

ESTUDIO DEL DESARROLLO DE LA CARSIFICACION A PARTIR DE LAS RESPUESTAS NATURALES EN LAS EMERGENCIAS

J.R. Fagundo⁽¹⁾, J.E. Rodríguez⁽²⁾, J. Vega⁽¹⁾, G. Benítez⁽¹⁾

1- Centro Nacional de Investigaciones Científicas.

2- Instituto de Geografía Tropical.

Se presentan los resultados de la caracterización hidrodinámica realizada en el macizo del Pan de Guajaibón y sus alrededores (Sierra del Rosario, Pinar del Río).

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 conductividad eléctrica 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, lo cual permitió establecer los tipos de flujos que ocurren por los sistemas cársicos, el grado de desarrollo de los mismos, así como la intensidad de la denudación química.

INTRODUCCION

El estudio geoquímico de las aguas cársicas ha sido abordado por muchos investigadores en relación a los equilibrios químicos del sistema $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$.

El tiempo que media entre la ocurrencia de las precipitaciones y el establecimiento de los equilibrios de los carbonatos en un acuífero cársico, puede ser o no del orden del tránsito de las aguas hasta alcanzar las emergencias, por lo que la composición química de estas aguas puede brindar una valiosa información en relación al sistema drenado. El tipo de flujo y el estado de desarrollo interno del sistema cársico puede ser determinado a partir de una serie de indicadores geoquímicos (temperatura, pH, conductividad eléctrica, contenido de CO_2 , dureza, mineralización (TSS), relaciones de saturación de la calcita y la dolomita), mediante algunos estadígrafos que reflejan la tendencia central (media, mínimo y máximo), grado de dispersión (coeficiente de variación, desviación estándar) y frecuencia de distribución de las magnitudes.

Shuster y White (1971) clasificaron los acuíferos carbonatados sobre la base de la circulación de los flujos en condiciones difusa o en conducto. Este método toma en cuenta las diferencias que se manifiestan en los coeficientes de variación de la temperatura, la dureza; así como las magnitudes de la presión parcial de CO_2 en equilibrio y las relaciones de saturación de la calcita y la dolomita. El mismo ha sido empleado en diferentes países para caracterizar acuíferos cársicos: Herry White (1993); Atkinson (1977), Fagundo y Valdés (1975); Fagundo et al (1981, 1995, 1997). Mediante un enfoque sistémico Mangin (1975) abordó el aspecto de la circulación hídrica del medio cársico. Con una interpretación geoquímica, Bakalowicz (1979) encontró que la distribución de frecuencia de la conductividad eléctrica ofrece información sobre la estructura de los acuíferos, proponiendo una clasificación tipológica de los mismos. El estudio hidrodinámico del carso a partir de las respuestas hidroquímicas en las emergencias ha sido aplicado por muchos carsólogos siguiendo este enfoque: Antigüedad (1988), Freixes et al (1993), Morales y Antigüedad (1993); Fagundo et al (1997).

El objetivo de este trabajo es mostrar las posibilidades que brindan los métodos químicos, conjuntamente con los de tipo hidrológico, para determinar las características y grado de desarrollo de los sistemas cársicos a partir de las respuestas en las emergencias.

Como caso de estudio se tomó el carso desarrollado en el Pan de Guajaibón y sus alrededores, en la Sierra del Rosario, Pinar del Río, donde en el período 1984-1989 se llevaron a cabo investigaciones sistemáticas relacionadas con la génesis y evolución del carso por un colectivo cubano-polaco (Pulina y Fagundo (1992); Rodríguez y Fagundo (1997).

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.

Se tomaron cerca de 400 muestras representativas de los diferentes tipos de flujos que ocurren en la zona estudiada, en unos casos mediante muestreos de tipo esporádico y en otros en forma sistemática en períodos seco y húmedo del intervalo 1984-1999. También se hicieron muestreos en algunos sitios cada dos o tres horas durante las crecidas. Las determinaciones analíticas de CO_2 , y de macrocomponentes se hicieron en el campo mediante las técnicas de Markowicz y Pulina (1979) y

Krawcick (1992). La mineralización fue tomada como total de sólidos solubles (TSS) mediante la suma de iones en mg/l y en función de la CE, mediante la expresión reportada por Markowicz y Pulina (1979) para aguas cársicas.

Los datos hidrológicos e hidroquímicos fueron tratados mediante los sistemas de procesamiento específicos: SAPHID, SAPHIQ, SAMA y BATOMET, implementados para esos objetivos (Vinardel et al, 1993; Alvarez et al, 1990; 1993). Para la caracterización de los diferentes flujos fueron utilizados todos los datos hidroquímicos, a pesar de que algunos tipos hidrológicos no poseían un tamaño de muestra adecuado para su procesamiento estadístico. Para el estudio de la variación estacional se tomaron en cuenta solamente los sitios de muestreo sistemático (Mamey, Canilla, Ancón y Mil Cumbres) con un tamaño de muestra superior a 20. Un estudio particular sobre los cambios químicos durante las crecidas fue realizado en las emergencias Canilla y Ancón, donde se tomaron muestras cada dos o tres horas después de la ocurrencia de las lluvias.

CARACTERISTICAS GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS DE LA REGION

La geología de la Sierra del Rosario ha sido ampliamente descrita en la literatura (Pszczoiowski, 1978; Academia de Ciencias de Cuba, 1988), La intercalación de los carbonatos con los sedimentos impermeables impide el desarrollo de grandes cuencas hidrológicas como sucede en la Sierra de los Organos. El carso más desarrollado es el del tipo cónico (cokpit karst), aunque en algunos sitios como en el Pan de Guajaibón prevalece la morfología de carso de torres o mogotes (tower karst) similar a la de la Sierra de los Organos. Debido a las características estructurales de la Sierra del Rosario, los sistemas carbonatados tienden a comportarse como un carso incompleto (merokarst). No obstante, en las zonas de falla existen manantiales de aguas minerales asociadas al drenaje profundo del carso.

Los estudios hidrológicos que abarcan el análisis del régimen climático local, el balance hídrico y la denudación química ha sido reportada por Rodríguez et al (1989). En esta área existen tres sistemas hidrológicos.

- El sistema Canilla, ocupa la porción N del macizo del Pan de Guajaibón y su cuenca de captación autóctona está integrada por la vertiente N del macizo; así como una zona de alimentación alóctona compuesta por varias corrientes de breve recorrido superficial (arroyos Mamey, La Sed, La Piña, Fluoresceina y otros), las cuales penetran al macizo a través de ponores. A este sistema se encuentran asociadas las cuevas Mamey, Lechuza y Canilla, con más de 8 km de galerías.

- El sistema Ancón, ocupa la porción central del macizo y su cuenca de captación integra la vertiente S de la Sierra del Pan de Guajaibón, la depresión central elevada y la parte centro-occidental de la vertiente N de la Sierra Chiquita. En la depresión central existe una densa serie de dolinas y grietas por donde se infiltran en forma rápida una parte considerable de las aguas que caen sobre el macizo, las que a través de conductos y cavidades emergen por una surgencia después de haber disuelto una cantidad apreciable de roca carbonatada. A este sistema se encuentra asociado la cueva Ancón, con más de 1 km de galerías. El acuífero está limitado por materiales impermeables, constituyendo un merokarst. El arroyo Ancón originado a partir de esta surgencia posee un breve recorrido superficial, pasando a drenar subterráneamente hasta surgir de nuevo por la denominada resurgencia Ancón II y parcialmente por los manantiales Fernando y La Curra, en el valle de San Juan de Sagua.

- El sistema Mil Cumbres, se encuentra situado más al S y sin relación con los sistemas hidrológicos del Pan de Guajaibón. Su emergencia origina el arroyo del mismo nombre, que se caracteriza por presentar un alto contenido de CO₂, que al evaporarse en la emergencia y rápidos y cascadas cercanas ha depositado una abundante cantidad de travertina. A este sistema se encuentra asociado una serie de manantiales de características similares.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la figura 1 se muestra la variación de la temperatura y la CE de las aguas colectadas en los sitios de muestreo sistemático en el período 1984-1989 durante las expediciones de campo. Como puede observarse, el C.V. de la temperatura es del orden del 9 % en el arroyo superficial y menor del 2 % en las aguas subterráneas, En relación al C.V. de la CE, es del 25 % en el sumidero Mamey y de 12,3; 8,5 y 8,8 % en la resurgencia Canilla, la surgencia Ancón y el manantial Mil Cumbres respectivamente, lo cual indica el gran desarrollo cársico de estos sistema.

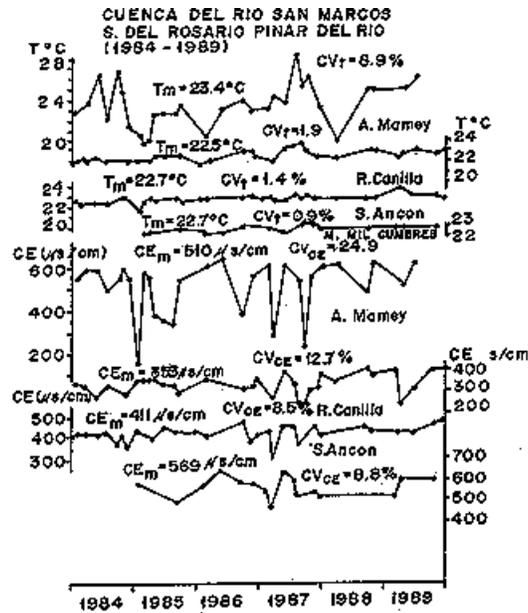


Fig. 1. Variación estacional de la temperatura y la conductividad eléctrica en las aguas del arroyo Mamey, la resurgencia Canilla, la surgencia Ancón y el manantial Mil Cumbres en el período 1984-1989.

La distribución de frecuencia de la conductividad eléctrica (Fig. 2) en todos los casos de tipo plurimodal (evidentemente más acentuada esta modalidad en el arroyos superficial), lo cual de acuerdo al modelo tipológico de Bakalowicz (1979), es también indicativo del alto grado de desarrollo cársico en los sistemas drenados por las emergencias. A pesar de las fluctuaciones estacionales, estas aguas no cambiaron sus patrones hidrogeoquímico en el período estudiado.

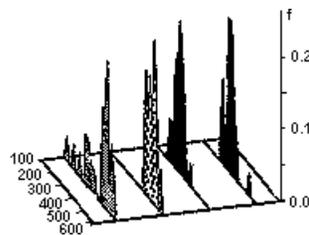


Fig. 2. Distribución de frecuencia de la conductividad eléctrica de las aguas del arroyo Mamey, la resurgencia Canilla, la surgencia Ancón y el manantial Mil Cumbres.

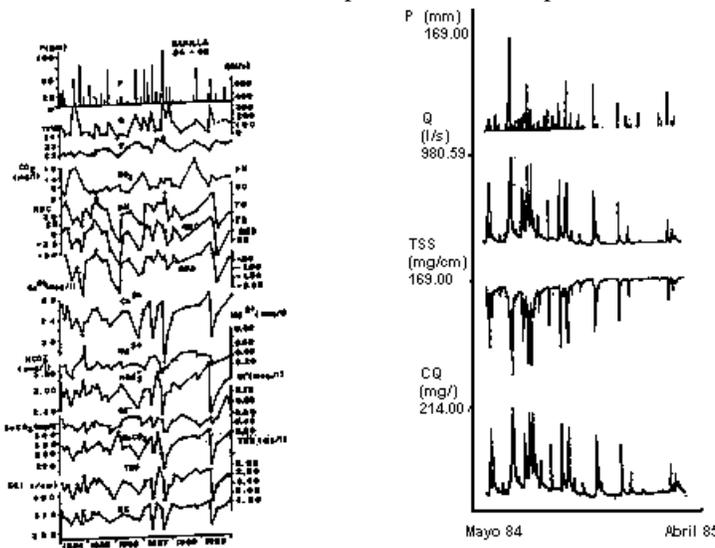
Relaciones entre las precipitaciones, los caudales y el quimismo de las aguas.

En la figura 3 se muestran las relaciones recíprocas entre las precipitaciones (ocurridas en los días inmediatos a la toma de muestra), los caudales y el quimismo de las aguas (T , CO_2 , pH, RSC, RSD, Ca^{+} , Mg^{2+} , HCO_3^{-} , Cl^{-} , $CaCO_3$, TSS y CE) en la resurgencia Canilla durante el período 1984-1989. En general, este sistema se caracteriza por presentar rápidas respuestas hidrológicas e hidroquímicas. Un comportamiento similar fue obtenido durante la crecida.

En general, la dureza decrece con la descarga. Este efecto de dilución se refleja unas horas después de ocurridas las precipitaciones, cuando esta agua es desplazada (efecto pistón) por la que procede del medio epigeo. De esa forma, una muestra tomada en condiciones de avenida puede aún poseer una conductividad eléctrica elevada, mientras otra tomada también cuando el caudal es elevado puede poseer baja conductividad eléctrica.

A partir de los datos pluviométricos, de nivel y de las correspondientes expresiones matemáticas, se puede expresar en forma gráfica las relaciones experimentadas en la resurgencia Canilla durante el período estudiado entre las precipitaciones (en mm), el caudal (l/s), la mineralización (g/l) y el caudal químico (l/s), tal como se ilustra en la figura 4. En la surgencia Ancón los resultados fueron similares.

En general, el régimen de lluvia controla los caudales de estas aguas y la cantidad de minerales disueltos. A pesar de que la relación entre caudal y TSS es inversa, ésta es directa entre caudal y caudal químico, de manera que la cantidad de lluvia caída en el macizo determina la cantidad de masa por unidad de tiempo eliminada del sistema.



3

4

Fig. 3. Relación entre las precipitaciones, el caudal y el quimismo de las aguas (expresado en términos de temperatura, CO₂, pH, RSC, RSD, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, CaCO₃, TSS y CE) de la resurgencia Canilla durante el período 1984-1989.

Fig. 4. Efecto de las precipitaciones sobre el caudal, la mineralización (TSS) y el caudal químico en la resurgencia Canilla durante el período 1984-1989.

Los estudios cuantitativos realizados en el área del Pan de Guajaibón durante el ciclo hidrológico 1984-1989, arrojaron que la intensidad de denudación química es de 40-50 m³/km².año en Canilla y 115-130 m³/km².año en Ancón (Rodríguez, Fagundo y Pulina, 1993). Especialmente los valores de denudación en Ancón, resultan comparables con los más altos registrados en el mundo, aunque desafortunadamente existe muy poca información acerca de localidades de carso tropical. Se ha señalado por diferentes investigadores, el papel determinante que ejercen las precipitaciones en la intensidad de denudación química (Pulina, 1971; Smith y Atkinson, 1976; Garay y Morell, 1989). Los mayores valores de esta magnitud han sido reportados por Maire (1981) en Papua, Nueva Guinea (270-760 m³/km².año) donde las precipitaciones oscilan entre 5700 y 12000 mm/año.

CONCLUSIONES

Mediante el análisis del comportamiento de una serie de indicadores geoquímicos se pueden diferenciar tipos de flujos de distinta naturaleza que ocurren en la región del Pan de Guajaibón y sus alrededores, en la Sierra del Rosario, Pinar del Río.

En cuanto a las emergencias cársicas muestreadas sistemáticamente en el macizo del Pan de Guajaibón se observó lo siguiente:

La resurgencia Canilla drena un carso 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 diferentes indicadores geoquímicos.

La surgencia Ancón tiene un carácter unimodal de alimentación (alóctono), y se comporta como un carso colgado sobre capas poco permeables; sin embargo, posee un sistema de cavidades de considerable tamaño en la zona no saturada del carso, 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 Guajaibón y Chiquita, pero debido al largo recorrido hipogeo, llegan a la surgencia con relativamente alta mineralización.

Los coeficientes de variación de la conductividad, la mineralización y la dureza, en todas las emergencias estudiadas, son por lo general superiores al 5 %, indicando la existencia de flujos a través de conductos cársicos bien desarrollados.

La intensidad de la denudación química es intensa, comparable a la de otros sistemas cársicos tropicales donde las precipitaciones son elevadas,

BIBLIOGRAFIA

- Academia de Ciencias de Cuba (1988). Mapa Geológico de Cuba. Escala 1:250 000.
- Alvarez E., Vinardell I., Fagundo J.R., Rueguera E. y Cardoso M.E. (1990). Control de la calidad de las aguas mediante un sistema automatizado. *Estudios Geológicos (Madrid)*, 46 (5-6): 409-414.
- Alvarez E., Vinardell I., Fagundo J.R. y Rodríguez J.E. (1993). Sistemas para el procesamiento de datos hidroquímicos: SAPHIQ, GEOQUIM, SAMA y BATOMET. Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas 1992. Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 189-194.
- 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.
- Atkinson T.C. (1977). Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Kills., Somerset (Great Britain). *J. Hydrol.*, 35: 93-110.
- Bakalowicz M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux á la connaissance de l'aquifère karstique et la karstification. Thèse de Doctorat és Sciences Naturelles, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 269 pp.
- Fagundo J.R. y Valdés J.J. (1975). Estudio químico-físico del comportamiento de las aguas kársticas de la región de San Antonio de los Baños (La Habana, Cuba) mediante el uso de modelos matemáticos. *Ann. Speleolog*, 30 (4): 643-653, 1975.
- Fagundo J.R. Pajón J.M, Valdés J.J y Rodríguez J.E. (1981). Comportamiento químico-físico de las aguas kársticas en la cuenca del río Cuyaguaje. *Ingeniería Hidráulica* 2 (3): 251-274.
- Fagundo J.R., Rodríguez J.E, Vega J. (1995). Contribución al conocimiento hidrodinámico de los sistemas cársicos del Pan de Guajabón y la Meseta del Guaso a partir de datos hidroquímicos durante las crecidas. En: *El Karst y los acuíferos Kársticos*. Ed. A. Pulido-Bosh, J.R.Fagundo, J.E. Rodríguez, Univ. de Granada (España): 119-135.
- Fagundo J.R., Rodríguez J.E, Ferrera V., González P. (1997). Geoquímica de acuíferos cársicos de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. En: *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*. Ed. D. M. Arellanos, M.A. Gómez Martín, I. Antigüedad. Univ. del País Vascos, (España): 135-149.
- Freixes A., Monterde M. y Ramoneda J. (1993). Hidrología de los sistemas kársticos del valle de Arán (Pirineo, Catalunya). I Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas (Cuba) 1992. Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España) 131- 140.
- Garay P y Morell I. Tasas de disolución en regiones kársticas españolas.(1989). En: *El Karst en España*. Ed. J.J Durán y J. López Martínez. Edigrafos S.A., Madrid: 257-264.
- Gascoyne M. (1978). Hydrogeology and solution chemistry of North Venezuelan Karst. *Bol. Soc. Venezolana Espel*. 9 (17): 5-20.
- Hess J.W. and White W.B. (1993). Groundwater geochemistry of the carbonate karst aquifer, southcentral Kentucky, U.S.A. *Appl. Geochemistry*, 8: 189-204.
- Krawcick W. (1992). Methods of field analytics of water. In: *Hydrochemical methods in dynamic geomorphology*. Scientific Works of Silesian University in Katowice, Katowice (1254): 65-83.
- Maire R. Karst and hydrogeology syntesis. *Spelunca*, Supp. 3, 7-8, 1981.
- Manguin A. (1975). Contribution á l'étude hydrodinamique des aquifères karstiques. Thèse Doctorat és Sciences Naturalles. Dijon, *Annales Spéléologie*, 29 (3): 283-332; (4): 495-601; 30 (1): 21-124.
- Markowicz M. and Pulina M. (1979). Semi-quantitative chemical analyses of the waters in the carboniferous karst areas. *Preace Naukowe Uniw. Slaskiego No 286*, Katowice, 167 pp.
- Morales I y Antigüedad I (1993). Diferenciación de tres sistemas kársticos de Bizkaia (País Vasco) a partir del análisis de sus respuestas naturales. I Taller sore Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas (Cuba) 1992. Ed. Univ. Jaumne I, Castellón (España), 215-231.
- Pszczoiowski A. (1978). Geosynclinal sequences or the Cordillera de Guaniguanico in Western Cuba, their lithostratigraphy, facies development and paleogeography. *Acta Geológica Polonica*, 28 (1): 1-96.
- Pulina M.(1971) Observations of the chemical denudation of some karst areas of Europe and Asia. *Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica* 5: 79-92.

- Pulina M. and Fagundo J.R. (1992). Tropical karst and chemical denudation of western Cuba. *Geographia Polonica* 60: 195-216.
- 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.
- Smith D.I. and Atkinson. Process landforms and climate in limestone regions. In: *Geomorphology and Climate*. E. E. Derbyshire, London-Wiley: 369-409, 1976.
- 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.
- Vinardell I.M., Rodríguez J.E., Fagundo J.J. (1993). SAPHID: Sistema automatizado para el procesamiento de datos hidrológicos. Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas 1992). Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 183-188.