

GEOQUÍMICA DE ACUÍFEROS CÁRSICOS DE LA SIERRA DEL ROSARIO, PINAR DEL RÍO, CUBA

J. R. Fagundo¹, J.E. Rodríguez², V. Ferrera¹, P. González¹

1- Centro Nacional de Investigaciones Científicas del MES

2- Instituto de Geografía del MCTMA

RESUMEN

Cerca de 400 muestras de aguas de diferente naturaleza hidrogeológica procedentes de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba, fueron tomadas en el periodo 1984-1992 y los datos fueron procesados con vistas a relacionar las características hidrogeológicas de esos flujos con sus propiedades geoquímicas. Se encontró que los mismos podían ser caracterizados mediante la composición química relativa y una serie de índices geoquímicos. Los estudios sistemáticos realizados en el Pan de Guajabón y sus alrededores demostraron que la litología y el régimen de lluvia controlan el proceso de adquisición de la composición química en los sistemas cársicos estudiados. En general, estas aguas se hacen agresivas durante los aguaceros y en el proceso de interacción con los carbonatos alcanzan rápidamente las condiciones de saturación, renovándose su capacidad disolvente con la ocurrencia de nuevas precipitaciones, que aunque son comunes en las regiones montañosas de Cuba durante todo el año son más frecuentes en el denominado período húmedo. Las aguas minerales procedentes de la zona de saturación y del drenaje profundo del carso arriban a la superficie con un relativamente alto contenido de minerales y gases disueltos, y debido al escape a la atmósfera de estos últimos, se producen precipitaciones en los bordes de los manantiales y en las cascadas.

Palabras claves: Hidrogeoquímica, caracterización hidroquímica, acuíferos cársicos.

ABSTRACT

During the 1984-1992 period, near of 400 water samples from different hydrogeologic nature were collected at Sierra del Rosario, Pinar del Rio Province. With the aim to establish the relationships between the hydrogeological characteristics of such flow types and their geochemical properties data were processed by means of specific software. With this purpose a set of geochemical indexes were computed. Systematic researches performed on the Pan de Guajabon and its surrounding areas shown that the lithology and the precipitation regime control the chemical acquisition process in the studied karstic system.

Key words: Hydrogeochemistry, hydrochemical characterization, karstic aquifers.

INTRODUCCIÓN

El estudio geoquímico de las aguas cársicas ha sido abordado por muchos investigadores en relación a los equilibrios químicos del sistema $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$. 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 de clasificación toma en cuenta las diferencias que se manifiestan en determinados estadígrafos que reflejan la fluctuación estacional de indicadores geoquímicos tales como los coeficientes de variación (C.V.) de la temperatura y la dureza; así como los valores de la presión parcial de CO_2 en

equilibrio y de las relaciones de saturación de la calcita y la dolomita. Este método ha sido empleado en diferentes países para caracterizar acuíferos carbonatados: Harmon (1971); Miserez (1975); Atkinson (1977), Fagundo y Valdés (1975); Fagundo et al (1981). Si bien aquellas aguas que presentan un C.V. de la dureza inferior al 5 % se consideran que circulan en condiciones de flujo difuso y por encima de ese valor en condiciones de flujo en conducto, algunos investigadores han encontrado resultados que no concuerdan con las evidencias hidrogeológicas (Gascoyne, 1978; Valdés y Fagundo, 1980). En años más recientes este método ha sido reiterado por investigadores anglosajones: Ford y Williams (1989); White (1988); Hess y White (1993). 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 karst a partir de las respuestas hidroquímicas en las emergencias ha sido aplicado por muchos carsólogos siguiendo este enfoque: Antigüedad (1986; 1988), Freixes (1991), Freixes et al (1993), Morales y Antigüedad (1993). Además de los trabajos previamente citados, otras publicaciones reportan los resultados obtenidos en las investigaciones de tipo hidrológico e hidroquímico desarrollados en Cuba, especialmente en la Sierra de los Órganos y en la Sierra del Rosario, pertenecientes a la Cordillera de Guaniguanico: Fagundo et al (1981, 1982; 1986; 1987a,b; 1990; 1991a,b; 1992; 1993); Valdés et al (1981); De la Cruz y Valdés (1984); Rodríguez et al (1989); Rodríguez y Fagundo (1991; 1992; 1993); Franco et al (1987); Pulina et al (1984, 1992); Tys (1992); Abelló et al (1993); Guérón et al (1993). Sin embargo, debido al carácter local de una gran parte de las publicaciones hay poco conocimiento en la comunidad científica de estos resultados.

El objetivo de este trabajo es resumir parte de estos estudios, incluyendo nuevas interpretaciones y aportes de tipo metodológico, los cuales permiten la caracterización de los acuíferos que ocurren en la Sierra del Rosario mediante indicadores geoquímicos.

MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

El 65 % del archipiélago cubano (71 500 Km²) está constituido por rocas carbonatadas con edades desde el Jurásico hasta el Cuaternario, afectadas en mayor o menor grado por el proceso de carsificación. En ellas se alberga el 85 % de las reservas de aguas subterráneas del país, las cuales son utilizadas fundamentalmente para el abasto a la población, la industria y la agricultura.

La cantidad de lluvia y su distribución espacio-temporal ha jugado un rol determinante en el desarrollo del carso tropical de Cuba, al igual que los procesos microbiológicos favorecidos por las altas temperatura y humedad relativa. Otros factores de tipo litológico, hidrológico, geomorfológico y estructural también juegan un papel importante.

En la Cordillera de Guaniguanico, ubicada en la parte más occidental de Cuba, se han desarrollado dos tipos fundamentales de karst: el denominado carso de torres o mogotes en la Sierra de los Organos y el cónico en la Sierra del Rosario, con características hidrodinámicas y geomorfológicas diferentes bajo idénticas condiciones climáticas, lo cual está relacionado con las diferentes características tectónicas y estructurales de estas regiones.

La geología de la Sierra del Rosario ha sido ampliamente descrita en la literatura (Pietrowska, 1978; Pszczoikowski, 1978; Academia de Ciencias de Cuba, 1988), por lo que no será discutida en este trabajo. En general, esta región (Fig. 1) se caracteriza por una

complejidad litológica y estructural a consecuencias del desplazamiento diferencial y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno Medio.

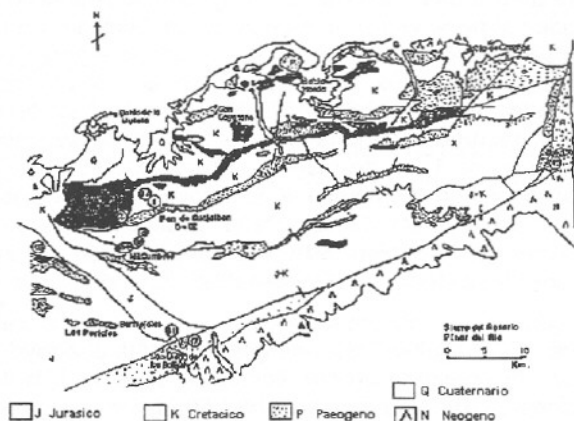


Fig. 1. Mapa hidrogeológico de la Sierra del Rosario donde se señalan los sitios de muestreo.

En la Sierra del Rosario, la intercalación de los carbonatos con los sedimentos impermeables impide el desarrollo de grandes cuencas hidrológicas como sucede en la Sierra de los Órganos. El karst más desarrollado es el del tipo cócnico (cockpit karst), aunque en algunos sitios como en el Pan de Guajaibón prevalece la morfología de karst de torres o mogotes (tower karst) similar a la de la Sierra de los Órganos.

Debido a las características estructurales de la Sierra del Rosario, los sistemas carbonatados tienden a comportarse como un karst incompleto (merokarst). No obstante, en las zonas de falla existen manantiales de aguas minerales asociadas al drenaje profundo del karst.

El curso de la Sierra del Rosario ha sido bien caracterizado a partir de los estudios realizados en el Pan de Guajaibón y sus alrededores, en la cuenca del río San Marcos. Esta región con un área de 155 Km² se encuentra en la vertiente N de la Provincia de Pinar del Río. En esta área se instaló una base experimental con cinco estaciones pluviométricas, dos estaciones limnigráficas, ubicadas estas últimas en las emergencias del macizo (resurgencia Canilla y surgencia Ancón). Además de las mediciones diarias de nivel, se realizaron en estos sitios; así como en el sumidero Mamey y el manantial Mil Cumbres, aforos y muestreos químico-físicos sistemáticos, aproximadamente cada dos meses, en el período 1984-1989. Durante las expediciones llevadas a cabo en los meses de verano e invierno de ese intervalo, se hicieron en Canilla y Ancón, mediciones y análisis químicos cada dos o tres horas después de la ocurrencia de los aguaceros.

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 Guajabón, 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 Guajabón. Su emergencia origina el arroyo del mismo nombre, que se caracteriza por presentar un alto contenido de CO_2 , 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 (Kíquere, Travesaño, etc.) de características similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras representativas de los diferentes tipos de flujos que ocurren en la Sierra del Rosario, en unos casos mediante muestreos de tipo esporádico y en otros en forma sistemática en períodos seco y húmedo del intervalo 1978-1991. También se hicieron muestreos en algunos sitios cada dos o tres horas durante las crecidas. Los flujos estudiados pueden ser clasificados de la forma siguiente:

1) Arroyos superficiales que discurren por rocas impermeables constituidas por sedimentos de tipo efusivo-sedimentario; 2) arroyos superficiales que discurren por rocas ultrabásicas serpentinizadas; 3) arroyos superficiales cársicos de poco caudal; 4) ríos cársicos de gran caudal (colectores principales); 5) manantiales y arroyos de breve recorrido en la zona no saturada del carso; 6) aguas de infiltración en las cuevas; 7) aguas de cueva que constituyen ríos transfluentes; 8) surgencias y resurgencias cársicas; 9) manantiales de la zona saturada de del carso; 10) manantiales cársicos de la zona de saturación profunda; 11) manantiales del drenaje profundo del carso, y 12) manantiales del drenaje profundo no asociados al carso.

La temperatura, el pH, la conductividad eléctrica se hicieron en el campo, al igual que las determinaciones analíticas de CO_2 , H_2S y de macrocomponentes 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; 1991; 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.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización hidroquímica de los diferentes flujos

En las tablas 1 y 2 se presentan los resultados de la caracterización hidroquímica de los diferentes tipos de aguas muestreados en el Pan de Guajabón y otras áreas de la Sierra del Rosario.

Como puede apreciarse, el contenido de H_2S en las aguas tanto superficiales (1-5) como subterráneas someras (6-14) es despreciable, siendo superior a 10 mg/l en las aguas de origen profundo (15-18).

Las aguas superficiales tienden a presentar grandes fluctuacionales en la temperatura, mineralización y dureza. Los C.V. de estos indicadores en todos los casos fueron superiores al 5 % (exceptuando los arroyos del macizo Cajalbana por haberse muestreados en periodos invernales solamente). La temperatura media invernal de estas aguas es baja por lo general (aproximadamente entre 20 y 23 °C). Los contenidos de CO_2 , Cl^- y SO_4^{2-} , al igual que la mineralización y la dureza son bajos. La mineralización más elevada (TSS medio de 412 mg/l) la alcanza el arroyo Mamey (2B), en cuya cuenca afloran sedimentos efusivo-sedimentario junto a carbonatos. Los ríos de gran caudal (4A-4B), colectores principales de las cuencas cársicas, presentan un contenido medio de SO_4^{2-} algo elevado (posiblemente de origen antrópico) en comparación con las restantes corrientes. El pH medio varía entre 7,6 y 8,4, siendo más elevado en las aguas que se mueven por ultrabasitas (2) y carbonatos (3-4) que las que lo hacen por sedimentos de tipo efusivo-sedimentario (1), las cuales poseen pH menores de 7,8. Las corrientes que discurren por los carbonatos y sedimentos vulcanógenos tienden a encontrarse la mayor parte del tiempo sobresaturadas a la calcita y a la dolomita (excepto el arroyo La Sed y las restantes en el periodo inmediato después de un aguacero). Las aguas que se mueven por los macizos serpentinizados se encuentran insaturadas respecto a la calcita y sobresaturadas respecto a la dolomita.

Las aguas de alimentación de los macizos carbonatados (5-6) poseen también elevados C.V. de temperatura, TSS y dureza pero muestran un contenido de CO_2 superior al de las aguas superficiales; así como un pH menos elevado, encontrándose saturadas respecto a la calcita e insaturadas respecto a la dolomita. Las magnitudes de mineralización, dureza y contenidos de Cl^- y SO_4^{2-} ; así como la temperatura media invernal son del orden de las anteriores.

Las aguas muestreadas en las cuevas (7-8) se caracterizan por presentar bajos C.V. de la temperatura pero altos C.V. de TSS y $CaCO_3$ (por encima del 10 %). El pH medio de estas aguas es elevado (7,8-8,1) y su contenido de CO_2 es relativamente bajo. Las mismas se encuentran sobresaturadas respecto a la calcita y tienden a la saturación respecto a la dolomita. El resto de los indicadores geoquímicos se comportan en forma similar a los de las aguas previamente descritas. Dentro de este grupo, las que se infiltran por las grietas y fisuras de los macizos poseen un pH más alto y un contenido de CO_2 menor que las que se toman en corrientes subterráneas dentro de las galerías.

Todas las aguas superficiales reflejan en composición química el medio geológico que drenan: las que discurren por rocas efusivo sedimentarias son del tipo: $HCO_3^-Ca^{2+} > Na^+$, las que discurren por rocas ultrabásicas son del tipo $HCO_3^-Mg^{2+}$, mientras que las que discurren por calizas son del tipo $HCO_3^-Ca^{2+}$. También presentan esta última facie hidroquímica las aguas subterráneas cársicas de las zonas de aireación (5-8), de

saturación (9-14) y de la zona de saturación y circulación profunda de los macizos carbonatados (15-18).

No	N	T _{mi} °C	H ₂ S mg/l	CO ₂ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	TSS mg/l	CaCO ₃ mg/l	CV _t %	CV _{iss} %	V _{CaCO3} %	pH	RSC	RSD	RSY
1A	6	22,6	<10	5,7	19,0	3,0	126	51	4,3	7,8	12,8	7,63	-0,83	-2,02	-3,24
1B	40	23,4	<10	2,8	20,8	9,3	412	181	8,4	24,9	23,6	7,81	0,37	0,42	-2,64
2	14	23,6	<10	1,8	16,1	6,0	305	186	1,8	4,9	6,1	8,41	-0,57	0,56	-3,46
3A	9	23,3	<10	1,4	15,3	7,5	350	193	6,8	12,6	11,2	8,06	0,68	0,60	-2,65
3B	10	22,1	<10	2,9	16,0	15,2	368	203	14,3	21,7	23,9	8,13	0,60	0,59	-2,56
4A	10	23,8	<10	2,8	16,0	25,0	363	194	8,5	7,0	8,9	7,81	0,39	0,36	-2,28
4B	7	20,4	<10	2,1	15,5	32,2	338	200	8,8	4,5	4,5	8,13	0,60	0,59	-2,11
5	15	22,2	<10	9,8	23,0	4,9	389	199	6,3	20,5	23,6	7,60	0,21	-0,18	-2,56
6	8	21,3	<10	12,0	16,8	4,7	396	219	8,0	13,5	15,8	7,60	0,29	-0,15	-2,55
7	26	22,0	<10	1,6	16,8	5,4	247	137	2,5	12,4	14,2	8,11	0,40	0,16	-2,74
8	9	22,1	<10	4,8	18,0	11,2	326	177	3,7	14,4	15,3	7,82	0,34	-0,07	-2,53
9	71	22,5	<10	5,1	15,1	7,8	273	145	2,1	12,3	10,6	7,70	0,07	-0,36	-2,67
10	58	22,7	<10	6,6	15,3	9,0	314	171	1,2	11,9	11,8	7,64	0,16	-0,35	-2,67
11	12	23,2	<10	13,5	15,0	19,6	344	185	2,8	8,4	6,5	7,35	-0,08	-0,76	-2,34
12	5	22,7	<10	16,1	17,1	6,3	321	183	1,3	4,4	4,4	7,35	-0,15	-0,90	-2,23
13	21	22,7	<10	16,8	17,1	36,9	430	231	1,2	11,3	10,5	7,40	0,13	-0,54	-1,99
14	6	23,8	<10	42,6	15,7	24,3	479	256	4,8	7,6	7,3	7,22	0,08	-0,57	-2,44
15	14	23,9	>10	79,3	46,8	44,3	724	385	3,8	1,7	2,0	7,17	0,28	0,05	-1,84
16	6	23,9	>10	50,5	45,6	53,8	974	161	0,3	2,3	2,0	7,25	-0,21	-0,20	-2,37
17	12	30,0	>10	37,4	44,5	171	2774	1685	0,1	2,5	0,6	7,03	0,22	-0,13	-0,06
18	6	26,3	>10	195	10,6	18,1	1452	505	1,2	8,8	9,0	7,00	0,13	0,61	-2,92

1- Arroyos superficiales que discurren por efusivos-sedimentarios con poca mineralización (1A- arroyo La Sed) y alta mineralización (1B- Mamey, La Piña y Fluorsceina); 2- arroyos superficiales que discurren por ultrabasitas; 3- arroyos superficiales que discurren por terrenos calcáreos (3A-Ancón y Fernando) de la cuenca del río San Marcos y en la vertiente N (3B- río del Medio y otros); 4- ríos cársicos de gran caudal: ríos de la vertiente N (4A- San Marcos) y de la vertiente S (4B- San Diego, Bacunagua y Taco-Taco); 5- arroyos de breve recorrido en la zona de alimentación del macizo del Pande Guajabón; 6- manantiales de la misma zona de alimentación; 7- aguas de infiltración en las cuevas; 8- aguas muestreadas en las cuevas correspondientes a ríos transfluentes; 9- resurgencia Canilla; 10- surgencia Ancón; 11- resurgencia Ancón II; 12- manantial Fernando; 13- manantial Mil Cubres; 14- manantiales en la zona de Mil Cumbres (Kiquere, Travesaño); 15- manantiales en la zona de Cayajabo (Pastora y Pedernales); 16- Manantial Azufre de Mil Cumbres; 17- Manantial Gallina (San Diego); 18- Poso el Sitio.

Tabla 1. Valores medios de la temperatura invernal, los contenidos de H₂S, Cl⁻, SO₄²⁻, mineralización (TSS), dureza (CaCO₃), pH y relaciones de saturación de la calcita (RSC), la dolomita (RSD) y el yeso (RSY); así como las desviaciones estándar de la temperatura, TSS y CaCO₃, de aguas de diferente naturaleza hidrogeológica en la Sierra del Rosario.

Las aguas muestreadas en surgencias y resurgencias cársicas (9-11) poseen un comportamiento geoquímico similar a las corrientes subterráneas muestreadas dentro de las cuevas, pero con valores de CO₂ más elevados y pH más bajos (7,3-7,7). Estas aguas tienden a la saturación respecto a la calcita y a la insaturación respecto a la dolomita.

Las aguas de los manantiales someros muestreados en la zona de saturación de los macizos carbonatados (12-14) muestran valores de los C.V. de temperatura bajos y de TSS y CaCO₃ menores que los de las aguas descritas anteriormente. La mineralización y la dureza de estas aguas son también superiores. Presentan un contenido de CO₂ superior a 16 mg/l y un pH relativamente bajo (7,2-7,4). Se encuentran cercanas a la saturación de la calcita e insaturadas a la dolomita.

Las aguas de los manantiales procedentes de la zona de saturación y circulación profunda del carso, que ascienden a la superficie en virtud del agrietamiento en zonas de falla (15), presentan por lo general bajos valores de C.V. de la temperatura, TSS y dureza (menores del 5 %); así como altos contenidos de CO_2 (superiores a 30 mg/l) y bajos valores de pH (7,0-7,3). Tienden a la sobresaturación respecto a la calcita y la saturación respecto a la dolomita. Muestran temperaturas medias invernales superiores (cerca de 24 °C) al resto de las aguas descritas. El contenido de Cl^- es alto, más del doble del de las aguas meteóricas (superficiales y sub superficiales).

No	Concentración iónica (% meq/l)						$\text{CE}_{25}(\mu\text{S}/\text{cm})$			
	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ \text{K}^+$	Min	Med	Max	C.V.
1A	76,6	18,6	4,8	46,1	15,0	38,9	114	169	213	18,3
1B	85,2	11,3	3,5	51,7	15,9	32,4	157	510	639	24,1
2	86,4	10,6	3,0	2,8	84,5	12,7	286	400	511	14,8
3A	85,3	11,1	3,6	76,1	10,1	13,8	391	414	454	4,8
3B	83,6	9,8	6,6	63,8	20,4	15,8	319	443	645	21,7
4A	79,6	9,5	10,9	66,3	15,4	18,3	413	481	542	8,1
4B	75,1	9,9	15,0	77,8	11,9	10,3	356	441	527	13,2
5	85,1	12,9	2,0	68,0	10,9	21,1	260	499	795	28,4
6	88,8	9,2	2,0	75,8	10,2	14,0	384	501	669	17,2
7	81,8	14,8	3,4	74,2	11,0	14,8	202	322	430	17,7
8	82,5	12,1	5,4	75,2	8,5	16,3	363	423	520	11,8
9	83,4	12,1	4,5	68,5	13,5	18,0	248	356	437	11,2
10	84,7	10,6	4,7	74,6	10,1	15,3	279	406	611	11,8
11	81,4	9,4	9,2	71,1	11,6	17,3	367	446	522	9,9
12	85,3	11,6	3,1	76,0	12,7	11,3	396	417	457	5,0
13	77,6	8,6	13,8	74,8	8,0	17,2	363	570	657	12,1
14	88,5	7,2	8,3	74,3	8,9	16,8	534	613	687	9,3
15	76,6	13,9	9,5	67,8	12,7	19,5	813	940	1064	7,1
16	80,6	10,4	9,0	14,6	11,3	74,1	1147	1181	1225	2,8
17	8,7	3,1	88,2	70,1	13,0	16,9	4729	4902	5104	2,2
18	96,9	1,6	1,5	24,9	30,3	44,8	1303	1659	2192	23,2

1- Arroyos superficiales que discurren por efusivos-sedimentarios con poca mineralización (1A- arroyo La Sed) y alta mineralización (1B- Mamey, La Piña y Fluoresceína); 2- arroyos superficiales que discurren por terrenos calcáreos (3A-Ancón y Fernando) de la cuenca del río San Marcos y en la vertiente N (3B- río del Medio y otros); 4- ríos cársicos de gran caudal: ríos de la vertiente N (4A- San Marcos) y de la vertiente S (4B- San Diego, Bacunagua y Taco-Taco); 5- arroyos de breve recorrido en la zona de alimentación del macizo del Pan de Guajabón; 6- manantiales de la misma zona de alimentación; 7- aguas de infiltración en las cuevas; 8- aguas muestreadas en las cuevas correspondientes a ríos transfluentes; 9- resurgencia Canilla; 10- surgencia Ancón; 11- resurgencia Ancón II; 12- manantial Fernando; 13- manantial Mil Cubres; 14- manantiales en la zona de Mil Cumbres (Kíquere, Travesaño); 15- manantiales en la zona de Cayajabo (Pastora y Pedernales); 16- Manantial Azufre de Mil Cumbres; 17- Manantial Gallina (San Diego); 18- Poso el Sitio.

Tabla 2. Valores medios de la composición química relativa y valores mínimos, medios y máximos; así del coeficiente de variación de la conductividad eléctrica de las aguas del Pan de Guajabón y áreas aledañas en la Sierra del Rosario.

Los manantiales minerales de origen profundo cuya cuenca de alimentación es de tipo carbonatada (16-17), no reflejan en su quimismo la composición litológica del material acuífero. Son aguas del tipo $\text{HCO}_3^- \text{Na}^+$ (16) y $\text{SO}_4^{2-} \text{Ca}^{2+}$ (17). Poseen una temperatura media invernal alta con coeficientes de variación bajos. Los C.V. de TSS y CaCO_3 son también bajos. Se caracterizan además por presentar altos contenidos de CO_2 (por encima de 50 mg/l); pH bajos (6,7-7,2); altos contenidos de Cl^- , semejante al de las aguas anteriores; muy altos contenidos de SO_4^{2-} ; elevada mineralización y dureza, exceptuando las aguas del tipo bicarbonatadas sódicas (16). Las aguas del manantial Azufre de Mil

Cumbres (16) tiende a la insaturación con respecto a la calcita y la dolomita, mientras las del manantial Gallina (17) se encuentran saturadas respecto a la calcita e insaturadas respecto a la dolomita.

El último sitio de muestreo, es representativo de un agua procedente de un horizonte acuífero profundo de carácter confinado, cuya zona de alimentación está desarrollado en rocas ultrabásicas (18). El drenaje es a través de grietas y las aguas emergen al exterior a través de un pozo artesiano perforado en estos materiales. Sus aguas del tipo $\text{HCO}_3^- \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, se caracterizan por presentar temperaturas altas con C.V. bajos; elevados contenidos de CO_2 (por encima de los 100 mg/l), mineralización y dureza; aunque con altos valores de los correspondientes C.V., debido posiblemente a los cambios químicos producidos en estas aguas por el escape de los gases disueltos. Presentan bajo pH (7,0) y se encuentran saturadas respecto a la calcita y sobresaturada respecto a la dolomita. Son bajos tanto el contenido de Cl^- como de SO_4^{2-} .

Con relación al yeso todas las aguas estudiadas se encuentran insaturadas, aunque se observa una tendencia a la saturación en aquellas del tipo $\text{SO}_4^{2-} \text{Ca}^{2+}$, una menor insaturación en las que poseen un relativamente alto contenido de SO_4^{2-} y una elevada insaturación en las de poco contenido de este ion.

En la figura 2 se representa en forma esquemática la forma en que circulan los diferentes tipos de flujos estudiados en la Sierra del Rosario, ilustrándose además las superficies de agua y aire que aproximadamente poseen los mismos en las diferentes condiciones de movimiento. El CO_2 como todo gas tiende a repartirse en mayor proporción en el aire que en el agua, por lo que en las aguas subterráneas profundas con poca capa de aire poseerán el máximo contenido de CO_2 (pH más bajos) y las superficiales los mínimos contenidos de este gas (pH más altos).

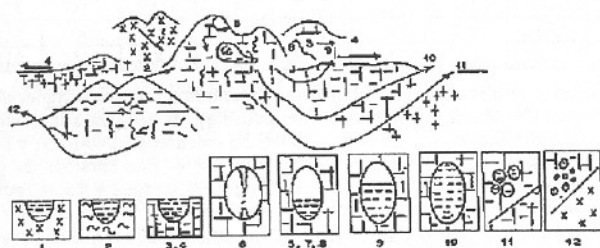


Fig.2. Esquema representativo de la circulación de los diferentes tipos de flujos estudiados en la Sierra del Rosario.

En general, los resultados discutidos anteriormente concuerdan con este modelo conceptual y como consecuencia de las regularidades entre el pH, la dureza y el grado de saturación de las aguas a una determinada temperatura, la curva de Tillman- Trombe puede servir también como herramienta para clasificar los diferentes flujos, tal como se indica en la figura 3. En general los diferentes tipos de aguas quedan distribuidas por grupos discretos en relación a las isotermas de saturación y los valores de pH y CaCO_3 de los mismos.

Variación estacional de los parámetros hidroquímicos

En la tabla 3 se presentan los valores medios y las desviaciones estándar de la temperatura, pH, contenido de CO_2 , dureza y de los valores de RSC, RSD y RSY. Aparentemente, las aguas superficiales (Mamey) y subterráneas estudiadas (Canilla,

Ancón y Mil Cumbres) tienden en el verano a poseer contenidos medios superiores y consecuentemente valores de pH inferiores a los del invierno; así como a encontrarse más insaturadas (o menos sobresaturadas) en verano, aunque estas diferencias en muchos casos no son significativas.

Sin embargo, las precipitaciones si son por lo general más del doble en el verano que en el invierno (Tab. 4), por lo que el caudal químico que es el producto del caudal por la mineralización, y representa los g/s de masas evolucionada del sistema cársico, es mucho mayor en los meses más lluviosos del verano.

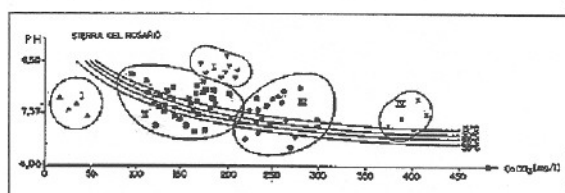


Fig. 3. Diagrama de Tillam-Trombe donde se aprecia la posición que ocupa los principales tipos de aguas estudiados en la Sierra del Rosario: 1a- arroyos superficiales de baja mineralización que discurren por efusivos-sedimentarios; 1b- arroyos que discurren por ultrabasitas; 2- resurgencias y surgencias cársicas; 3- manantiales de la zona de saturación y circulación profunda, y 4- manantiales de la zona profunda del carso.

Sitio	Estación	N	T	DS	CO ₂	DS	pH	DS	TSS	DS
1	Invierno	17	22,0	1,5	2,6	1,7	7,85	0,50	403	110
	Verano	18	24,6*	1,6	3,4	1,7	7,74	0,28	404	95,2
2	Invierno	41	22,3	0,3	4,0	2,3	7,76	0,20	270	31,3
	Verano	32	22,7*	0,5	6,6*	2,3	7,61*	0,17	276	33,4
3	Invierno	36	22,6	0,3	5,5	3,6	7,68	0,27	302	42,9
	Verano	22	22,7	0,2	8,2*	2,7	7,57*	0,15	325*	23,1
4	Invierno	12	22,6	0,2	18,1	15,8	7,44	0,35	431	34,6
	Verano	9	22,8	0,3	15,1	4,6	7,36	0,34	329	62,2

Sitio	Estación	CaCO ₃	DS	RSC	DS	RSD	DS	RSY	DS
0		3							
1	Invierno	178	43,8	0,36	0,78	0,42	0,49	-2,86	0,49
	Verano	175	40,2	0,30	0,39	0,29	0,78	-2,52	0,50
2	Invierno	148	13,1	0,14	0,22	-0,23	0,42	-2,75	0,50
	Verano	143	16,1	-0,02*	0,20	-0,54*	0,40	-2,57	0,30
3	Invierno	176	21,0	0,19	0,30	-0,27	0,54	-2,67	0,42
	Verano	168	17,7	0,10	0,14	-0,48	0,24	-2,67	0,30
4	Invierno	237	12,5	0,19	0,34	-0,49	0,89	-2,00	0,20
	Verano	223	32,4	0,05	0,18	-0,61	0,78	-0,97	0,32

Sitio: 1-Sumidero Mamey; 2- Resurgencia Canilla; 3- Surgencia Ancón; 4- Manantial Mil Cumbres

* - Diferencias significativas a un nivel de significación de 0,05

Tabla 3. Valores medios y desviaciones estándar de algunos indicadores geoquímicos, de las aguas del arroyo Mamey, la resurgencia Canilla, la surgencia Ancón y el manantial Mil Cumbres muestreadas en los meses de invierno y verano del período 1984-1989.

En la figura 4 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.

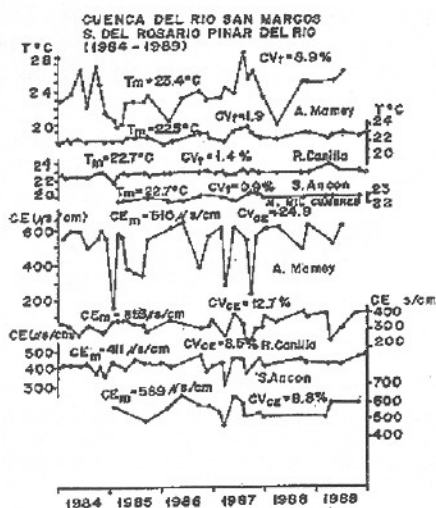


Fig. 4. Variación estacional de la temperatura y la conductividad eléctrica en las aguas del arroyo Mamey, la resurgencia Canilla, la surgencia Ancón y el manantial Mil Cumbres en el período 1984-1989.

La distribución de frecuencia de la CE (Fig. 5) 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 periodo estudiado.

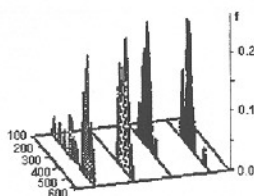


Fig 5. Distribución de frecuencia de la conductividad eléctrica de las aguas del arroyo Mamey, la resurgencia Canilla, la surgencia Ancón y el manantial Mil Cumbres.

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

En la figura 6 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^{2+} , 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.

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 CE elevada, mientras otra tomada también cuando el caudal es elevado puede poseer baja CE.

A partir de los datos pluviométricos, de nivel y de las anteriores expresiones matemáticas, se puede expresar en forma gráfica las relaciones experimentadas en la resurgencia Canilla durante el período estudiado 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 7. 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.

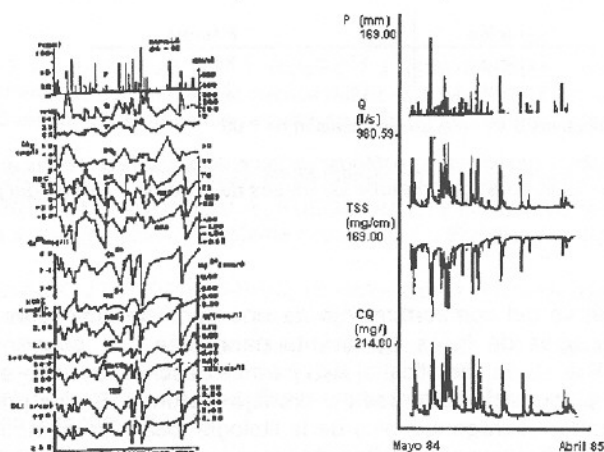


Fig. 6 (izquierda). Relación entre las precipitaciones, el caudal y el quimismo de las aguas (expresado en términos de temperatura, CO_2 , pH, RSC, RSD, Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl, CaCO_3 , TSS y CE) de la resurgencia Canilla durante el período 1984-1989.

Fig. 7 (derecha). 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 Guajabón durante el ciclo hidrológico 1984-1989, arrojaron que la intensidad de denudación química es de 40-50 $\text{m}^3/\text{km}^2\cdot\text{año}$ en Canilla y 115-130 $\text{m}^3/\text{km}^2\cdot\text{año}$ 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 $\text{m}^3/\text{km}^2\cdot\text{año}$) donde las precipitaciones oscilan entre 5700 y 12000 mm/año.

Precipitación de minerales en emergencias y saltos de agua

Las aguas procedentes de los manantiales de las zonas más profundas del karst y las aguas termales en general, arriban a la superficie con un exceso de minerales y gases disueltos, y por esa razón al evaporarse el CO_2 los iones tienden a alcanzar el nuevo equilibrio termodinámico, los iones formados se recombinan y precipita calcita en los bordes del propio manantial y a lo largo del curso, especialmente en cascadas y rápidos donde se favorece el escape de gas.

En la tabla 4 se muestran los resultados de la evolución química de las aguas del manantial Mil Cumbres a lo largo del perfil que pasa por un salto de agua y llega hasta las inmediaciones de su confluencia en el río San Marcos. Se presentan dos muestreos: uno realizado durante el invierno y en otro durante el verano de 1985. Como puede apreciarse, en ambos casos se produce una progresiva disminución del CO_2 , aumento del pH, disminución de la dureza y una tendencia a la mayor saturación de la calcita y la dolomita.

Estación	N	P (mm)
Invierno	17	87,5
Verano	18	225,2*

* Diferencias significativas a un nivel de significación de 0,05

Tabla 4. Valores medios y desviaciones estándar de las precipitaciones medias en la estación hidroclimática de San Juan de Sagua durante los meses de invierno y verano del período 1984-1989.

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 Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. De ellos, el H_2S permite discriminar entre aguas superficiales o subsuperficiales y aguas procedentes del drenaje profundo. En las primeras se observa dependencia del patrón hidrogeoquímico de la litología local. En las aguas profundas, por el contrario no hay relación entre el tipo de agua y la litología de cobertura. La aguas profundas poseen una temperatura media invernal alta a diferencia de las aguas superficiales y subterráneas someras. Los coeficientes de variación de la temperatura, la dureza y la mineralización permiten la diferenciación entre aguas superficiales y las subterráneas.

El pH es un indicador que discrimina diferentes tipos de agua en dependencia de su litología y tipo de circulación. Los mayores valores fueron hallados en las aguas de cueva y las que drenan los macizos ultrabásicos. Su relación con la dureza, expresada en la curva de Tillman-Trombe permite representar esquemáticamente los diferentes tipos de agua. Relacionados con estos últimos indicadores geoquímicos se encuentran el contenido de CO_2 , la mineralización y los contenidos de Cl^- y SO_4^{2-} . Las concentraciones de ellos tienden a incrementarse a medida que las aguas drenan por horizontes acuíferos más profundos. Los índices de saturación medios de la calcita, la dolomita y el yeso también permite reconocer los diferentes tipos de aguas, aunque estas magnitudes varían apreciablemente en dependencia de la ocurrencia de lluvias locales.

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

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 diferentes indicadores geoquímicos.

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 hipógeo, 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.

BIBLIOGRAFÍA

- ABELLÓ I, LUACES P., FAGUNDO J.R. Y GUERÓN J. (1993). Estudio estadístico multivariado sobre datos de diferentes litologías de la cuenca del río San Marcos, Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. En: Cuenas Experimentales en el Karst. Ed. Univ. Jaume I, Castellón, España, 205-214, 1993.
- 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. Y FAGUNDO J.R. (1991). SAPHIQ, un sistema para el procesamiento automatizado de datos hidroquímicos. Revista CNIC Ciencias Biológicas, 22: 7-8.
- ALVAREZ E., VINARDELL I., FAGUNDO J.R. Y RODRÍGUEZ J.E. (1992). Sistemas para el procesamiento de datos hidroquímicos: SAPHIQ, GEOQUIM, SAMA y BATOMET. Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuenas Experimentales en el Karst, Matanzas 1992. Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 189-194.
- ANTIGUEDAD 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.
- ANTIGUEDAD 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 Hills., Somerset (Great Britain). J. Hydrol., 35: 93-110.
- 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.
- DE LA CRUZ A. Y VALDÉS J.J (1985). Estudio de las aguas kársticas de la Sierra del Pan de Guajabón y sus inmediaciones mediante métodos matemáticos de análisis exploratorio de datos. Voluntad Hidráulica 68: 25-34.
- 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 quimiofísico de las aguas kársticas en la cuenca del río Cuyaguatzeje. Ingeniería Hidráulica 2 (3): 251-274.
- FAGUNDO J.R., VALDÉS J.J. Y PAJÓN J.M. (1982). Estudio hidroquímico de las aguas cársicas de la cuenca del río Cuyaguatzeje. Coloquio Internacional sobre Hidrología Cársica de la Región del Caribe. C. Habana 1982: 375-401.

- FAGUNDO J.R., VALDÉS J.J, RODRÍGUEZ J.E., PAJÓN J.M, DE LA CRUZ A., GARCÍA A. Y PULINA M. (1986). Estudio preliminar sobre el proceso de denudación cársica en el polígono cubano-polaco del Pan de Guajaibón. *Voluntad Hidráulica*, 70/71: 11-15.
- FAGUNDO J.R., PAJÓN J.M., VALDÉS J.J, RODRÍGUEZ J.E. Y ARELLANO D.M.(1987a). Naturaleza de los procesos de disolución de los minerales calcita, dolomita y yeso en las aguas naturales de la región occidental de Cuba. *Voluntad Hidráulica*, 76: 30-42.
- FAGUNDO J.R., PAJÓN J.M. Y SPASSOV K. (1987b). Estudio hidroquímico del sistema cavernario Fuentes y sus alrededores, Sierra de los Organos, Pinar del Río. *Voluntad Hidráulica*, 75: 3- 8.
- FAGUNDO J.R., VALDÉS J.J AND PULINA M. (1990). Results of the hydrochemical investigations performed in experimental bases situated in extreme climatic areas, tropical and polar, in Cuba and Spitsbergen respectively. Selected paper from the Int. Symp. Water Res. Manag. Prot. in Tropical Climate, 45-54.
- FAGUNDO J.R Y RODRÍGUEZ J.J. (1991a). Hydrogeochemical pattern and mathematical correlations in karst at the examples of Cuba. Proc. Int. Conference Environmental Changes in Karst Areas. IGU-UIS, Italy 1991. Quaderni del Dipartimento di Geografia No 13, Univ. Padova, 361-369.
- FAGUNDO J.R., RODRÍGUEZ J.E, PAJÓN J.M., FRANCO E., ALVAREZ E., VINARDELLI, VEGA J Y BENÍTEZ G. (1991 b).Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales III- Cuenca del río San Marcos, Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. *Voluntad Hidráulica*, 85: 8-18.
- FAGUNDO J.R. AND RODRÍGUEZ J.E. (1992). Hydrogeochemical pattern and mathematical correlations in karst at the examples of Cuba. *Newsletter Geology, Climate and Karst Formation*. Inst. of Karst Geology, Guilin (China): 41-45.
- FAGUNDO J.R., RODRÍGUEZ J.E., PAJÓN J.M., FRANCO, E., BENÍTEZ G., RODRÍGUEZ A.C., GUERÓN G. Y ABELLÓ I. (1993). Caracterización hidroquímica de las aguas del Pan de Guajaibón y otras áreas cársicas cercanas a la Sierra del Rosario. En: *Cuencas Experimentales en el Karst*. Ed. Univ. Jaume I, Castellón, España, 43-53.
- FRANCO E., FAGUNDO J.R. Y PAJÓN J.E. (1987). Resultados de los estudios hidroquímicos realizados en el Pan de Guajaibón en el período Enero 28 a Febrero 17 de 1986. *Revista Ciencias de la Tierra*, 11, 17 pags.
- FORD D. AND WILLIAMS P. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. Ed. Unwin Hyman, London, 601 pp.
- FREIXES A. (1993). El medio kárstico: de la investigación observacional y experimental a la modelación. *Hidrología Subterránea y Migración de Contaminantes*. Ed.: A. Correig, 97- 141.
- 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 Y. (1989). Tasas de disolución en regiones kársticas españolas. En: *El Karst en España*. Ed. J.J Durán y J. López Martínez. Edigrafos S.A., Madrid: 257-264, 1989.
- GASCOYNE M. (1978). Hydrogeology and solution chemistry of North Venezuelan Karst. *Bol. Soc. Venezolana Espel.* 9 (17): 5-20.
- GUERÓN J., FAGUNDO J.R., ABELLÓ I. Y ONTIVERO E. (1993). Utilización de técnicas de regresión en el procesamiento de datos de diferente naturaleza hidrogeoquímica. En: *Cuencas Experimentales en el Karst*. Ed. Univ. Jaume I, Castellón, España, 195-204.
- HARMON R. (1971). Preliminary results on the groundwater geochemistry of the Sierra de El Abra region, North-Central México. *Nat. Spel. Soc. Bull.*, 33: (2):78-85.
- 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. (1981). *Karst and hydrogeology syntesis*. Spelunca, Supp. 3, 7-8
- MANGUIN A. (1975). Contribution á l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doctorat és Sciences Naturallles. 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 Univ. Slaskiego* No 286, Katowice, 167 pp.
- MISEREZ J. (1975). Variations chimique de sources karstiques et bilan de l' alteration. Exemples de l' areus et Noirage, Jura Neuchatelois. *Ann. Speleol*, 30 (2): 241-254.
- MORALES I. (1991). Estudio hidrogeológico de la zona norte de Vizcaya. Tesis Doc. Sci. Geológicas. Univ. País Vasco, 503 pp.
- MORALES I Y ANTIGUEDAD I (1993). Diferenciación de tres sistemas kársticos de Bizkaia (País Vasco) a partir del análisis de de sus respuestas naturales. I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas (Cuba) 1992. Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España), 215-231.
- MISEREZ J.J (1973). Géochimie des eaux du karst Jurassien. Contribution phisico-chimique a l'etude des altérations. Thèse Doc. Sci. Nat 313, Neuchatel.
- PIETROWSKA K. (1978). Nappe structures in the Sierra de los Organos Western Cuba. *Acta Geológica Polonica*, 28 (1): 97-170.
- PSZCZOIKOWSKI 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. Observations of the chemical denudation of some karst areas of Europe and Asia. *Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica* 5: 79-92, 1971.
- PULINA M., FAGUNDO J.R., VALDÉS J.J., RODRÍGUEZ J.E., KOZIK A, LESZKIEWIZ J, GLOWACKI P., PAJÓN J.E., DE LA CRUZ A. AND GARCÍA A. (1984). The Dynamica of the Contemporary Karstic Processes in the Tropical Area of Cuba. Preliminary report of the field investigations performed by the Expedition Guajaibon' 84 in the winter season 1984. Univ. Slaski, Sosnowiec, 42 pags.
- 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.
- RODRÍGUEZ J.E. AND FAGUNDO J.R. (1991). Hydrology and dynamics of tropical karst processes in Cuba. *Studia Carsologica* (Brno) 4: 49- 55.
- RODRÍGUEZ J.E. AND FAGUNDO J.R. (1992). Hydrology and dynamic of tropical karst processes in Cuba. *Geology, Climate, Hydrology and Karst Formation. Newsletter, Inst. of Karst Geology, Guilin, China*, 46-513.
- RODRÍGUEZ J.E., FAGUNDO J.R. Y PULINA M. (1993). Hidrología y dinámica de los procesos cársicos tropicales contemporáneos en Cuba. En: *Cuencas Experimentales en el Karst*. Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España), 105-130.
- SMITH D.I. AND ATKINSON (1976). Process landforms and climate in limestone regions. In: *Geomorphology and Climate*. E. E. Derbyshire, London-Wiley: 369-409.
- 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.
- TYS A. (1992). Action actuelle des processus karstiques dans le karst polygonal du Pan de Guajaibon (Sierra del Rosario, NW de Cuba). En: *Karst et Evolutions Climatiques*. E. Univ. Boereaux, 135-144.
- VALDÉS J.J. Y FAGUNDO J.R. (1980). Determinación de la capacidad de disolución de las aguas kársticas durante un año hidrológico. *Ingeniería Hidráulica* 1 (2): 61-77.
- VALDÉS J.J., FAGUNDO J.R. Y PAJÓN J.M. (1981). Aplicación de métodos numéricos al estudio hidrogeoquímico de la cuenca del río Cuyaguatete. *Ingeniería Hidráulica* 2 (3): 275-286.
- 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.
- WHITE W.B. (1988). *Geomorphology and Hydrology of the Karst Terrains*. Ed. Oxford. University Press.