen diferentes litologías, por las cuales se escurren superficial y subterráneamente aguas cuya composición química refleja las propiedades de las mismas. A lo largo de la cuenca la composición química del principal colector es expresión de los diferentes aportes.

Como consecuencia del régimen de lluvias, las propiedades químico físicas de las aguas superficiales experimentan una gran variación, siendo menor esta variación en las subterráneas. Sin embargo, desde el punto de vista cualitativo todas estas aguas mantienen su tipo hidroquímico. Las que se mueven por los sedimentos efusivo sedimentarios son de tipo bicarbonatadas cálcico-sódicas; las que se mueven por las rocas ultrabásicas serpentinizadas son bicarbonatadas magnesianas y las que se escurren superficial o subterráneamente por los macizos carbonatados son del tipo bicarbonatadas cálcicas. En estas últimas se presentan algunas diferencias en cuanto a la magnitud relativa de los iones SO_4^{2-} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ \text{K}^+$.

Las aguas de la cuenca fueron agrupadas mediante patrones hidroquímicos constituidos por ecuaciones de regresión entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica, ajustadas a partir de datos hidroquímicos correspondientes al período 1984-1987. En todos los casos las ecuaciones de mejor ajuste fueron de tipo lineal, demostrándose que en esta región la

Tabla 7. Valores de los índices de similitud entre los datos reales y los determinados por modelación al correlacionar por SAMA los datos hidroquímicos correspondientes al período 1988-1989 con los ficheros de los modelos creados según los patrones hidrogeoquímicos de la cuenca creados con los datos del período 1984-1989

Fichero de datos	N	Fichero del modelo	IS
SMamey	4	AEFUSSED	0,898
Serpenti	7	ALII TRARA	0,924
RCanilla	11	ACALIZFG	0,886
SurAncon	15	ACALIZFG	0,903
MFernand	6	ACALIZFG	0,903
RAnconII	3	ACALIZA2	0,881
Cumbre	4	ACALIZA2	0,895
RSanMarc	4	ACALIZA2	0,928

litología es el factor dominante en el modo en que estas aguas adquieren su composición química.

Mediante estos patrones o modelos (juegos de ecuaciones de regresión), se comprobó con datos del período 1988-1989, que se puede controlar la composición química de las aguas de

la región en lo sucesivo, mediante simples mediciones de la conductividad eléctrica.

La metodología empleada en este trabajo puede utilizarse en otras áreas donde la litología constituye el factor dominante en el modo de adquisición química de las aguas.

BIBLIOGRAFIA:

- Alvarez, E., Vinardell, I., Fagundo, J. R., Reguera, E., Cardoso, M. E. 1990: "Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales II-Sistema Automatizado para el Monitoreo de las Aguas". Voluntas Hidráulica. En prensa.
- Bakulowicz, M. 1974: "Geochimie des eaux d'aquiferes Karstiques I— Relation entre mineralization et conductivite". Ann Speleol. Vol. 21. No. 2 157-173.
- Brag, L. G. 1977: "Rapid aggressiveness assessment using conductivity." Proceeding of the 7th International Speleological Congress Shiffied, England 1977.
- Drake, J. J., Ford, D. C. 1974: "Hydrochemistry of the Athabasca and North Saskatchewan River and Rocky Mountain in Canada." Water Research Vol. 10. No. 6, 1192-1198.
- Fagundo, J. R. 1985: "Caracterización de acuíferos mediante relaciones entre contenidos iónicos y parámetros químico-físicos. Revista CNIC Ciencias Químicas. Vol. 16, No. 2, 321-325.
- Fagundo, J. R. 1990: "Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales I— estudio mediante simulación química del efecto de la litología." Voluntas Hidráulica. En Prensa.
- Gutiérrez, J., García, J. M., Beato, O. 1974: "Algunas experiencias obtenidas en el estudio de la calidad de las aguas subterráneas empleando hidromuestreadores verticales." Voluntas Hidráulica Vol. XVIII. 43-55.
- Keith Told, D. 1957: "Ground Water Hydrology." John Wiley and Sons New York.
- Markowicz, M., Pulina M. 1979. "Ilósciowa Polomikroanaliza Chemizna Wod w Abszrach Krasu Weglanowego." Uniwersited Slaski Katowice, 167.
- Pszczolkowski, A., Pistrowska, K., Piotrowski, J., De la Torre, A., Myczyński, R., Haczewski, G. 1987: "Contribución a la Geología de la provincia de Pinar del Río". Editorial Científico-Técnica C. Habana. 255 págs.
- Pulina, M., Fagundo, J. R., Valdés, J. J., Rodríguez, J. E., Kozik, A., Leszkiewicz, J., Glowacki, P., Pajón, J. M., Cruz, A. V., García, A. 1984: "The dynamic of the contemporary Karstic processes in tropical area of Cuba. Preliminary report of the field investigations performed by the expedition Guajaibon '84 in the winter season 1984." Univ. Slaski, Sosnowiec. 43 págs.
- Rodríguez, J. E., Fagundo, J. R., Cutié, F., Cruz, C. M., Franco, E., 1989: "Hidrología Cársica del macizo del Pan de Guajaibón. Sierra del Rosario. Año hidrológico noviembre 1984-octubre 1985" Editorial Academia. La Habana. 33 págs.
- Shuster, C., White, W. 1965: "Seasonal fluctuation in the chemistry of limestone springs: a possible mean for the characterizing carbonate aquifers." Journ. Hydrol. Vol. 14, 93-128.
- Stiff, H. A. Jr. 1951: "The interpretation of chemical water analysis by mean of pattern". Journ. Petroleum Technology Vol. 3. No. 10, 15-17.