

CONTRIBUCION AL CONOCIMIENTO HIDRODINAMICO DE LOS SISTEMAS CARSICOS DEL PAN DE GUAJAIBON Y LA MESETA DEL GUASO A PARTIR DE DATOS HIDROQUIMICOS DURANTE LAS CRECIDAS

J.R. Fagundo Castillo¹, J. E. Rodríguez Rubio², J. Vega Feliú¹.

1- Centro Nacional de Investigaciones Científicas del MES. 2- Instituto de Geografía de la ACC

Resumen.- Se presentan los resultados de la caracterización hidrodinámica de regiones cársicas de Cuba (macizo del Pan de Guajabón en la sierras del Rosario, Pinar del Río, y meseta del Guaso en Guantánamo), a partir de las respuestas de los caudales y el quimismo en surgencias durante las crecidas. En las áreas experimentales fueron instalados pluviómetros, limnigrafos y casetas meteorológicas, haciéndose además aforos y mediciones sistemáticas de temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE) y composición química mediante métodos de campo. Los datos fueron procesados con sistemas estadísticos y programas de computación específicos implementados para los objetivos de la investigación. Los resultados fueron analizados mediante un enfoque sistémico, donde la circulación hídrica es abordada a partir de un modelo de caja negra: la función de entrada está constituida por las precipitaciones y la de salida por los caudales, la temperatura, la CE y un grupo de indicadores hidrogeoquímicos. Se encontraron diferencias en las magnitudes y respuestas temporales de las variables, las cuales están relacionadas con las peculiaridades hidrodinámicas de los sistemas estudiados.

INTRODUCCION

El agua en contacto con los distintos minerales constitutivos del medio rocoso por donde transita, adquiere una composición que es característica de la naturaleza del mismo, cuyo análisis pudiera brindar un mayor conocimiento del sistema drenado (Schoeller, 1962; Miserez, 1973; Bakalowicz, 1979; Antigüedad, 1986; Morales, 1991, Freixes, 1991). El proceso de disolución de los carbonatos por las aguas meteóricas da lugar, fundamentalmente, a iones HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} , y sólo en ocasiones a algunas cantidades de CO_3^{2-} . En este proceso el CO_2 originado por la descomposición microbiana de la materia orgánica en el suelo, y a partir de de la atmósfera directamente, en contacto con el agua y los materiales del karst, se hidrata, forma iones complejos y controla además la disociación de los carbonatos. La cinética de las reacciones $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{MeCO}_3$ ($\text{Me} = \text{Ca}^{2+}$ o Mg^{2+}) está determinada por la velocidad de reacción más lenta que corresponde a la interacción de la interfase líquido-sólido.

Durante las precipitaciones, el agua de infiltración ~~conteniendo~~ una cierta cantidad de

CO_2 (que depende de la materia orgánica disponible, las condiciones estructurales del suelo y del grado de desarrollo de la actividad microbiológica del mismo), disolverá más o menos calizas hasta alcanzar el equilibrio. Por tanto, el pH, el contenido de CO_2 , el contenido de los iones que participan en el equilibrio de los carbonatos, la dureza, la mineralización y el grado de saturación de los minerales presentes (calcita y dolomita), brindan una valiosa información sobre las características de la zona de infiltración, el modo de tránsito del agua por el macizo y el tiempo de residencia de esta en el sistema.

Así por ejemplo, un agua insaturada con poco contenido de iones disueltos indica que el tránsito del agua a través del sistema kárstico no ha sido suficientemente largo para que se hayan establecido los equilibrios de los carbonatos. Por el contrario, si el agua está sobresaturada, posee elevados contenidos de iones disueltos, poco CO_2 y altos valores de pH, indica que la misma ha permanecido suficiente tiempo en el interior del karst. No obstante, debe tenerse en cuenta que en ocasiones un alto contenido de iones disueltos pudiera estar asociado a la presencia de rocas con un alto grado de trituración o porosidad, donde es mayor superficie de contacto agua-roca.

En ocasiones, la pérdida de CO_2 en cantidades más o menos grandes provoca la recombinación iónica y precipitación de minerales, alcanzándose la saturación con menor contenido de iones disueltos, lo cual complica la interpretación del régimen de circulación hídrica y el tiempo de tránsito del agua en el sistema.

El comportamiento de los macroconstituyentes del agua no relacionados con los equilibrios de los carbonatos (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , NO_3^- y SiO_2) requiere un análisis particular y complementa la información sobre el comportamiento del sistema.

El ion Cl^- está asociado, fundamentalmente, a las precipitaciones y su contenido depende de la altura y la distancia del punto muestreado al mar; así como del tipo de evento lluvioso. En los procesos de evapotranspiración el contenido de este ion puede sufrir una reconcentración, especialmente en la zona epikárstica (Bakalowicz, 1979). En los pozos ubicados en las llanuras litorales, un alto contenido de Cl^- puede estar asociado a la intrusión salina o los aportes de fuentes contaminantes.

Debido a que el Cl^- y otros iones asociados al ciclo del nitrógeno son aportados desde el exterior del sistema, su evolución temporal en las surgencias permite obtener información sobre las modalidades de infiltración del agua en el mismo y la existencia o no de elementos que favorezcan la homogeneización del quimismo del agua que entra al sistema. Además su correlación con otros elementos pueden ofrecer información sobre el origen del mismo; así como establecer o delimitar zonas de alimentación del sistema (Morales, 1991).

El ion Na^+ puede tener un mismo origen que el Cl^- , aunque debido a la capacidad de intercambio iónico de las arcillas, estas pueden provocar diferencias significativas en las aguas respecto al contenido de aquel. El ion K^+ puede sufrir grandes variaciones como resultado de las labores agrícolas a partir de los fertilizantes y de la capacidad de las raíces de las plantas en absorber este ion.

El contenido de ion SO_4^{2-} en las aguas también pudiera ser aportado por la actividad agrícola, y en ocasiones por la propia industria. En la zona del suelo, las aguas pueden ad-

quirir considerables contenidos de este ión por disolución de sales solubles como yeso o anhidrita. La oxidación de las piritas, comunmente asociadas a los carbonatos, también puede enriquecer el contenido de SO_4^{2-} en el agua.

También los contenidos de SO_4^{2-} y de Cl^- están relacionados con la profundidad del agua. Según Cherbotarev (en Freeze y Cherry, 1980), las aguas varían su composición en profundidad según la siguiente tendencia: HCO_3^- HCO_3^- SO_4 SO_4 HCO_3^- SO_4^{2-} SO_4 Cl^- Cl^- SO_4 Cl^- .

El contenido de NO_3^- en las aguas depende, fundamentalmente, de la actividad antrópica. El SiO_2 , por su parte está asociado a la presencia del silicio, más abundante en las regiones no carbonatadas.

Tal como ha señalado Aminot (1974), una variable hidroquímica tiene validez limitada para fines de caracterización, y una mayor información se obtiene del estudio de la evolución temporal del quimismo de las aguas en las surgencias.

Como la composición química del agua evoluciona en su movimiento a través de los sistemas carbonatados, la información hidroquímica obtenida en puntos de control, fundamentalmente las emergencias, es función además del tiempo de residencia y las condiciones del movimiento del agua. De esta forma, la existencia de homogeneidades o heterogeneidades hidroquímicas está relacionada con la organización del drenaje del sistema.

Mediante muestreos sistemáticos con frecuencia al menos quincenal o mensual, representativos de las diferentes fases hidrodinámicas (crecida, decrecida y agotamiento), algunos investigadores han podido determinar las fluctuaciones diurnas o estacionales del quimismo de las aguas kársticas (Febre, 1983; Bakalowicz, 1979; Antigüedad, 1986; 1988; Freixes et al, 1993, Morales y Antigüedad, 1993), o debido a una crecida ocasional (Bakalowicz, 1979), estableciéndose una metodología para diferenciar el grado de organización y funcionamiento hidrodinámico de los sistemas kársticos a partir de sus respuestas naturales.

De acuerdo a la metodología propuesta por Antigüedad (1988), deben tenerse en cuenta dos aspectos: la magnitud del descenso y el tiempo de recuperación de la conductividad. El descenso de la CE es función de la dilución, una variación grande de la mineralización (conductividad) es consecuencia de la mezcla de aguas donde es importante el aporte de las aguas de infiltración rápida. Una variación pequeña de CE indica falta de dilución, es decir, falta de mezcla importante de las aguas del manto, mas mineralizadas, con las aguas meteóricas. El tiempo de recuperación de la CE es función de la modalidad de infiltración, si este es corto, indica el predominio de las aguas de infiltración rápida sobre las aguas de infiltración retardada. Si el tiempo de recuperación es largo, sucede lo contrario.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de la variación del quimismo del agua de los sistemas kársticos desarrollados en el Pan de Guajaibón y sus alrededores (Sierra del Rosario, Pinar del Río) y la meseta del Guaso (Guantánamo), con vistas a evaluar sus características hidrodinámicas. Fueron tomados como control dos sitios en la primera área experimental: resurgencia Canilla y surgencia Ancón; así como un sitio en la segunda área: resurgencia Campanario.

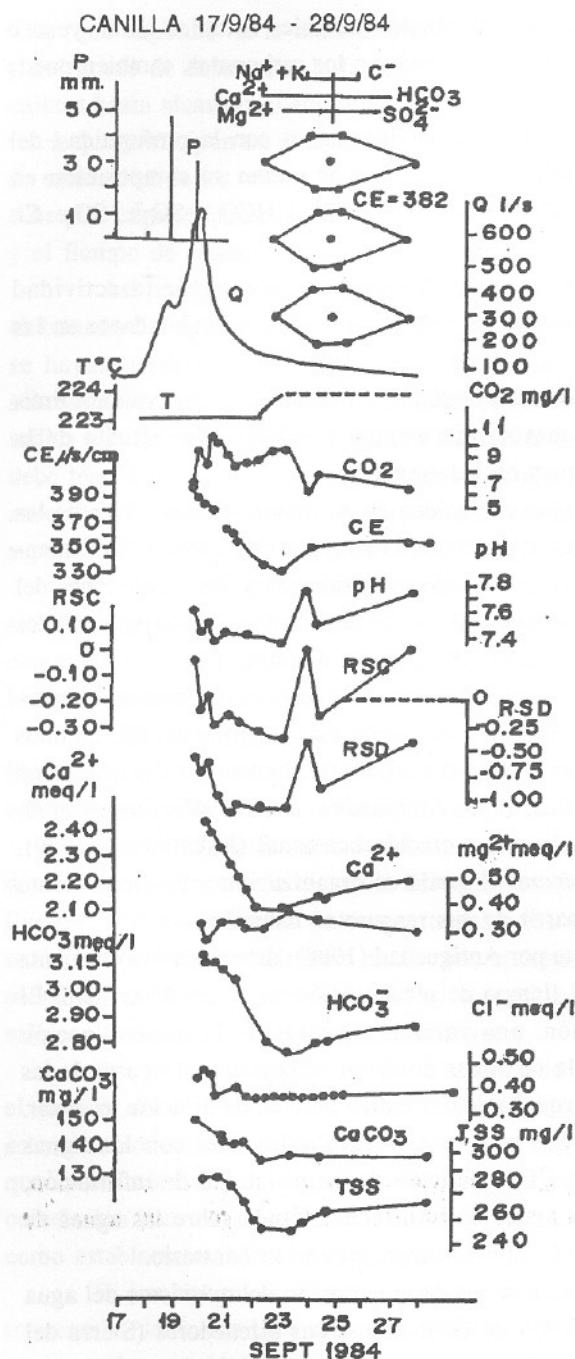


Figura-1. Variación temporal de las precipitaciones, el caudal, la temperatura, la CE y el quimismo de las aguas de la resurgencia Canilla durante una crecida en el mes de septiembre de 1984.

MATERIALES Y METODOS

En el área del Pan de Guajaibón se instaló una red de pluviómetros y pluviógrafos para el control de las lluvias, instalándose además, limnigrafos y casetas meteorológicas con el objetivo de completar el sistema de observación hidrometeorológica (Rodríguez et al, 1989). También se hicieron sistemáticamente, aforos y mediciones de temperatura, pH, conductividad eléctrica y composición química mediante métodos de campo. En el área del Guaso estas mediciones fueron hechas en el curso de una expedición espeleológica búlgaro cubana (Rodríguez, Fagundo y Spassov, 1991).

Las muestras fueron tomadas cada dos o tres horas después de caídas las lluvias, durante las expediciones científicas. Lamentablemente el diseño de los experimentos no fue realizado para los objetivos específicos de la caracterización hidrodinámica, debieron haberse tomado más muestras representativas del período de agotamiento de los caudales.

En este trabajo se emplea una metodología basada en el concepto físico de sistema aplicado a la hidrología kárstica (Mangin, 1975), mediante investigaciones del quimismo del agua. Según esta metodología, la Hidroquímica es un vector de información (Bakalowicz, 1979), el cual es el resultado de una serie de procesos (causa) que tiene lugar en el medio rocoso atravesado. Mediante este enfoque sistémico, se aborda la circulación hídrica a partir de un modelo de caja negra, donde la función de entrada está cons-

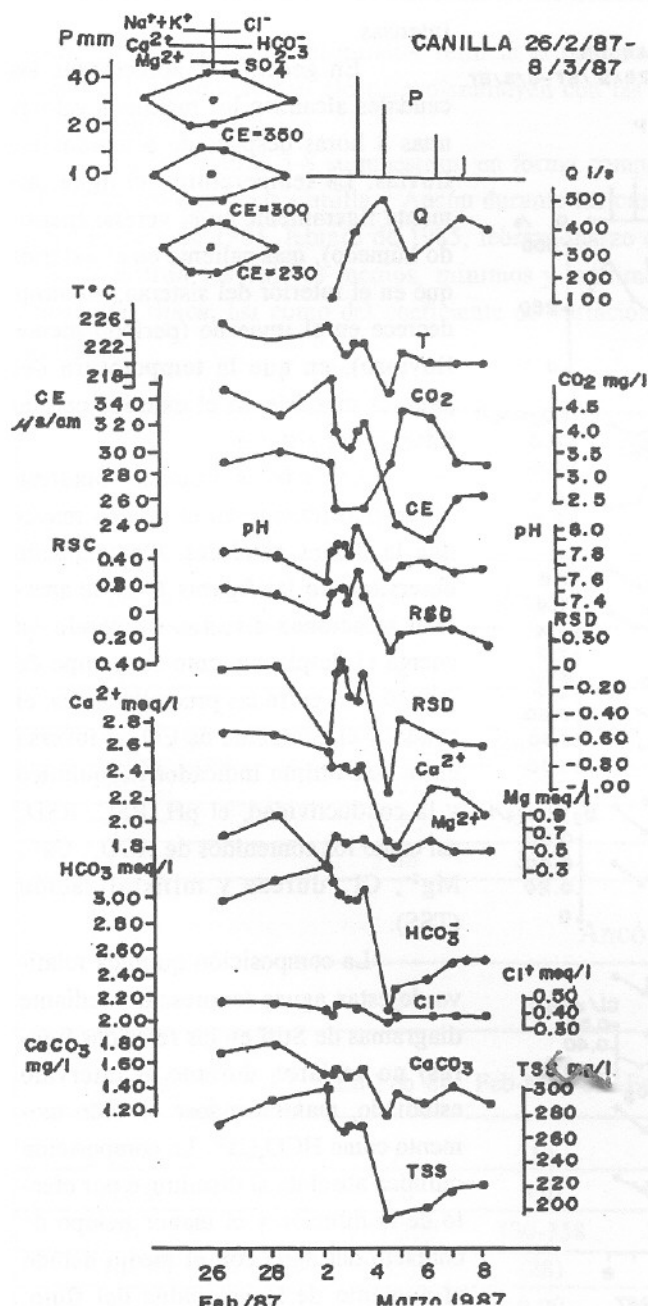


Figura.-2. Variación temporal de las precipitaciones, el caudal, la temperatura, la CE y el quimismo de las aguas de la resurgencia Canilla durante una crecida en el periodo febrero-marzo de 1987.

tituida por las precipitaciones y la de salida, por el caudal, la temperatura y el quimismo del agua en la surgencia. Esta metodología de trabajo ha sido aplicada, fundamentalmente, en sistemas carbonatados con el objetivo de determinar su estructura y grado de organización.

RESULTADOS Y DISCUSION

Análisis de la variación temporal de los indicadores hidroclimáticos y geoquímicos durante las crecidas

En las figuras 1 - 4 se muestran los resultados de los experimentos cinéticos de campo, realizados durante las correspondientes crecidas en la resurgencia Canilla (Figs. 1 y 2) y la surgencia Ancón (Figs. 3 y 4). Las muestras fueron tomadas sistemáticamente después de ocurridas las precipitaciones, con el objetivo de apreciar en forma detallada el efecto de las mismas sobre las respuestas hidrológicas e hidroquímicas. El primero de los experimentos que se realizaron en la resurgencia Canilla, que se muestran en este trabajo, se llevó a cabo en el mes de septiembre de 1984 (periodo lluvioso), y el segundo entre los meses de febrero y marzo de 1987 (periodo menos lluvioso). Los experimentos realizados en la surgencia Ancón corresponden a los meses de febrero-marzo de 1987 y abril de 1989, que aunque pertenecen al denominado periodo menos lluvioso, se caracterizaron por la ocurrencia de lluvias ocasionalmente

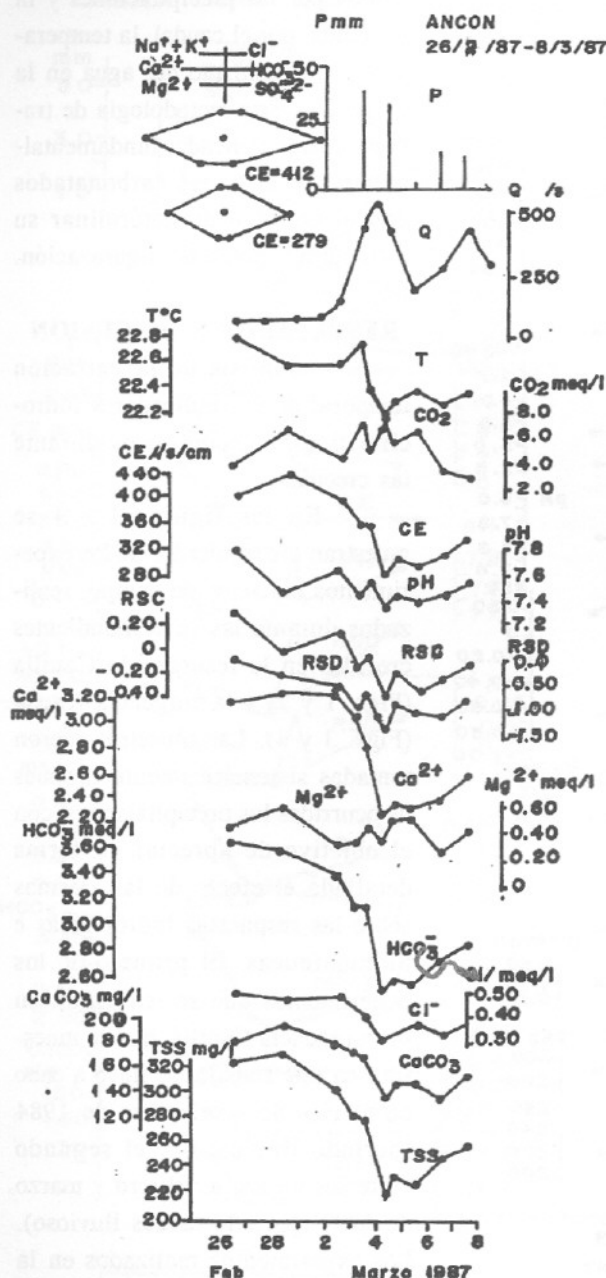


Figura 3-. Variación temporal de las precipitaciones, el caudal, la temperatura, la CE y el quimismo de las aguas de la resurgencia Ancón durante una crecida en el período febrero-marzo de 1987.

intensas.

En general, se aprecia que los caudales alcanzan los máximos valores unas 8 horas después de ocurridas las lluvias. La temperatura del agua aumenta ligeramente en el verano (período húmedo), más caliente en el exterior que en el interior del sistema; mientras decrece en el invierno (período menos lluvioso), en que la temperatura del agua es más fría en el exterior que en interior del sistema).

Las señales químicas muestran un desplazamiento en el tiempo mayor que la de los caudales. Como puede observarse en las figuras 1 - 4 se aprecian relaciones directas (tomando en cuenta el desplazamiento en tiempo de las señales) entre las precipitaciones, el caudal y el contenido de CO_2 , e inversa entre este último indicador geoquímico y la conductividad, el pH, RSC, RSD; así como los contenidos de HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , dureza y mineralización (TSS).

La composición química relativa de estas aguas (expresada mediante diagramas de Stiff en las referidas figuras) no variaron durante el intervalo estudiado, manteniéndose en todo momento como $\text{HCO}_3\text{Ca}^{2+}$. La composición química absoluta sí disminuyó por efecto de la dilución y el menor tiempo de contacto del agua con el medio debido al aumento de la velocidad del flujo. Las aguas al incorporar al sistema cantidades apreciables de CO_2 durante las lluvias, adquieren un pH bajo y se hacen agresivas, comenzando a disolver los minerales carbonatados hasta alcanzar el equilibrio en que se saturan. El

aporte de nuevos flujos insaturados reinicia el proceso de disolución. La mineralización, la dureza y la conductividad eléctrica disminuyen con las lluvias y se incrementan de nuevo al cesar el estímulo exterior.

En las figuras 5-8 se muestran, en forma comparativa, la variación temporal de Q y CE en las exsurgenencias Canilla y Ancón durante las crecidas ocurridas en los meses períodos enero-febrero de 1984, febrero de 1985, febrero-marzo de 1987 y abril de 1989 y en la tabla 1, se muestran los valores medios, mínimos y máximos (magnitud de la variación), de la desviación típica; así como del coeficiente de variación de la CE correspondientes a dichas crecidas.

Canilla					
	1	2	3	4	5
Fecha	En-Feb 84	Sep 84	Feb 85	Feb-Mar 87	Abr 89
N	14	14	25	14	8
CE _m	304	260	306	294	250
CE _{min} -CE _{max}	280-320	240-275	290-320	230-350	200-312
(dCE)	(40)	(35)	(30)	(20)	(102)
S	12.45	10.55	7.27	37.01	4505
CV _{CE}	3.68	3.47	2.42	14.30	18.00
Ancón Guaso					
	6	7	8	9	10
Fecha	En-Feb 84	Feb-Mar 85	Feb-Mar 87	Abr 89	En-Feb 88
N	7	10	12	9	24
CE _m	326	350	315	293	327
CE _{min} -CE _{max}	285-350	330-358	260-375	238-328	245-425
(dCE)	(65)	(28)	(110)	(90)	(180)
S	23.67	9.00	42.55	33.11	38.10
CV _{CE}	7.26	2.57	13.79	10.55	11.12

Tabla 1. Variación de la conductividad eléctrica (mineralización) en la resurgencia Canilla y la surgencia Ancón durante algunas crecidas ocurridas en el período 1984-1989; así como en la resurgencia Campanario (Guaso) en una crecida durante el período enero-febrero de 1988.

ANCON 11/4/89 - 22/4/89

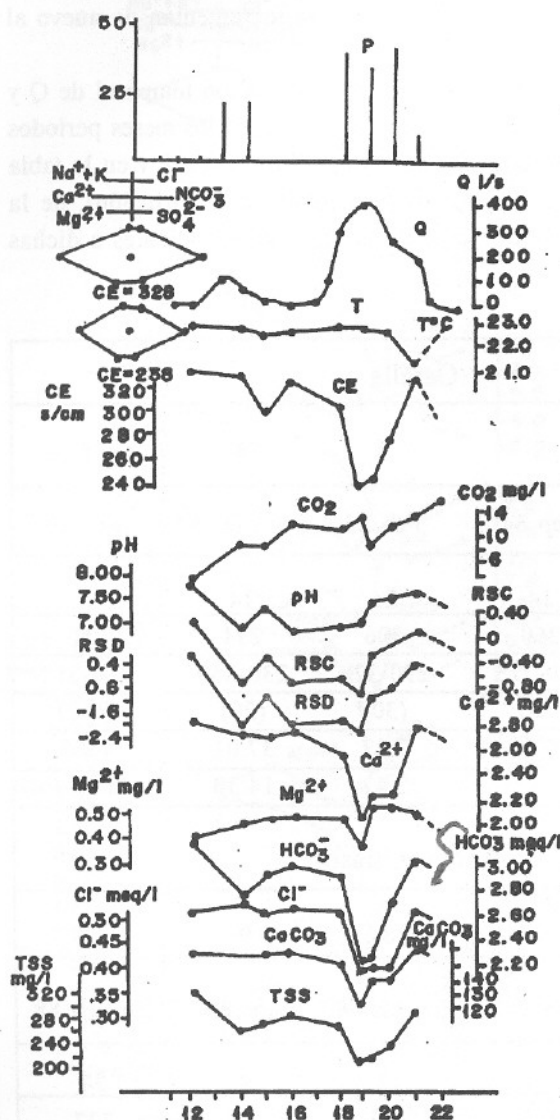


Figura 4.- Variación temporal de las precipitaciones, el caudal, la temperatura, la CE y el quimismo de las aguas de la surgencia Ancón durante una crecida en abril de 1989.

Como puede apreciarse en la tabla 1, los descensos de la CE son, por lo general, mayores en Ancón que en Canilla, lo cual implica una mayor dilución como consecuencia del aporte de las aguas meteóricas en el primer sistema.

En relación a la recuperación de la CE, como se aprecia en las figuras 5-8, esta tiende a ser más lenta en Ancón que en Canilla, lo cual indica un predominio de las aguas de infiltración retardada sobre las aguas de infiltración rápida en el primer sistema, atribuible este hecho al papel que ejercen los sistemas anexos.

El coeficiente de variación de CE en ambos sistemas, en los períodos más lluviosos, es mayor de un 5 %, lo cual, de acuerdo a los criterios de Shuster y White (1971) indica que las aguas se mueven a través de conductos bien desarrollados y no mediante flujos difusos. El más alto valor de dicho estadígrafo en Ancón parece estar relacionado con un mayor grado de karstificación en dicho sistema que en Canilla. En esa dirección también apunta el mayor valor de la conductividad media de Ancón.

El sistema Canilla posee una modalidad de transferencia de flujos alóctonos de largo recorrido (de unos 5 km), desde el punto de pérdida principal hasta la resurgencia, lo que provoca un retardo inicial en la respuesta hidroquímica, en lo que también influye un cierto efecto pistón. Los descensos de la CE por lo general son bastante escasos y tienen una fase de recuperación rápida que,

por lo general, no llega a los valores máximos hasta transcurrido cierto tiempo. Esto apunta hacia la existencia de aportes de aguas de infiltración a partir de un epikarst bien desarrollado en la parte alta del macizo (Rodríguez et al, 1989).

En la resurgencia Ancón en cambio, se observa la influenciade las aguas de infiltración que acceden al sistema a través de pérdidas masivas (Rodríguez et al, 1989), lo que provoca una respuesta hidroquímica más lenta a partir de la inyección de aguas de infiltración rápida cercanas a la emergencia. El descenso de la CE en el sistema Acón resulta significativamente mayor que en Canilla, lo que además del carácter monario de la alimentación, resulta evidente el papel de la infiltración retardada desde bloques más capacitivos hacia los drenes (red transmisiva).

En la figura 9 se ilustra la variación diaria de las precipitaciones, el caudal, la temperatura, la conductividad, la composición química y los valores de RSC y RSD de las aguas de la resurgencia Campanario, meseta del Guaso, en el periodo comprendido entre el 20 de enero y el 6 de febrero de 1988, en ocasión de una crecida ocurrida. En este caso se produjeron lluvias desde 20 mm hasta 60 mm en los días comprendidos entre el 26 y 30 de enero, lo cual produjo un aumento apreciable del caudal a partir del día 27, alcanzando el máximo valor el día 28. A este máximo se relacionan directamente la temperatura y el CO_2 , mientras que en forma inversa la conductividad, la dureza, la mineralización y el resto de de los componentes iónicos, con excepción del Cl^- que experimenta un incremento y el SO_4^{2-} (no experimenta cambios y no se muestra en la figura). Las curvas de CE, HCO_3^- y TSS muestran una recuperación menos inmediata que el resto de las variables. Se debe destacar, además, la presencia de varios picos de menor intensidad que aparecen en todas las señales entre los día 1 y 6 de enero (correspondientes a mediciones con diferentes instrumentos y métodos analíticos).

El descenso de la CE debido a estos aguaceros fue relativamente alto (tabla 1), lo que evidencia un mayor efecto de dilución que en los anteriores sistemas. La recuperación de la CE tiene una forma semejante a Ancón (figura 9), lo que indica una destacada influencia de las aguas de infiltración rápida. El coeficiente de variación de la CE es del orden de 11,1 %.

Todos estos hechos, discutidos en los párrafos anteriores, demuestran que el sistema drenado por esta resurgencia posee un gran desarrollo kárstico, donde ejercen su influencia tanto el drenaje alóctono como el autóctono, incluyendo el sistema epikárstico.

MATRIZ DE CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES

El análisis desde el punto de vista cuantitativo, de la variación del quimismo de las aguas durante las crecidas en todos estos sistemas, puede realizarse a partir de las matrices de correlación correspondientes.

El análisis cuantitativo de la variación del quimismo del agua en la resurgencia Canilla (febrero-marzo de 1987), la surgencia Ancón (febrero-marzo de 1987) y la resurgencia del Guaso (enero- febrero de 1988) durante las crecidas, puede realizarse a partir de la matriz de correlación que se presenta en la tabla 2. En estos ejemplos, donde los tamaños de muestra son $N = 14$, 12 y 24 respectivamente, coeficientes de correlación r superiores a 1.78, 1.81 y 1,72 para los respectivos ejemplos son significativos (a un nivel de significación de 0.05).

a) Resurgencia Canilla

Del análisis de la tabla 2 (a), se deduce que CE correlaciona significativamente en forma directa con el contenido de todos los iones, excepto SO_4^{2-} y Mg^{2+} .

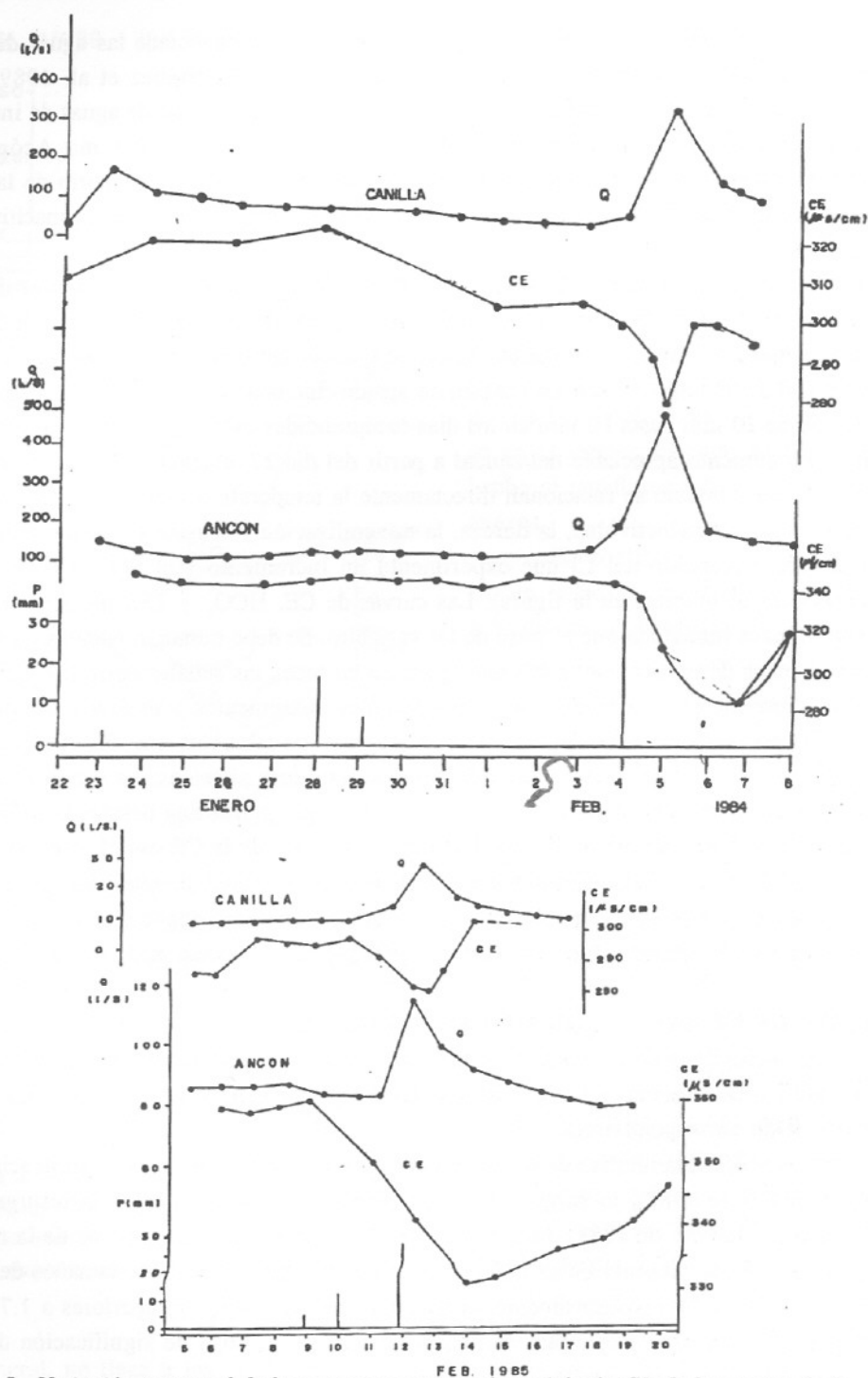


Figura 5.- Variación temporal de las precipitaciones, el caudal y la CE de las aguas de la resurgencia Canilla y la surgencia Ancón durante una crecida en el periodo enero-febrero de 1984.

CANILLA: FEB.-MARZ.1987 (N = 14)

Variable	CE	CO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	TSS
CE	1.00	-0.35	0.98	0.86	0.05	0.94	-0.09	0.64	0.99
CO ₂		1.00	-0.42	-0.26	0.09	-0.30	0.50	-0.51	-0.43
HCO ₃ ⁻			1.00	0.80	-0.08	0.92	-0.14	0.66	0.99
Cl ⁻				1.00	-0.02	0.90	0.09	0.27	0.82
SO ₄ ²⁻					1.00	0.06	-0.44	0.19	0.04
Ca ²⁺						1.00	-0.14	0.40	0.93
Mg ²⁺							1.00	-0.44	-0.21
Na ⁺ +K ⁺								1.00	0.67
TSS									1.00

ANCON: FEB.-MARZ.1987 (N = 10)

Variable	CE	CO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	TSS
CE	1.00	-0.14	0.98	0.93	0.52	0.95	0.46	0.48	0.99
CO ₂		1.00	-0.19	-0.16	0.07	-0.08	0.30	-0.66	-0.18
HCO ₃ ⁻			1.00	0.95	0.37	0.97	0.32	0.57	0.99
Cl ⁻				1.00	0.25	0.95	0.31	0.46	0.94
SO ₄ ²⁻					1.00	0.32	0.83	0.06	0.46
Ca ²⁺						1.00	0.27	0.44	0.96
Mg ²⁺							1.00	-0.32	0.40
Na ⁺ +K ⁺								1.00	0.54
TSS									1.00

ANCON: EN.-FEB.1988 (N = 24)

Variable	CE	CO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	TSS
CE	1.00	-0.26	0.86	0.55	0.00	0.91	0.23	-0.20	0.87
CO ₂		1.00	-0.03	0.10	0.00	-0.05	-0.05	0.05	-0.02
HCO ₃ ⁻			1.00	0.38	0.00	0.86	0.30	0.08	0.99
Cl ⁻				1.00	0.00	0.57	0.02	-0.23	0.43
SO ₄ ²⁻					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca ²⁺						1.00	0.15	-0.37	0.87
Mg ²⁺							1.00	-0.11	0.27
Na ⁺ +K ⁺								1.00	0.08
TSS									1.00

Tabla 2. Matriz de correlación de variables hidroquímicas correspondientes a los datos de la resurgencia Canilla, la surgencia Ancón y resurgencia del Guaso.

En relación a las correlaciones que experimentan los iones entre sí, se observa que correlaciona en forma significativa: HCO₃⁻ con Cl⁻, Ca²⁺ y Na⁺+K⁺.

Los contenidos de HCO₃⁻ son relativamente altos ($X_m = 2,82$ meq/l; $S = 0,37$ meq/l),

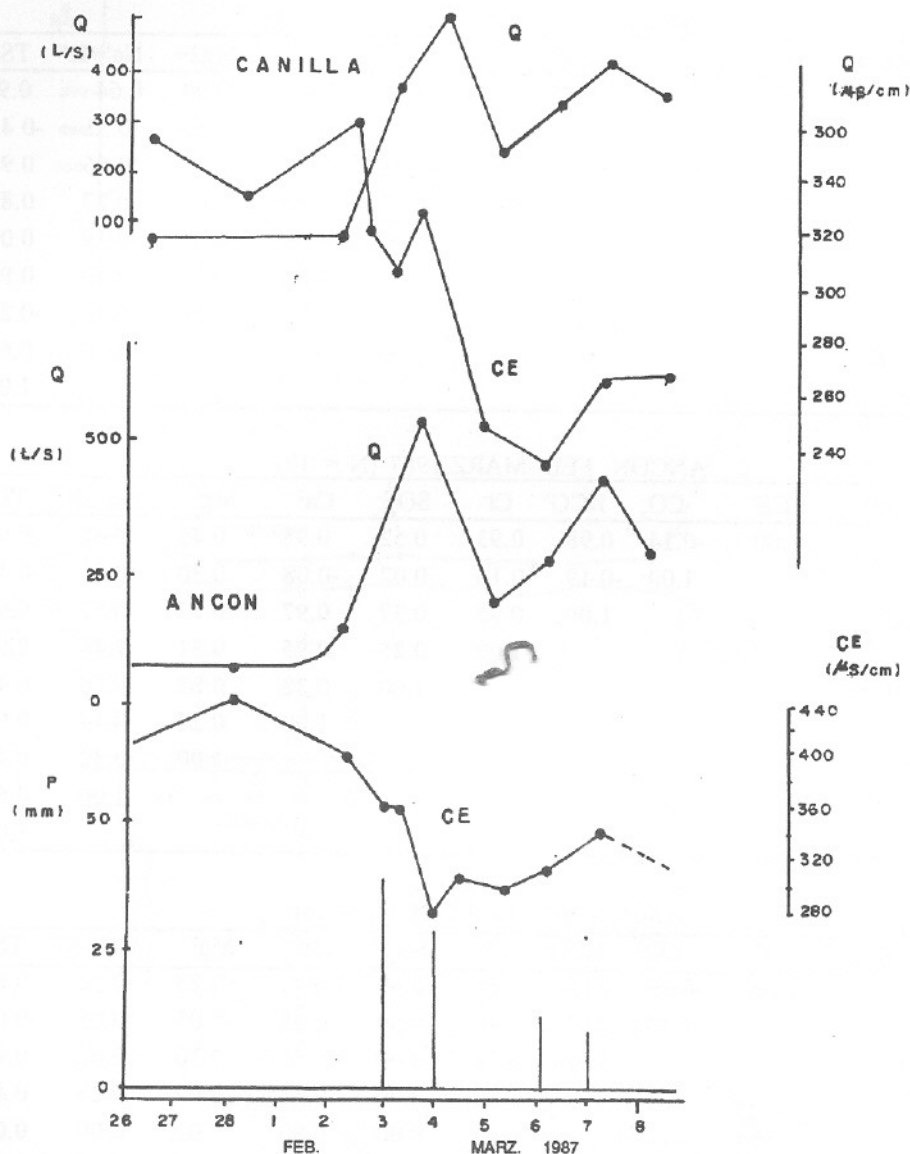


Figura 6.- Variación temporal de las precipitaciones, el caudal y la CE de las aguas de la resurgencia Canilla y la surgencia Ancón durante una crecida en febrero de 1985

al igual que los de Ca^{2+} ($X_m = 2,35 \text{ meq/l}$; $S = 0,28 \text{ meq/l}$).

Los contenidos de Cl^- son mucho más elevados ($X_m = 0,41 \text{ meq/l}$; $S = 0,05 \text{ meq/l}$) que los de la lluvia ($X_m = 0,09 \text{ meq/l}$; $S = 0,05 \text{ meq/l}$), debido a la reconcentración de este en la zona epikárstica y en los suelos exterior al sistema.

El comportamiento del ion SO_4^{2-} ofrece una información menos precisa, debido a sus bajos contenidos en la resurgencia ($X_n = 0,04 \text{ meq/l}$; $S = 0,05 \text{ meq/l}$) y en el agua de lluvia.

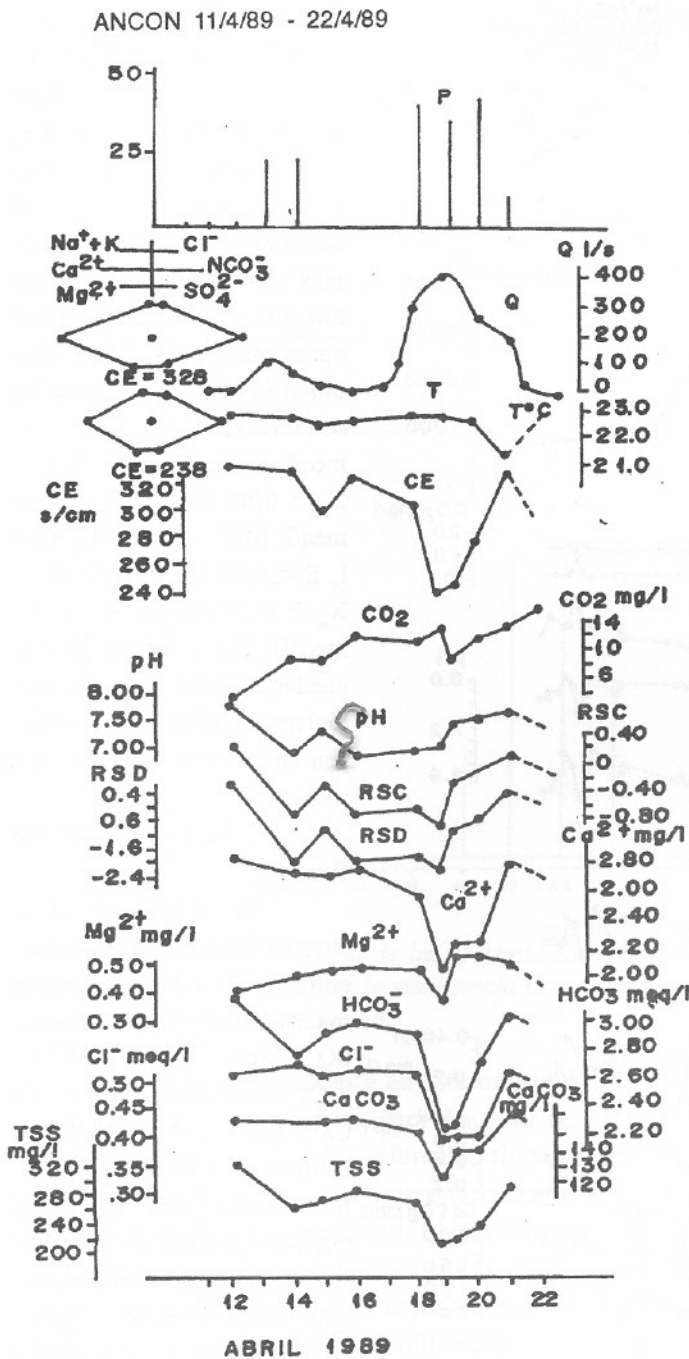


Figura 7-. Variación temporal de las precipitaciones, el caudal y la CE de las aguas de la resurgencia Canilla y la surgencia Ancón durante una crecida en el periodo febrero-marzo de 1987.

La concentración del Mg^{2+} muestra una moderada contribución de las rocas ultra-básicas y los depósitos lateríticos en la resurgencia ($X_m = 0,59$ meq/l; $S = 0,13$ meq/l) y muy bajos contenidos en las lluvias ($X_m = 0,02$ meq/l; $S = 0,00$ meq/l).

Los contenidos de $Na^+ + K^+$ se deben fundamentalmente al primero de los iones, teniendo en cuenta que la contribución del K^+ debido a la actividad agrícola es despreciable en esta región que constituye una reserva de la flora y la fauna. Estos contenidos son algo mayores que los del Cl^- ($X_m = 0,36$ meq/l; $S = 0,20$ meq/l), lo cual pudiera deberse al aporte de las aguas alóctonas que drenan los materiales de origen efusivo-sedimentarios donde este ion posee contenidos relativamente altos.

b) Surgencia Ancón

En la tabla 2 (b) se aprecia que CE correlaciona con las variables hidroquímicas en forma similar a como lo hace la resurgencia Canilla, al igual que las correlaciones que experimenta HCO_3^- con los restantes iones. A diferencia del primer sistema hidrológico, se aprecia en Ancón buena correlación entre SO_4^{2-} y Mg^{2+} . El CO_2 muestra una correlación inversa significativa con Mg^{2+} al igual que en la resurgencia

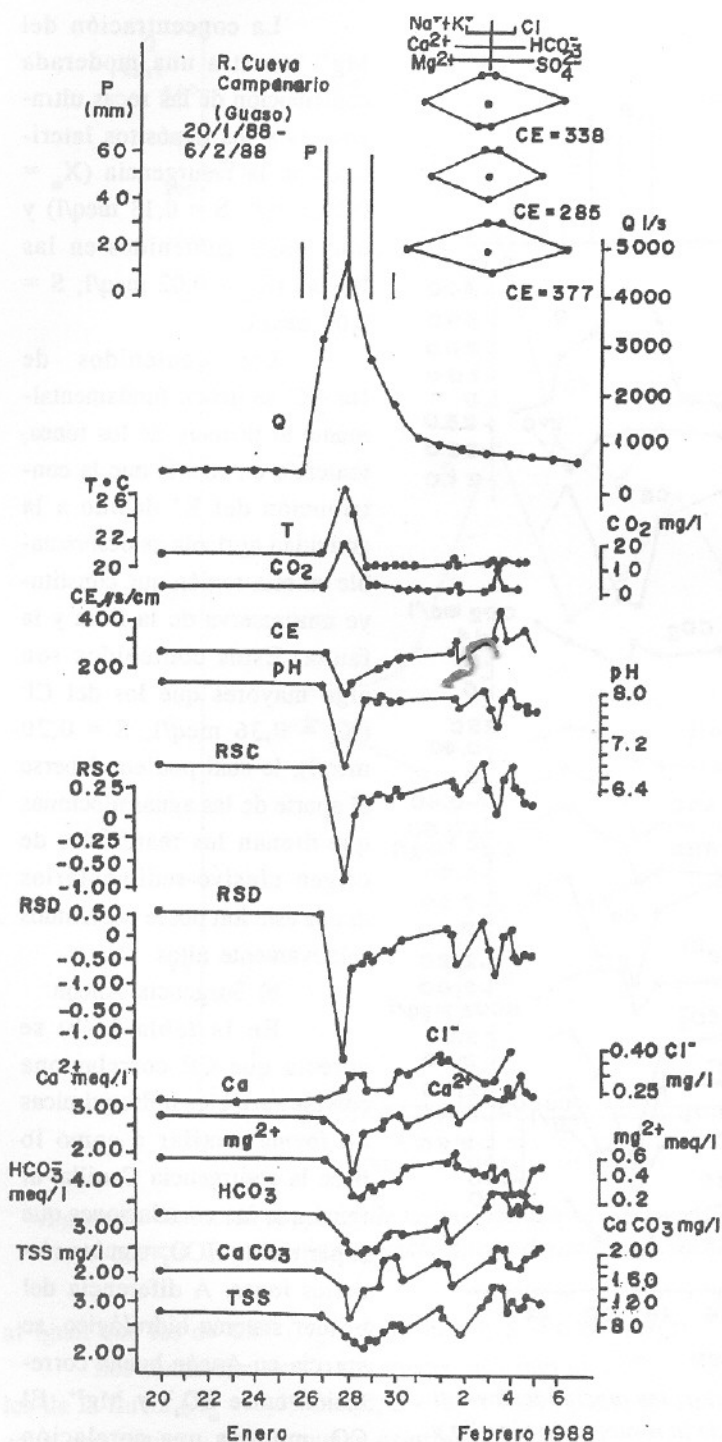


Figura 8.- Variación temporal de las precipitaciones, el caudal y la CE de las aguas de la resurgencia Canilla y la surgencia Ancón durante una crecida en el abril de 1989.

Canilla.

Los contenidos de los iones HCO_3^- ($X_m = 3,03$ meq/l; $S = 0,41$ meq/l) y Ca^{2+} ($X_m = 2,75$ meq/l; $S = 0,38$ meq/l); así como la dureza y la conductividad eléctrica, son más elevados en esta surgencia que en Canilla, siendo aproximadamente del mismo orden la concentración de los restantes iones (Cl^- : $X_m = 0,40$ meq/l, $S = 0,07$ meq/l; SO_4^{2-} : $X_m = 0,08$ meq/l, $S = 0,09$ meq/l; Mg^{2+} : $X_m = 0,48$ meq/l, $S = 0,17$ meq/l; $\text{Na}^+ + \text{K}^+$: $X_m = 0,27$ meq/l, $S = 0,15$ meq/l). Estas diferencias se pueden atribuir a efectos litológicos y texturales que influyen en la solubilidad de estas rocas.

c) Resurgencia del río

Guaso

En la tabla 2 (c) se observa buenas correlaciones entre la CE y los principales macroconstituyentes (excepto SO_4^{2-} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$). HCO_3^- y Cl^- correlacionan bien con Ca^{2+} , mientras $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ correlaciona significativamente en forma inversa con Ca^{2+} , rasgo que los distingue de los anteriores sistemas hidrológicos. Este comportamiento sugiere un aporte significativo tanto de las aguas alóctonas como autóctonas.

CONCLUSIONES

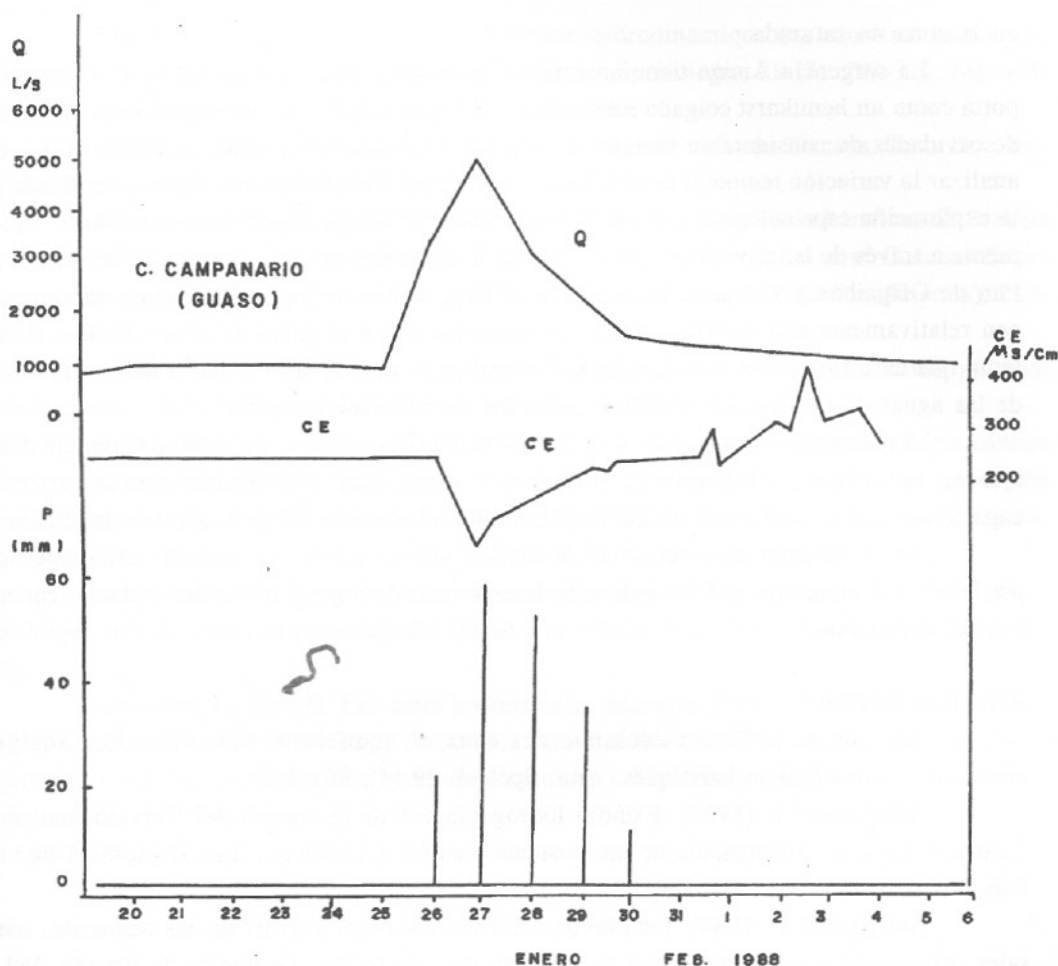


Fig. 9. Variación temporal de las precipitaciones, el caudal, la temperatura, la CE y el quimismo de las aguas de la resurgencia Campanario (Guaso) durante una crecida en el periodo enero-febrero de 1988.

Se pone de manifiesto en este trabajo que la metodología propuesta por los investigadores europeos es eficiente para discernir acerca del grado de desarrollo de los sistemas kársticos y caracterizar los diferentes tipos de emergencias que ocurren en los terrenos carbonatados de Cuba. Fueron caracterizados y comparados, empleando dicha metodología, diferentes karst experimentales de Cuba, encontrándose similitudes y diferencias en cuanto a la estructura, el grado de desarrollo y la naturaleza de los diferentes flujos.

La resurgencia Canilla drena un karst que presenta gran desarrollo, con aportes tanto autóctonos como alóctonos. La infiltración en el sistema se produce de forma rápida, y conjuntamente con los aportes epigeos, sus efectos se manifiestan durante las crecidas a través de respuestas definidas de la conductividad eléctrica, la cual experimenta un descenso relativamente pequeño que pronto se recupera. La poca modulación de la señal descarta la presencia de sistemas anexos importantes en la zona saturada, aunque sí conductos de gran magnitud

en la zona no saturada.

La surgencia Ancón tiene un carácter unimodal de alimentación (alóctono), y se comporta como un hemikarst colgado sobre capas poco permeables; sin embargo, posee un sistema de cavidades de considerable tamaño en la zona no saturada del karst, lo cual se deduce al analizar la variación temporal de señales hidroquímicas e hidrológicas y ha sido verificado por la exploración espeleológica. Las aguas procedentes de las precipitaciones se infiltran rápidamente a través de las cavidades que existen en la depresión elevada que separa las sierras del Pan de Guajabón y Chiquita, pero debido al largo recorrido hipogeo, llegan a la surgencia con relativamente alta mineralización. La recuperación de la curva de conductividad es más lenta que en Canilla y el descenso de la CE mayor, lo cual apunta hacia la mayor influencia de las aguas de infiltración retardada sobre las de infiltración rápida.

La resurgencia Campanario, en la meseta del Guaso, drena un sistema complejo donde ejercen su influencia los aportes alóctonos y autóctonos, incluyendo grandes sistemas capacitivos, en la naturaleza de las respuestas hidrológicas y del quimismo de las aguas.

Los coeficientes de variación de la conductividad, en todos los sistemas estudiados, son por lo general superiores al 5 %, indicando la existencia de flujos a través de conductos cársticos bien desarrollados.

BIBLIOGRAFIA

Aminot A. (1974). *Géochimie des eaux d' aquiferés karstiques Les analyses chimiques en hydrologie karstiques*. Ann. Spéléol. 29 (4), 461-483.

Antigüedad I. (1986). Estudio hidrogeológico de la cuenca del Nervión-Ibaizabal. Contribución a la investigación de los sistemas acuíferos kársticos. Tesis Doctoral. Univ. del País Vasco, 338 pp.

Antigüedad I. (1988). Estudio de acuíferos kársticos a partir de sus respuestas naturales. Aplicación a los sistemas del País Vasco. Rev. de la Soc. Geológica de España. Vol. 1 (1-2), 211-227.

Bakalowicz M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et la karstification. Thèse de Doctorat és Sciences Naturelles, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 269 pp.

Febre J.P (1983). Etude hydrogeologique de la partie sud-ouest du Causse de Martel (Quercy). Thèse 3 Cycle Laboratoire de Geologie- Petrologie. Univ. Paul Sabatier Toulouse, 342 pp.

Freeze P.A. and Cherry J.A. (1980). Groundwater. Ed. Prentice- Hall, Englewood, Cliffs, New York, 604 pp.

Freixes A. (1991). El medio kárstico: de la investigación observacional y experimental a la modelación. Hidrología Subterránea y Migración de Contaminantes. Ed.: A. Correig, 97- 141, 1993.

Freixes A., Monterde M. y Ramoneda J. (1993). Hidrología de los sistemas kársticos del valle de Arán (Pirineo, Catalunya). I Taller Internacional sobre Cuenas Experimentales en el Karst, Matanzas (Cuba) 1992. Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España) 131- 140.

Manguin A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doctorat és Sciences Naturales. Dijon, Annales Spéléologie, 29 (3): 283-332; (4): 495-601; 30 (1): 21-124.

Morales I. (1991). Estudio hidrogeológico de la zona norte de Vizcaya. Tesis Doc. Sci. Geológicas. Univ. País Vasco, 503 pp.

Morales I y Antigüedad I (1993). Diferenciación de tres sistemas kársticos de Bizkaia (País Vasco) a partir del análisis de de sus respuestas naturales. I Taller sore Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas (Cuba) 1992. Ed. Univ. Jaumne I, Castellón (España), 215-231.

Miserez J.J (1973). Géochimie des eaux du karst Jurassien. Contribution phisico-chimique a l'étude des altérations. Thèse Doc. Sci. Nat 313, Neuchatel.

Rodríguez J.E., Fagundo J.R., Cutié, Cruz C. y Franco E. (1989). Hidrología cársica del macizo del Pan de Guajaibón, Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba., durante el año hidrológico Noviembre de 1984 - Octubre de 1985. Monografía. Ed. Academia de Ciencias, 60 pp.

Rodríguez J.E., Fagundo J.R., Spassov K. (1991). Caracterización hidrológica e hidroquímica del carso de la meseta del Guaso (Guantánamo, Cuba). Lapiaz Monografía III,3-21.

Schoeller H. (1962). Les eaux souterraines. Masson, Paris, 642 pp.

Shuster E.T. and White W.B. (1971). Seasonal fluctuation in chemistry of limestone springs: a possible mean for characterising aquifers. J. Hydrology 14: 93-128.