

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL SISTEMA DE FLUJO LOCAL-REGIONAL DE LA SIERRA DEL ROSARIO (CUBA)

Reynerio Fagundo, J.¹; J. Joel Carrillo-Rivera²; Iñaki Antigüedad³; Patricia González¹; Roberto Peláez⁴; Margaret Suárez¹; Clara Melián¹; Rebeca Hernández⁵ y Dámaso Cáceres⁵

Resumen Se presentan resultados de la caracterización hidrogeoquímica realizada en la Sierra del Rosario (Pinar del Río, Cuba) donde la aplicación del entendimiento del flujo del agua subterránea permitió distinguir sistemas de flujo de diferente jerarquía. Las muestras colectadas entre 1984 y 2004, comprenden diferentes puntos de descarga de flujos de distinta naturaleza (local a regional) que circulan por rocas de litología variada (caliza, arenisca, ultrabásicas) con edades entre el Paleógeno y Jurásico. Se procesaron cerca de 400 análisis químicos de agua, mediante modelos estadísticos, químico-físicos e hidrogeoquímicos, de balance de masa y de mezcla de aguas. Los resultados permiten establecer el comportamiento hidrogeoquímico de cada flujo de agua, así como el origen de su composición química. Las características de cada flujo y su interacción con el material acuífero han sido interpretadas a partir de parámetros químicos, físicos y otros índices geoquímicos relacionados con el equilibrio del agua respecto con la calcita, dolomita y yeso. Las propiedades de estas aguas dependen de la interacción agua-roca desde la infiltración hasta su descarga y de la constitución de los materiales por donde circula.

Palabras clave: sistemas de flujos de aguas subterráneas, caracterización hidrogeoquímica, modelación hidrogeoquímica, Sierra del Rosario.

Abstract In this paper results are presented of the hydrochemical characterization of water at Sierra del Rosario, Cuba. This study was carried out between 1984 to 2004 by a water quality monitoring identifying flows of different hierarchy which travel through limestones, schists, sandstones and ultra-basic rocks with ages from the Paleocene to the Jurassic. The data were statistically processed by means of chemical equilibrium and physical-chemical models. Results demonstrate that the physicochemical properties of the water are controlled by water-rock interaction resulting from the residence time since precipitation infiltrated and to the discharge area, and the type of aquifer material. Geochemical indices allow the definition of the different types of flow (local, intermediate, regional) to be characterized. A mass balance, a mixing hydrogeochemical models, and the chemical composition (origin) of the waters permitted to further define the different flow systems and rock type involved.

Keywords: groundwater flow systems, hydrogeochemical characterization, hydrogeochemical modelling, Sierra del Rosario.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos cuarenta años se han realizado importantes contribuciones que permiten adquirir un mejor conocimiento acerca de la hidrogeología de la Sierra del Rosario, en la provincia de Pinar del Río (PULINA; FAGUNDO, 1992; RODRÍGUEZ et al., 1989; RODRÍGUEZ; FAGUNDO, 1995; FAGUNDO et al., 1995; 1997; 1998, 2001a; 2001b; GONZÁLEZ et al., 2001; PEÑA et al., 2001; PELÁEZ et al., 1990). Sin embargo, la mayor parte de los estudios que relacionan la hidroquímica con la geología han sido presentada de manera aislada, faltando su integración. Recientemente se ha procedido a ordenar toda la información asequible. Así, los flujos subterráneos de la Sierra del Rosario han sido clasificados en nueve grupos en función de las características geológicas y de la naturaleza del flujo (local a regional). Además, se ha

determinado mediante la modelación hidrogeoquímica el origen de la composición química de cada grupo de agua, así como los procesos de interacción agua-roca y de mezcla de agua; esto ha permitido definir las líneas de flujo (evolución química) existentes a partir del agua de lluvia caída en la Sierra. En este trabajo se presentan de forma simplificada las características hidroquímicas de los flujos locales y regionales, mostrando su contenido medio, su origen y procesos geoquímicos más importantes con ellos relacionados.

MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLOGICO

La parte central del área de estudio se encuentra localizada aproximadamente a 100 km del sudoeste de la ciudad de La Habana (Figura 1) y ocupa una superficie de 1.125 km². Las condiciones climáticas están controladas por dos

¹Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional” - Cuba (juanrfag@infomed.sld.cu)

²Instituto de Geografía UNAM - México (cigaihsud@mx.inter.net)

³Universidad del País Vasco - España (gopanaui@lg.ehu.es)⁴Empresa GEOMINERA, Pinar del Río - Cuba (rpelaez@geo.upr.edu.cu)

⁵Universidad de Pinar del Río - Cuba (rebeca@geo.upr.edu.cu)

factores principales, la elevación con respecto al nivel del mar del sitio y la distancia a la costa

marina. La mayor elevación y más destacado relieve lo constituye el Pan de Guajaibón con una

699 m de altura sobre el nivel del mar Las temperaturas medias anuales en esta parte del territorio y la costa marina son de 23 °C y 25 °C, respectivamente. Las temperaturas máximas y mínimas registradas en el occidente de Cuba son 36 °C y 2 °C, respectivamente. Los meses más calientes son Julio y Agosto y los más fríos Diciembre y Enero. Las precipitaciones anuales en la Sierra del Rosario son del orden de 2 000 mm, de las cuales 1.600 mm caen durante los meses más lluviosos (Mayo a Octubre) y 400 mm durante los meses más secos (Noviembre a Abril). Las precipitaciones registradas disminuyen en los territorios de más bajo nivel topográfico (alrededor de 1.050 mm anuales).

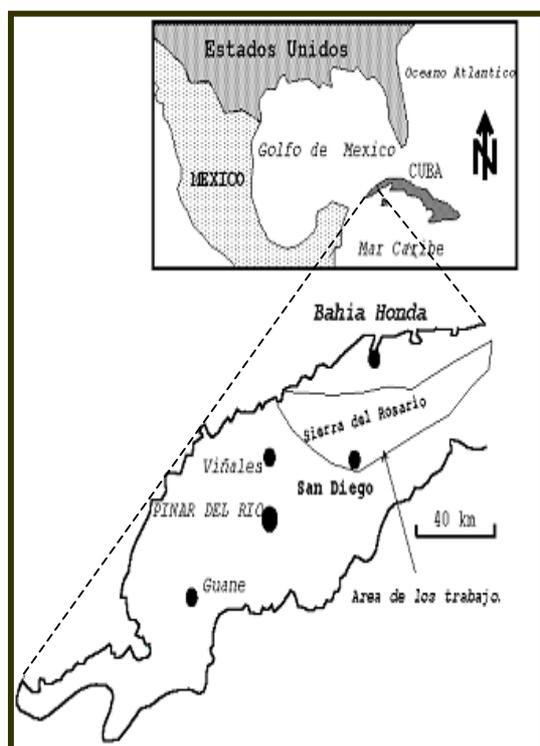


Figura 1 - Esquema de ubicación de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba

La geología de la Sierra del Rosario se caracteriza por una complejidad litológica y estructural (Figura 2), como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno Medio (PSZCZOIKOWSKI, 1978). Las características litológicas de las unidades geológicas que afloran en el área se describen someramente a en la tabla 1.

En el área se aprecian varias unidades fiosiográficas principales o fajas, paralelas e

intercaladas entre sí, constituidas por calizas, esquistos-areniscas y rocas ultrabásicas, las cuales están limitadas al norte y al sur por las fallas Bahía Honda y Pinar respectivamente. Estas fajas son las siguientes:

1-Faja de las Ofiolitas: Se extiende desde la Sierra de Cajalbana hasta cerca del Mariel. Está constituida por rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica.

2-Faja Quiñones: Se extiende desde el norte del Pan de Guajaibón hasta el caserío del Rosario. La componen rocas efusivo sedimentarias del Cretácico (formaciones Encrucijada, Vía Blanca y Quiñones) y esquistos, areniscas y calizas del Paléogeno (Fm. Manacas).

3-Faja Guajaibón – Santo Tomás: Se extiende desde el macizo calcáreo Pan de Guajaibón hasta el poblado de Santo Tomás. Está constituida por calizas, calcarenitas, dolomita y calizas silicoclásticas de las formaciones Guajaibón, Sierra Azul, Cacarajícara, Polier y Lucas.

4-Faja Rosario Norte: Se extiende desde el poblado de El Sitio hasta el poblado de Francisco. Constituida por calizas estratificadas de la Fm. Artemisa, esquistos, areniscas y calizas del Paléogeno (Fm. Manacas) y rocas ultrabásica.

5-Faja Rosario Sur: Se extiende aproximadamente desde las márgenes del río San Diego hasta el poblado de Cayajabos. Está compuesta de sedimentos calcáreos de las formaciones Artemisa y Francisco, esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano y basaltos de la Fm. Sábalo

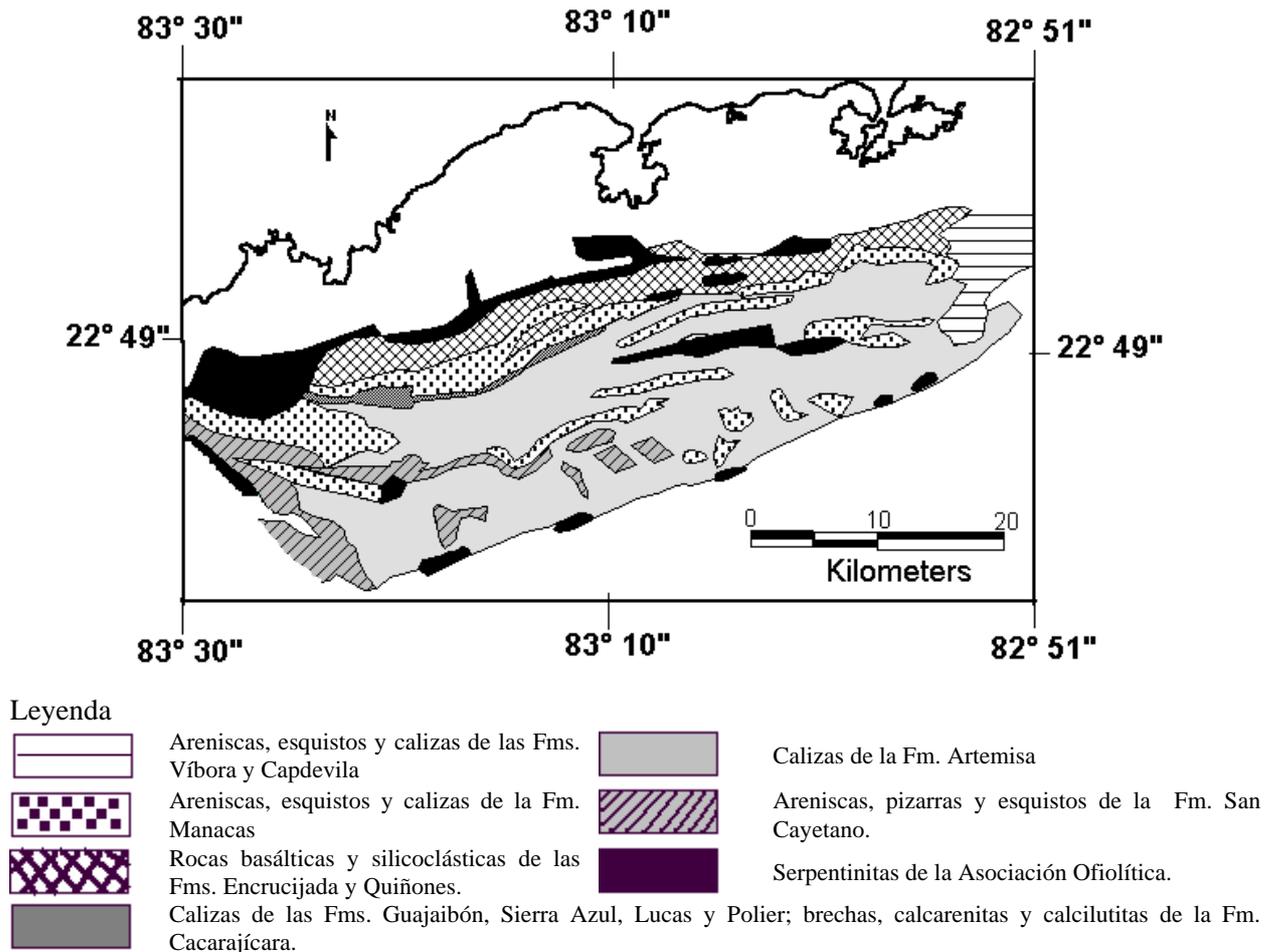


Figura 2 - Esquema geológico de la Sierra del Rosario

La información relacionada con las propiedades hidráulicas de las unidades que integran los diferentes complejos hidrogeológicos de la Sierra del Rosario es escasa, con excepción de aquellos sitios donde se han hecho trabajos de prospección con fines mineros y de búsqueda de aguas mineromedicinales (PELÁEZ et al., 1990).

Los depósitos que componen la faja ofiolítica originan acuíferos de fisura. A pesar de la poca información existente con respecto a estos acuíferos de la Sierra del Rosario, se conoce que los caudales de los pozos perforados en estos materiales, en otros sitios del país, son del orden de 0,2 a 0,3 l/s (ERGOROV; LUEGE, 1967). Sin embargo, en zonas de dislocaciones tectónicas los caudales pueden alcanzar hasta 20 L/s. Estos materiales pueden originar acuíferos locales e intermedios.

En la faja Quiñones, los materiales constitutivos de las formaciones presentes, tanto del Cretácico como del Paleógeno son poco acuíferos. No obstante, en algunos lugares donde existen calizas agrietadas se obtienen caudales

apreciables. En la Sierra del Rosario, estos depósitos originan flujos locales e intermedios y sirve de cauce a arroyos superficiales, algunos de los cuales, como el denominado Mamey, se sumerge en un sumidero cársico.

Los esquistos, areniscas y calizas de la Fm. Manacas son poco acuíferos. En los manantiales muestreados los caudales son inferiores a 1L/s.

La faja Guajaibón – Santo Tomás – Martín Mesa se caracteriza por la prevalencia de unidades carbonatadas. Debido a ello se desarrolla un relieve cársico en la región.

Los manantiales originados en las calizas de la Fm. Guajaibón, representados en el área por la surgencia Ancón presentan caudales del orden de 72 L/s en los meses más secos y del orden de 528 L/s en los meses más lluviosos (RODRÍGUEZ, et al., 1989). El caudal medio medido entre 1984 y 1989 fue de 124 L/s en la resurgencia Canilla y de 199 L/s en la surgencia Ancón. Los caudales mínimos y máximos en ese período variaron entre 3,6 y 1.589 L/s en Canilla y entre 2,1 y 8.873 L/s en Ancón

Los manantiales de la zona de emisión de los acuíferos desarrollados en los materiales de la Fm. Sierra Azul, así como los relacionados con la Fm. Cacarajícara poseen caudales algo menores al de las surgencias de la Fm. Guajaibón.

Las fajas Rosario Norte y Rosario Sur poseen características hidrogeológicas muy similares, debido a la gran distribución que poseen en las mismas la caliza de la Fm. Artemisa. En ambas franjas se presentan también rocas carbonatadas de semejante composición y existe un estilo tectónico similar, todo lo cual favorece la formación de acuíferos en las grietas y cavernas a diferentes profundidades, originados por flujos locales, intermedios o regionales, algunos con

altos contenidos de sulfuros. Los caudales de las surgencias cársicas relacionadas con las calizas estratificadas de la Fm. Artemisa son del orden de 250 L/s, mientras que los pozos perforados en la región presentan gastos específicos del orden de 1,2 a 2,1 L/s/m.

Los gastos específicos determinados en los pozos perforados en los materiales constitutivos (esquistos, pizarras y areniscas cuarzosas) de la Fm San Cayetano, fueron bajos, del orden de 0,7 a 4,6 L/s/m (PELÁEZ et al., 1990). Los caudales de las surgencias cársicas en esta área son semejantes a los de la región del Pan de Guajaibón (flujos intermedios).

Tabla 1 - Principales formaciones geológicas de la Sierra de Rosario y su litología

| SÍMBOLO | EDAD | FORMACIÓN | LITOLOGÍA |
|---|--|-----------------------------------|--|
| P ₁₋₂ (pp) | Paleógeno (Eoceno indiferenciado) | Fm. Manacas | Areniscas, esquistos, calizas, pedernales y olistostromas |
| K _{2m} (csj) | Cretácico Superior Maestrichtiano | Fm. Cacarajícara | Brechas, calcarenitas, calcilutitas |
| K ₂ cm-t (qñ) | Cretácico Superior Cenomaniano- Turoniano | Fm. Quiñones | Pedernales, Areniscas, aleurolitas, arguillas silicificadas, rocas vucanógeno- |
| K ₁₋₂ ap-cm | Cretácico inferior-superior Aptiano- | Fm. Carmita | Alterancia de calizas y pedernales |
| K ₁₋₂ al-cm (gb) | Cretácico inferior-superior Albiano- | Fm. Guajaibón | Calizas masivas, calcarenitas biomicriticas a veces dolomitizadas. |
| K ₁₋₂ (sa) (mm) | Cretácico Inf.-Sup. Indiferenciado, Terrigeno-Carbonatado. | Fm. Sierra Azul | Calizas, Calizas margosas, argilitas, silicitas |
| | | Fm. Martín Mesa | Calizas masivas y estratificados (biomicritas), calcarenitas. |
| K ₁ a-al (ec) | Cretácico Inferior Aptiano-albiano | Fm. Encrucijada | Lavas basálticas, andesíticas, silicitas, argilitas, aleurolitas |
| K ₁ v-al (pl) | Cretácico Inferior Valanginiano-Albiano | Fm. Polier | Calizas bituminosas, areniscas cuarzosas, argilitas |
| K ₁ b-bm (ls) | Cretácico inf. Berriasiano - Barremiano | Fm. Lucas | Calizas (biomicritas) estratificadas, argilitas calcáreas. |
| J ₃ -K ₁ b (ar) | Jurásico Superior-Cretácico inferior | Fm. Artemisa | Calizas estratificadas (micritas, biomicritas, calcilutitas y calcarenitas) con intercalaciones de silicitas en la parte superior. |
| J ₃ ox | Jurásico superior Oxfordiano | Fm Francisco | Limonitas, lutitas y calizas |
| J ₁ -J ₃ ox (sc ₂) (sc ₁) | Jurásico Inferior-Superior Oxfordiano | Fm. San Cayetano (Parte Superior) | Esquistos filitiazados, carbonosos, argilitas, calizas. |
| | | (Parte inferior) | Areniscas, lutitas, argelitas, esquistos filitóideos |
| J ₃ ox | Cretácico Inferior | Fm. Sábalo | Basaltos con intercalaciones de calizas |
| ASOCIACIÓN OFIOLITICA MESOZOICA | | | |
| σ | | | Serpentinitas, harzburguitas, Iherzolitas, wherlitas, dunitas serpentinizadas |

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron 376 datos hidroquímicos, a partir de muestreos realizados entre los años 1984 y 2002 (PULINA; FAGUNDO, 1992; FRANCO et al., 1987; PELÁEZ et al., 1990; FAGUNDO et al., 1993; GONZÁLEZ et al., 2000).

Las mediciones de los parámetros geoquímicos se realizaron en el campo, las más recientes mediante pHmetro, medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424, marca HANNA y oxímetro modelo HI-914, marca HANNA. Los contenidos de CO₂ y H₂S, así como la alcalinidad total (HCO₃⁻ y CO₃²⁻) fueron también determinados in situ, mientras que los restantes macroconstituyentes (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ y Mg²⁺) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomadas las muestras. Las marchas analíticas se efectuaron mediante las técnicas analíticas

estándar (APHA, 1989) adaptadas para condiciones de campo (KRAWCZYK, 1992).

La calidad de los datos fue previamente validada antes de ser procesados mediante varios sistemas informáticos, basados en modelos estadísticos, químico-físicos e hidrogeoquímicos, implementados especialmente para los objetivos del trabajo (FAGUNDO-SIERRA et al., 2001; FAGUNDO et al., 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características hidroquímicas de los diferentes tipos de flujos.

Los datos de análisis de agua utilizados en el trabajo, acorde a las características geológicas (litológicas y estructural) del sitio muestreado y a los tipos de flujos establecidos fueron distribuidos en 9 grupos y varios subgrupos, cuyas propiedades se describen en la tabla 2. Para hacer esa agrupación se tomó en cuenta la teoría del sistema de flujos adoptada TÓTH (1995). La distribución espacial de los sitios seleccionados se muestra en la figura 3.

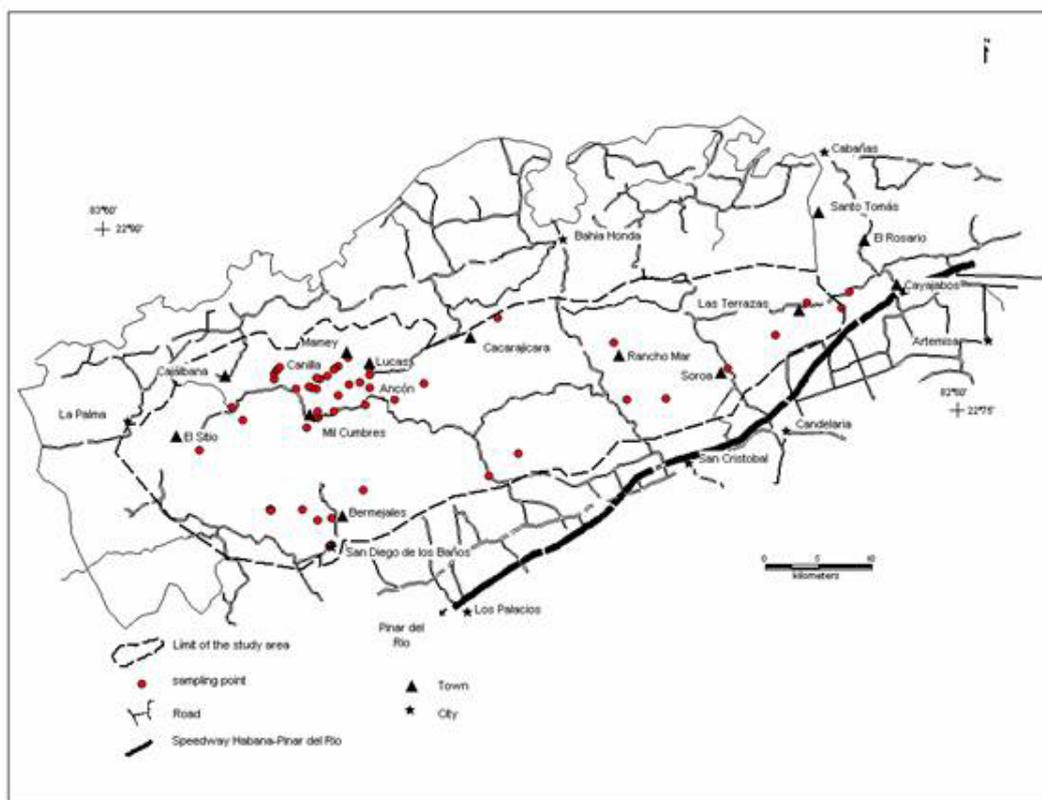


Figura 3 - Localización de los puntos de muestreo de la Sierra del Rosario

Las características hidrogeoquímicas generales de estos grupos son las siguientes:

Grupo 1 -Las aguas de este grupo (Tabla 2) presentan bajas temperaturas ($23,8\pm 3,3$ °C), son ligeramente alcalinas (pH, $7,72\pm 0,40$), con relativamente bajos contenidos de CO_2 ($2,3\pm 2,0$ mg/L), cloruro ($19,8\pm 5,1$ mg/L), sulfato ($7,7\pm 9,0$ mg/L), y de minerales disueltos (sólidos solubles totales SST (373 ± 137 mg/L). La facies hidroquímica típica es $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$. Los flujos locales se encuentran subsaturados con respecto a la calcita (Figura 4.1a) y la dolomita mientras los flujos intermedios tienden a la saturación con respecto a ambos minerales. Con relación al yeso ambos flujos se encuentran insaturados 373 ± 137 mg/L.

Grupo 2 -Las aguas de este grupo (Tabla 2) se distinguen por presentar temperaturas frías ($23,3\pm 1,2$ °C), altos valores de pH ($8,35\pm 0,44$), poco contenido de CO_2 ($2,3\pm 3,4$ mg/L), Cl^- ($16,6\pm 2,5$ mg/L) y sulfato ($8,9\pm 12,8$ mg/l), así como moderado SST (307 ± 50 mg/L). El ambiente en que emergen es oxidante (Eh, 156 mv y $8,4$ mg/L O_2 disuelto) y posee facies hidroquímica del tipo $\text{HCO}_3\text{-Mg}$. En el transcurso de su recorrido, estas aguas alcanzan el equilibrio químico con respecto a la serpentinita (expresada en términos de dolomita), pero no con respecto a la calcita (Figura 4.1b) y al yeso dada la poca disponibilidad de estos minerales en el terreno.

Grupo 3 -Está representado por flujos locales e intermedios que drenan acuíferos no confinados en la zona vadosa del sistema kárstico del macizo del Pan de Guajaibón, constituidos por calizas de la Fm. Guajaibón. Se aprecian tres subgrupos: el primero constituido por aguas de infiltración en las cuevas (flujos locales que alimentan acuíferos colgados), originadas por percolación de las lluvias a través de las calizas; el segundo subgrupo constituido por manantiales que emergen en los valles elevado, y el tercero por surgencias y resurgencias kársticas que emergen al pie del macizo.

Las aguas de cueva poseen baja temperatura ($21,7\pm 1,2$ °C), alto pH ($8,17\pm 0,16$) y poco contenido de CO_2 ($1,4\pm 1,7$ mg/L), mientras que las aguas de los manantiales poseen bajos pH ($7,62\pm 0,35$ - $7,54\pm 0,34$) y altos contenidos de CO_2 ($4,7\pm 6,9$ - $8,2\pm 6,5$ mg/L).

Las concentraciones de cloruros son bajas (subgrupo 1: $16,8\pm 3,8$ mg/L; subgrupo 2: $15,0\pm 3,0$ mg/L; sub-group 3: $15,2\pm 3,9$ mg/L), al igual que las de sulfato (subgrupo 1: $5,4\pm 4,9$

mg/l; subgrupo 2: $2,6\pm 3,4$ mg/L; subgrupo 3: $10,3\pm 9,1$ mg/L). Consecuentemente los SST son bajos (240 ± 44 mg/L, 366 ± 81 , 298 ± 47 respectivamente). La principal facies hidroquímica es $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. Las aguas de cueva tienden a encontrarse más cercanas al equilibrio químico respecto a la calcita (Figure 4.2a) y la dolomita que las restantes aguas. Con respecto al yeso todas las aguas se encuentran insaturadas.

La respuesta a la acción de las lluvias sobre los macizos kársticos, tanto de los caudales como de los contenidos iónicos de las aguas en las emergencias, es relativamente rápida al igual que su recuperación.

Grupo 4 -Los flujos locales de este grupo (Tabla 2) poseen temperaturas frías ($23,1\pm 0,8$ °C), pH cercano a la neutralidad ($7,11\pm 0,42$), pero alto contenido de CO_2 ($41,5\pm 12,0$ mg/L). Las concentraciones de cloruro ($20,0\pm 5,8$ mg/L) y sulfato ($24,7\pm 24,0$ mg/L) son bajas y presentan una mineralización mediana (TSS: 492 ± 143 mg/L). Estas aguas poseen potenciales redox (Eh) ligeramente negativos, entre -63 y -80 mV y altos contenidos de O_2 disuelto ($5,3\text{-}7,7$ mg/L). Los flujos intermedios, que en su recorrido subterráneo interactúan con los sedimentos de la Fm. Cacarájicara, presentan valores mayores de todos los parámetros físico-químicos que los flujos locales (Tabla 2) y contienen H_2S . Las facies hidroquímicas son $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ en los flujos locales y $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$ en los intermedios. El comportamiento de las relaciones de saturación respecto a la calcita (Figura 4.2b), la dolomita y el yeso es similar al de las aguas de la Fm. Guajaibón (Grupo 3).

Grupo 5 -Está formado por flujos locales, los cuales drenan acuíferos no confinados constituidos por calizas de la Fm. Artemisa. Estas aguas poseen propiedades similares a las de los Grupos 3 y 4 que drenan acuíferos carbonatados (Tablas 2).

Los manantiales presentan baja temperatura ($23,3\pm 1,3$ °C), pH ligeramente neutro ($7,32\pm 0,40$), moderado contenido de CO_2 ($24,5\pm 17,8$ mg/l), bajas concentraciones de cloruro ($17,9\pm 4,2$ mg/L), y sulfato ($34,1\pm 17,4$ mg/L); así como una mineralización mediana (TSS: 486 ± 78 mg/L). El Eh de esta agua varía entre -91.7 y -238.9 mV y poseen un relativamente alto contenido de O_2 ($1,6\text{-}5,7$ mg/L). La facies hidroquímica es $\text{HCO}_3\text{-Ca}$.

Las aguas muestreadas en las resurgencias kársticas presentan características similares, pero poseen un pH más alto ($8,52\pm 0,20$) y más baja mineralización (306 ± 22 mg/L). En general, las

aguas de los manantiales (subgrupo 1) tienden a alcanzar el equilibrio con respecto a la calcita (Figura 4.2b) y la dolomita, mientras aquellas que emergen a través de grandes conductos kársticos (resurgencias, subgrupo 2) se encuentran sobresaturadas respecto a estos minerales. Este diferente comportamiento está relacionado con el mayor escape de CO₂ disuelto en las aguas del último subgrupo. Con respecto al yeso todas las aguas se encuentran insaturadas.

Grupo 6 -Incluye flujos intermedios que drenan acuíferos no confinados desarrollados en calizas de la Fm. Artemisa a un nivel de profundidad mayor que el grupo anterior. Estas aguas están asociadas a las fracturas de la falla Pinar, así como a las grietas relacionadas con fallas transversales a aquella. Las temperaturas de estas aguas son ocasionalmente más elevadas que las restantes aguas anteriormente estudiadas (24,5±1.6 °C), el pH se encuentra cercano a la neutralidad (7,18 ±0,21), poseen relativamente altos contenidos de CO₂ (61,0±30,2 mg/L), de cloruro (37,8±13,2 mg/l) y sulfato (30,5±29,1 mg/L), así como una concentración relativamente más altas de minerales disueltos (SST: 622±115 mg/L que las anteriores. Estas aguas presentan potenciales redox negativos (-235 a -280 mV), bajos contenidos de O₂ disuelto (1,2 - 1,9 mg/L) y relativamente altos contenidos de H₂S disuelto (5,4-10,0 mg/L). Este grupo es parecido en sus relaciones iónicas y tipo hidroquímico a las aguas del grupo 5.

Se diferencia de dicho grupo por presentar un mayor contenido de cloruro, del total de iones disueltos (SST), así como por la presencia de H₂S. La temperatura invernal en estas agua varían entre 23,5 y 25,6 °C y el coeficiente de variación de la temperatura es del orden de 0.8 %. Estas características indican un mayor y más profundo recorrido subterráneo de estas aguas hasta su emergencia. Tienden a alcanzar el equilibrio con respecto a la calcita (Figura 4.3b) y la dolomita, pero se encuentran insaturadas con respecto al yeso.

Grupo 7. Está formado por flujos intermedios que drenan acuíferos confinados constituidos por materiales de varias litologías (mezcla). Presentan temperaturas moderadamente calientes

(26,3±2.1 °C), el pH varía desde neutro a alcalino (7,35±0,18), generalmente altos contenidos de CO₂ (40,1±14,4 mg/L) y H₂S disueltos (26,1-196,9 mg/L). Las concentraciones de Cl⁻ (25.7±14.0 mg/L) y de SST (715±241 mg/L) son también relativamente más altas, aunque la concentración de SO₄²⁻ no es muy grande (22.8±14.8 mg/L). Estas aguas exhiben altos potenciales redox negativos (-238 a -325 mV) y bajos contenidos de O₂ disuelto (1,2-2,7 mg/L).

Su composición es de tipo HCO₃-Mixtas siendo los cationes más relevantes: Ca²⁺, Na⁺ y Mg²⁺ (Tabla 2), en proporciones dependientes del aporte diferenciado de las areniscas, las calizas y las serpentinitas respectivamente. En las emergencias tienden a encontrarse saturadas con respecto a la calcita (Figura 4.3b) y la dolomita e insaturadas con relación al yeso.

Grupo 8 -Está representado por flujos intermedios que drenan esquistos, areniscas y calizas de la Fm. San Cayetano. Estas aguas (Tabla 2) poseen relativamente altas temperaturas (27,8±2,9 °C), pH alcalino (8,00±0,69), relativamente bajo contenido de CO₂ (20,0±19,8 mg/L) y altas concentraciones de H₂S (21.6-87.0 mg/L). Los contenidos de Cl⁻ (125.3±67.1 mg/L), sulfato (86,5±49,4 mg/L) y SST (1336±87 mg/L) de estas aguas son más altos que los de las aguas anteriormente descritas. Presentan muy altos valores negativos de potenciales redox (-238 a -325 mV) y bajos contenidos de O₂ disuelto (1,2 - 2,7 mg/l). Las facies hidroquímicas más comunes son HCO₃-Na y HCO₃-Na>Cl. Debido a su recorrido relativamente profundo, estas aguas extraen el Na⁺ de los aluminosilicatos en virtud de las relativamente elevadas temperaturas alcanzadas en su descenso. En forma similar también adquieren altos contenidos de SiO₂. Al igual que en el caso anterior, las aguas tienden a la saturación con respecto a la calcita (Figura 4.3b) y la dolomita, y a la insaturación con relación al yeso, lo cual es indicativo de un efecto poco acentuado del ciclo hidrológico sobre las mismas.

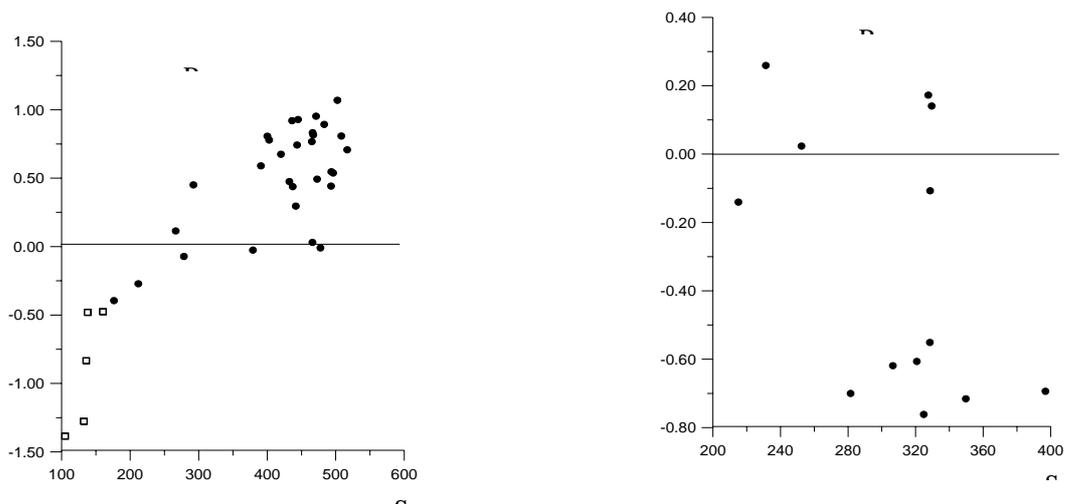


Figura 4.1 - Valores de RSC en función de los SST. (a): Flujos locales que drenan esquistos y areniscas de la Fm. Manacas; (b): Flujos locales que drenan rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica.

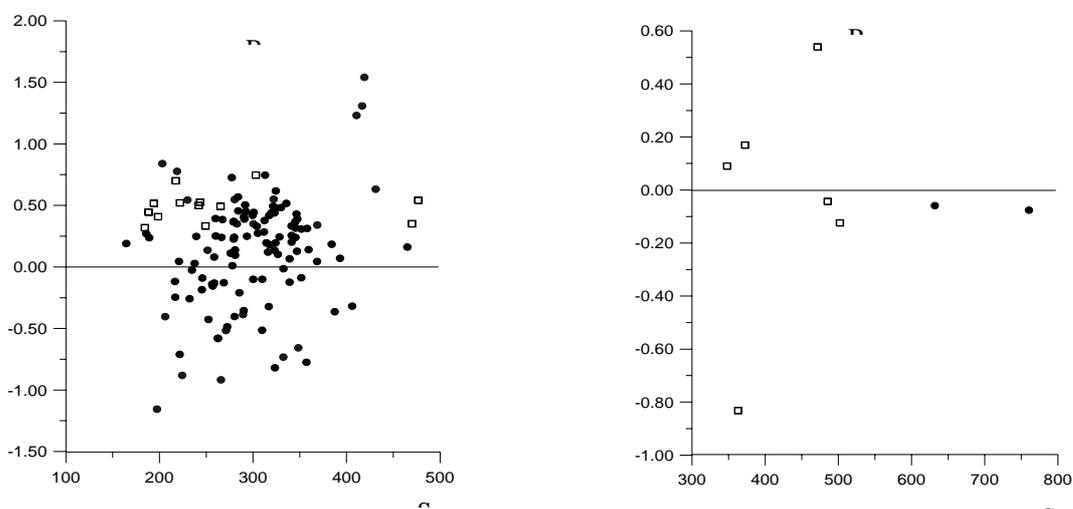


Figura 4.2 - Valores de en función de los SST. (a): Flujos locales que drenan calizas de la formación Guajaibón; (b): Flujos locales e intermedios que drenan calizas de la Fm. Sierra Azul e interactúan con sedimentos de la Fm. Cacarajícara

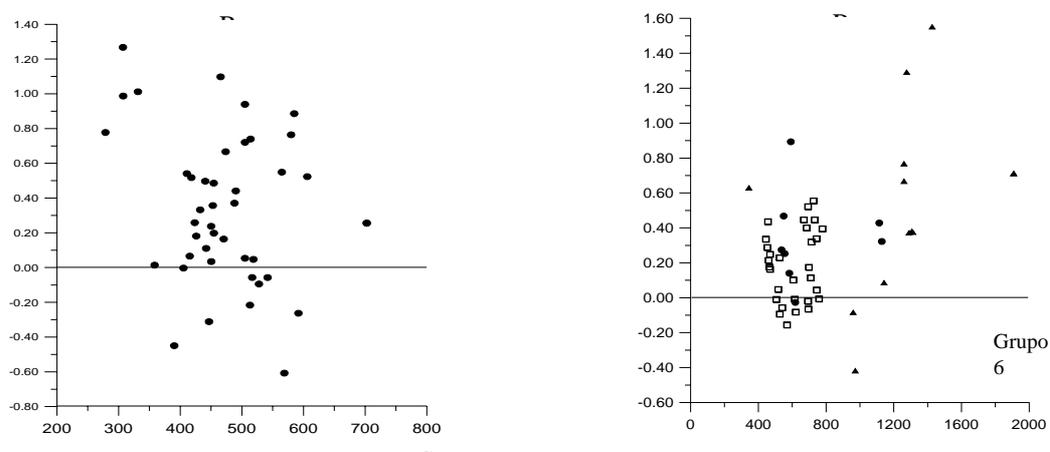


Figura 4.3 - Valores de RSC en función de los SST. (a): Flujos locales que drenan calizas de la Fm. Artemisa; (b): Flujos intermedios que drenan calizas de la Fm. Artemisa (Grupo 6); sedimentos constituidos por mezclas de rocas (grupo 7) y areniscas de la Fm. San Cayetano (Grupo 8).

Tabla 2 - Valores medios de la composición química de las aguas muestreadas en la Sierra del Rosario

| N° | N | Grupo | Sub-grupo | T (°C) | Eh (mv) | pH | O ₂ | CO ₂ | SiO ₂ | H ₂ S | HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻ | | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | TDS | Ref |
|----|----|-------|-----------|-----------|------------|------|----------------|-----------------|------------------|------------------|---|-------|-----------------|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------|-----|
| | | | | | | | | | | | (mg/L) | | | | | | | | | |
| 1 | 4 | LL | | 22,2 | | 7,04 | | 2,2 | 0 | 0 | 12,2 | 5,7 | 0,0 | 0,8 | 4,5 | 4,8 | 0,5 | 24 | 1 | |
| 2 | 5 | 1 | 1 | 24,5 | | 7,39 | | 4,7 | 8,6 | 0 | 84,6 | 12,1 | 2,9 | 15,5 | 3,8 | 15,0 | 0,5 | 133 | 1 | |
| 3 | 31 | | 2 | 23,1 | | 7,78 | | 1,9 | 14,7 | 0 | 277,6 | 21,0 | 8,4 | 54,4 | 10,7 | 37,4 | 1,3 | 412 | 1 | |
| 4 | 17 | 2 | | 23,3 | 156 | 8,35 | 8,4 | 2,3 | 18,8 | 0 | 236,2 | 16,6 | 8,9 | 5,2 | 44,7 | 15,4 | 0,4 | 329 | 1 | |
| 5 | 21 | | 1 | 21,7 | | 8,17 | | 1,4 | 7,4 | 0 | 156,4 | 16,8 | 5,4 | 47,0 | 4,2 | 10,2 | 0,2 | 240 | 1 | |
| 6 | 14 | 3 | 2 | 22,1 | | 7,62 | | 9,7 | 4,6 | 0 | 256,7 | 15,0 | 2,6 | 68,8 | 6,9 | 15,5 | 0,2 | 366 | 1 | |
| 7 | 94 | | 3 | 22,7 | | 7,54 | | 8,2 | 4,5 | 0 | 197,2 | 15,2 | 10,1 | 55,9 | 5,4 | 14,0 | 0,4 | 298 | 1 | |
| 8 | 6 | 4 | 1 | 23,1 | | 7,11 | | 41,5 | 5,9 | 0 | 280,1 | 20,0 | 16,7 | 79,4 | 8,5 | 18,6 | 0,6 | 424 | 1 | |
| 9 | 2 | | 2 | 25,8 | -174 | 7,02 | 5,5 | 50,3 | 12,1 | 8,1 | 364,6 | 30,3 | 67,0 | 101,4 | 12,3 | 48,3 | 1,5 | 625 | 1 | |
| 10 | 35 | | 1 | 23,3 | -238 | 7,32 | 1,6 | 24,5 | 5,1 | 0 | 309,5 | 17,9 | 34,1 | 92,8 | 6,6 | 22,9 | 0,7 | 486 | 1,2 | |
| 11 | 4 | 5 | 2 | 19,2 | 91,7 | 8,52 | 5,7 | 0,0 | 4,1 | 0 | 174,7 | 14,6 | 20,2 | 65,3 | 6,2 | 9,3 | 0,0 | 306 | 1 | |
| 12 | 28 | 6 | | 24,6 | -228 | 7,18 | 1,2 | 61,0 | 11,3 | 9,2 | 395,7 | 37,8 | 30,5 | 110,9 | 13,9 | 32,5 | 1,1 | 622 | 1 | |
| 13 | 9 | 7 | | 26,3 | -327 | 7,35 | 1,8 | 40,1 | 34,6 | 56,2 | 493,5 | 25,7 | 22,8 | 83,6 | 31,2 | 56,5 | 1,7 | 715 | 1,2 | |
| 14 | 1 | 8 | 1 | 25,0 | | 8,00 | | 0,0 | 12,0 | 0 | 192,6 | 17,0 | 34,6 | 8,0 | 3,7 | 86,0 | 2,7 | 345 | 2 | |
| 15 | 12 | | 2 | 27,8 | -317 | 8,04 | 1,2 | 20,0 | 26,6 | 67,7 | 742,4 | 125,3 | 86,5 | 36,9 | 17,3 | 317,5 | 9,8 | 1336 | 1,2 | |
| 16 | 93 | 9 | | 38,9 | -300 | 7,25 | 2,5 | 42,7 | 22,0 | 26,0 | 245,2 | 37,5 | 1300 | 456,6 | 50,9 | 119,2 | 5,6 | 2209 | 1,2,3 | |

1): Agua de lluvia, Ll; 2): Grupo 1, subgrupo 1: Arroyo La Sed; pozo Minero; 3) Grupo 1, subgrupo 2; manantial Fluoresceina; resurgencia Mamey; 4) Grupo 2: manantiales de los arroyos Cajalbana 1, Cajalbana 2, Cajalbana 3, Cajalbana 4 y Cajalbana 5; 5) Grupo 3, subgrupo 1: Cuevas Lechuza, Mamey, Ancón y Camilla; 6) Grupo 3, subgrupo 2: Manantiales Macagua, Cuchillas de Sagua, Mamey, Mineros y Conuco de la Bija; 7) Grupo 3, subgrupo 3: resurgencia Canilla; surgencia Ancón; resurgencia Ancón 2; mamantial Fernado; manantial La Curra; 8) Grupo 4, subgrupo 1: manantiales Lucas 1, Lucas 2, Lucas 3 y Cacarajicara no Sulfuroso; 9) Grupo 4, subgrupo 2: manantial Cacarajicara sulfuroso; 10) Grupo 5, subgrupo 1: Manantiales Cairmito, Mil Cumbres no sulfuroso, El Perdido (El Sitio), Kíquere, Recogedor, Batea, San Marcos, Cuatro Caminos, Julio Carmona, Majagua y San Juan no Sulfuroso; pozos P-2 (90 m) y P-3 (173 m); 11) Grupo 5, subgrupo 2: resurgencias Taco Taco y Bacunagua; 12) Grupo 6: manantial La Pastora; manantial Pedernales; pozo Pedernales; pozo El Brocal; manantial San Juan Sulfuroso; 13) Grupo 7: pozo P-13; manantial Martín Mesa; manantial Soroa; pozo El Sitio; 14) Grupo 8, subgrupo 1: pozo P-3 (40 m); 15) Grupo 8, subgrupo 1: manantial Mil Cumbres sulfuroso; pozo P-4; manantial Rancho Mar; 16) manantiales Azufre (Sal y Cruz), El Tigre, El Templado, La Gallina, M-I Bermejales, Cueva Portales; pozos P-1, P-12, P-17, P-19 well; P-4 (145-195 m), P-1 (0-23 m), P-1 (120-200 m), P-1 (120-281 m) y P-1 (237-320 m).

Ref (Referencias): 1) FAGUNDO et al., 1997; 2) PELÁEZ et al., 1990; 3) GONZÁLEZ et al., 2000.

Grupo 9 -Esta integrado por flujos regionales que drenan acuíferos confinados constituidos por calizas de la Fm. Artemisa e interactúan con los materiales de los depósitos confinantes, compuestos principalmente por esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano, así como con rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica. Estos flujos están asociados a la falla Pinar y otras transversales a la misma, en las cercanías de San Diego de los Baños. Las aguas de este grupo (Tabla 2) poseen relativamente altas temperaturas ($38,7 \pm 6,5$ °C) y sus pH se encuentran cercanos a la neutralidad ($7,24 \pm 0,28$), el contenido de gases disueltos es relativamente alto (CO_2 , $42,7 \pm 13,0$ mg/L; y H_2S , $7,9$ – $38,5$ mg/L). La concentración de Cl^- disuelto es alta ($38,7 \pm 11,3$ mg/L), y los contenidos de SO_4^{2-} ($1300,2 \pm 449,4$ mg/L) y los SST son los mayores encontrados (2.209 ± 607 mg/L). El valor de Eh es altamente negativo (-254 a -325 mV) y el O_2 disuelto es bajo ($2,1$ – $2,7$ mg/L).

En su recorrido alcanzan grandes profundidades, lo cual se evidencia por las relativamente altas temperaturas, así como los elevados contenidos de cloruro, sulfato, magnesio, sodio y potasio. Las facies hidroquímicas presentes son: SO_4 -Ca, $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3$ -Ca y SO_4 -Ca > Na. Por lo general se encuentran saturadas con respecto a la calcita (Figura 4.4) y la dolomita, y muy cerca de la saturación con respecto al yeso.

La ausencia de yeso en los sedimentos tanto de las formaciones carbonatadas como no carbonatadas de la Sierra del Rosario, al menos hasta donde alcanzan las aguas, sugiere que la fuente de sulfato la constituyen las piritas, las que al reducirse originan el H_2S . El relativamente alto contenido de este gas en las aguas pudiera deberse a que las mismas alcanzan la falla Pinar donde interactúan con los esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano antes de surgir por los manantiales. Como se hace referencia en la literatura, los esquistos son ricos en piritas (APPELO; POSTMA, 1993). Sin embargo, las propias calizas de la Fm. Artemisa son fétidas (huelen a sulfhídrico cuando se les tritura) y pueden tener H_2S ocluido, tal como fue demostrado por ÉMBIL (1947). Otra fuente de este gas pudiera atribuirse a la propia materia orgánica presente en los sedimentos. Para esclarecer el origen del sulfhídrico en estas aguas será necesario aplicar técnicas isotópicas en el futuro.

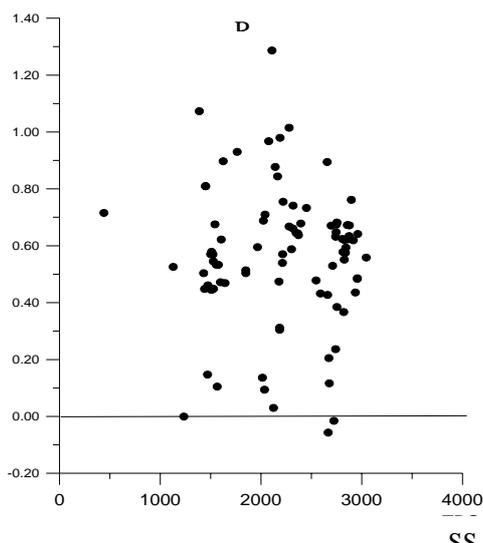


Figura 4.4 -Valores de RSC en función de los SST. Flujos intermedios y regionales que drenan calizas de la Fm. Artemisa e interactúan con otras litologías

Los procesos microbiológicos que producen CO_2 , reducción de sulfato y oxidación de piritas son más intensos en los flujos intermedios y regionales, originando una disolución adicional de minerales carbonatados. La posición que ocupan los diferentes tipos de aguas en el diagrama de estabilidad Eh-pH se muestra en la figura 5. Mientras que los flujos locales aparecen distribuidos en el campo de estabilidad del SO_4^{2-} , los flujos intermedios y regionales aparecen en los campos de Fe_2S , H_2S y HS^- .

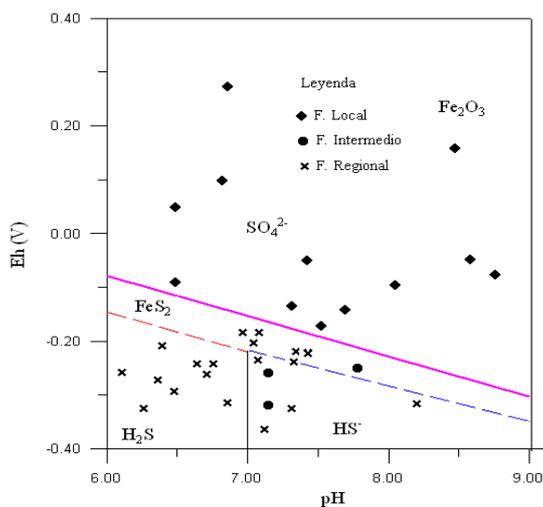


Figura 5 - Diagrama de estabilidad Eh-pH

Origen de la composición química del agua

Mediante la aplicación de la modelación hidrogeoquímica (FAGUNDO SIERRA et al., 2001), se determinó que los principales procesos geoquímicos que explican la composición química del agua que circula por carbonatos son: disolución congruente de calcita, dolomita y halita, y en menor medida, disolución incongruente de albita y microclino. Los procesos redox observados implican oxidación de pirita y reducción parcial de sulfatos; así como procesos de generación biogénica de CO₂ y de precipitación de sílice, especialmente en la zona más profunda.

Los principales procesos geoquímicos que explican la composición química del agua que circula por formaciones silíceas son: disolución de serpentina, albita, microclina y anorthita, así como disolución de halita y oxidación de pirita. La serpentina intemperiza en mayor proporción en la zona menos profunda de las fracturas en las rocas ultrabásicas y en la más profunda de las desarrolladas en areniscas. Por el contrario, el intemperismo de los silicatos es más intenso a mayor profundidad, donde tienden a ser más

intensos los procesos geoquímicos formadores de SO₄²⁻ y H₂S en las zonas intermedia y profunda. El sistema hidrotermal más típico de la región es el de San Diego de los Baños–Bermejales (30-46 °C). La composición química del agua mineral del sistema se origina mediante un proceso de mezcla de tres miembros extremos de composición HCO₃-Ca, HCO₃-Na y SO₄-Ca (FAGUNDO et al., 2001a), procedentes los dos primeros de flujos desarrollados en caliza y meta-sedimentos, respectivamente, y un tercero derivado posiblemente de la sierra vecina, Los Organos, que está representada por un flujo de agua más mineralizado y caliente que el regional arriba descrito. Esta mezcla produce modificaciones en la composición química (Figura 6) debido a procesos geoquímicos complejos, principalmente: disolución de halita y dolomita, precipitación de calcita, transferencia de masa entre caolinita y albita y caolinita y microclina, oxidación de pirita, reducción de sulfato, formación de azufre a partir de H₂S, precipitación de cuarzo y liberación de CO₂ al medio. Es menos frecuente encontrar disolución de calcita y disolución incongruente de albita y microclino.

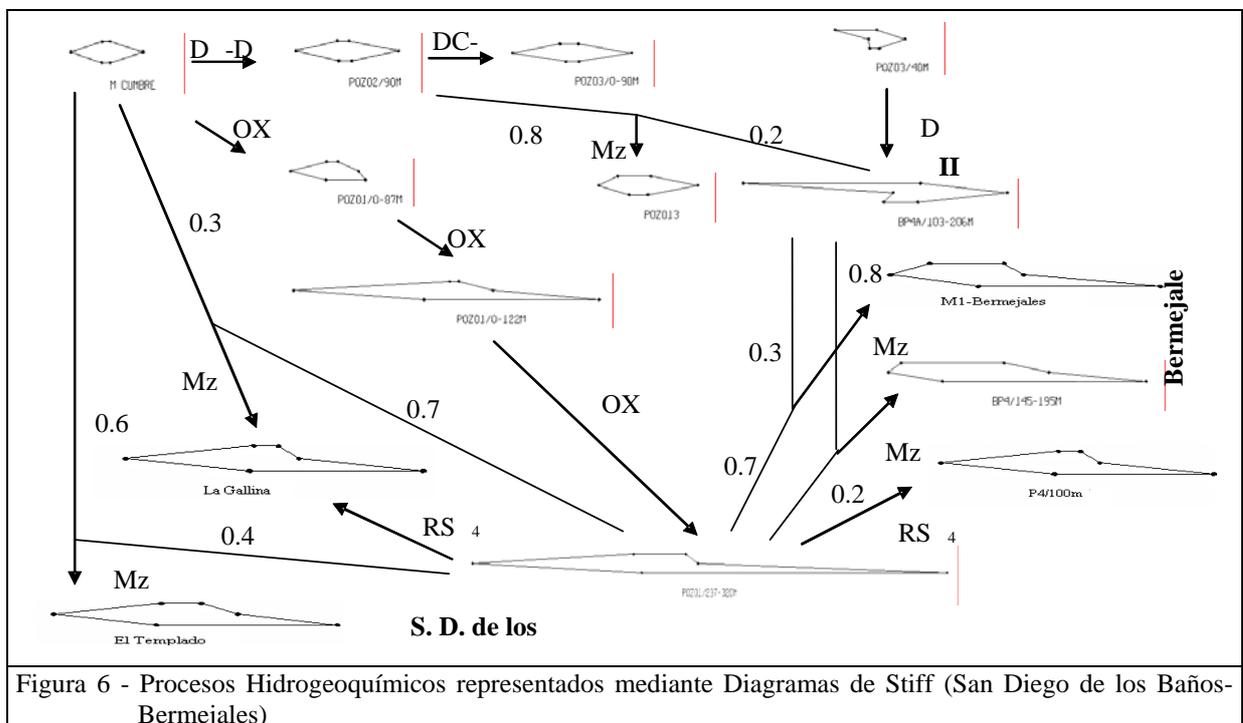


Figura 6 - Procesos Hidrogeoquímicos representados mediante Diagramas de Stiff (San Diego de los Baños-Bermejales)

Variación de la temperatura y la mineralización

La temperatura del agua depende de las condiciones climáticas y geotermales de la región, así como de la capacidad del flujo de agua de transportar el calor. La temperatura de las

aguas subterráneas ha sido usada como un indicador del tipo de flujo (TÓTH, 1995; CARRILLO-RIVERA et al., 1996) lo cual ha permitido asociar las aguas subterráneas con temperaturas anormalmente altas con flujos

regionales, y las bajas temperaturas con flujos de naturaleza local. La temperatura del agua subterránea y los resultados de los análisis químicos de las muestras, cuando se relacionan con el cuadro geológico, sugiere un control de la litología y de la estructura geológica sobre la composición física y química observada.

Desde la perspectiva del movimiento del agua subterránea, los sistemas kársticos en Cuba son muy dinámicos en términos de tiempo de recorrido, lo cual implica un flujo rápido y baja capacidad de almacenamiento. Esto se refleja localmente por la producción de contrastantes cambios en la temperatura estacional de este tipo de fuente (grupo 3). Se observa así temperaturas en las aguas entre 18 a 24,2 °C entre el invierno y el verano respectivamente en las aguas que drenan las calizas de la Fm. Guajaibón. Esta diferencia de temperatura es más drástica en las aguas que drenan los sedimentos de la Fm. Manacas, donde se han reportado valores desde 17,8 hasta 28,4 °C (FAGUNDO et al., 1993), lo cual sugiere un menor tiempo de residencia y de capacidad de almacenamiento que la Formación Guajaibón.

Un comportamiento similar se observa en las aguas someras que drenan los sedimentos ultrabásicos (grupo 2) y el resto de las formaciones calcáreas (grupos 4 y 5). Las que alcanzan mayores profundidades en su recorrido subterráneo presentan, por lo general, mayores temperaturas en las emergencias que las aguas subterráneas someras. Sin embargo, en las aguas que tienen un recorrido intermedio (grupo 6), no se distingue una dependencia marcada de la temperatura con la profundidad, por lo que es más útil utilizar la temperatura media de los meses más fríos en Cuba (noviembre-marzo) que la temperatura absoluta para inferir el carácter

más profundo del agua (FAGUNDO et al., 1997). Otro método complementario consiste en tomar el valor del coeficiente de variación de la temperatura (Tabla 3), el cual es más pequeño en aquellas aguas que alcanzan mayores profundidades y por tanto se encuentran menos sometidas a la acción del ciclo hidrológico.

Tabla 3 - Fluctuación estacional de la temperatura y de los minerales disueltos (SST) en algunas aguas de la Sierra del Rosario.

| N° | Grupo | N | T | VC _T | SST | VC _{SST} |
|----|-------|----|------|-----------------|------|-------------------|
| 1 | 2 | 28 | 23,3 | 9,0 | 407 | 26,4 |
| 2 | 3 | 39 | 22,6 | 1,9 | 271 | 14,0 |
| 3 | 3 | 38 | 22,7 | 1,1 | 305 | 13,1 |
| 4 | 5 | 18 | 22,7 | 0,9 | 438 | 7,7 |
| 5 | 9 | 30 | 45,8 | 0,5 | 2811 | 3,2 |

1: Sumidero Mamey (No 3 en Tabla 1)
 2: Manantial Ancón (No 7)
 3: Resurgencia Canilla (No 7)
 4: Manantial Mil Cumbres (No 10)
 5: Pozo P-1 (No 16)
 N: Numero de datos
 T: Temperatura media anual (°C)
 SST: Valor medio de los sólidos solubles totales (mg/L)
 VC: Coeficiente de variation (%)

La mineralización de las aguas en las emergencias depende de la litología drenada, del tiempo de residencia, de la profundidad que alcanza el agua subterránea y de las condiciones en que el CO₂ es disponible por el agua en el acuífero (condiciones de sistema abierto, cerrado o mixto). A medida que el agua alcanza una mayor profundidad y sigue una trayectoria subterránea más larga, incrementa su contenido de minerales y gases disueltos (Tabla 4)

Tabla 4. Variación algunas propiedades físico-químicas de las aguas del pozo P-1 (San Diego de los Baños) con la profundidad (PELÁEZ et al., 1990).

Tabla 4. Variación algunas propiedades físico-químicas de las aguas del pozo P-1 (San Diego de los Baños) con la profundidad (Peláez and others, 1990).

| Intervalo de profundidad (m) | T (°C) | CO ₂ | H ₂ S | SiO ₂ | SO ₄ ²⁻ | SST |
|------------------------------|--------|-----------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------|
| | | | | | | |
| 0 - 87 | 26,0 | 10,0 | 0,0 | 14,0 | 156,0 | 440,0 |
| 80 - 120 | 31,0 | 22,0 | 9,0 | 18,1 | 732,5 | 1376 |
| 120 - 200 | 36,2 | 22,0 | 9,0 | 20,0 | 1058,1 | 1870 |
| 240 - 280 | 44,0 | 27,0 | 28,5 | 24,0 | 1731,0 | 2955 |
| 237 - 320 | 46,0 | 38,0 | 39,7 | 26,7 | 1972,0 | 3331 |

En la tabla 4, se observa como varía la temperatura y algunos contenidos iónicos y gaseosos en las aguas del pozo P-1, localizado en

las cercanías del Balneario San Diego de los Baños. Las aguas que proceden de mayor profundidad (237-320 m), al arribar a la

superficie experimentan una apreciable variación de su temperatura (46,0 °C) y contenidos de dióxido de carbono (38,0 mg/L), sulfuro (39,7 mg/L), sílice (39,7 mg/l), sulfato (1972.0 mg/l) y SST (3331 mg/L) con respecto a las aguas superficiales de 26,0 °C y 10,0, 0,0, 14,0, 156,0, 440 mg/L, respectivamente.

En general, estas aguas al salir a la superficie pierden parte de los gases disueltos, experimentando cambios en el pH y el potencial de oxidación-reducción, originándose recombinaciones iónicas y precipitación de minerales, lo que da lugar a una disminución de su mineralización original.

Las aguas termales que emergen cerca de la falla Pinar poseen contenidos apreciables de fluoruro, litio, estroncio y radón, mayores en los manantiales del balneario San Diego de los Baños que en los manantiales de Los Bermejales. Estos resultados son coherentes con los obtenidos aplicando geotermómetros químicos (FAGUNDO et al, 2001).

CONCLUSIONES

El procesamiento mediante modelos estadísticos, químico-físicos e hidrogeoquímicos de 376 datos de análisis químico de aguas muestreadas en la Sierra del Rosario entre 1984 y 2004, permitió establecer el comportamiento geoquímico de 9 grupos de aguas seleccionados previamente sobre la base de los diferentes medio ambientes geológicos drenados. Las características de los diferentes flujos (locales, intermedios y regionales) y sus interacciones con los materiales acuíferos (calizas, rocas ultrabásicas y esquistos y areniscas) fueron interpretadas a partir de los parámetros químico-físicos y otros índices geoquímicos relacionados con el equilibrio de las aguas respecto a los minerales calcita, dolomita y yeso.

En general, se encontró que las aguas de corto recorrido (flujos locales), poseen en sus emergencias temperaturas frías, un ambiente oxidante (altos valores de Eh y O₂ disuelto), pH neutro (carbonatos) o alcalino (rocas ultrabásicas, esquistos y areniscas), bajo contenido de CO₂ y de minerales disueltos, así como ausencia de H₂S. Durante el año las aguas suelen estar unas veces insaturadas con respecto a la calcita y la dolomita (períodos lluviosos), mientras que en otras ocasiones se encuentran saturadas con respecto a la calcita y la dolomita (períodos secos).

Las aguas con un más largo y profundo recorrido subterráneo (flujos regionales), por el contrario, poseen en sus emergencias temperaturas relativamente altas, un ambiente reductor (bajos valores de Eh y O₂ disuelto), un pH ácido o neutro, elevados contenidos de gases disueltos (CO₂, H₂S, Rn), así como de macro (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, SiO₂) y microcomponentes (F, Li, Sr), cuyas proporciones recíprocas varían en dependencia del material acuífero y de las capas menos permeables con las cuales interactúan. Tienen a encontrarse saturadas o sobresaturadas con respecto a la calcita y la dolomita y cerca de la saturación respecto al yeso.

Las aguas con un recorrido de extensión y profundidad intermedio entre las dos anteriores (flujos intermedios) poseen parámetros químico-físicos e índices geoquímicos cuyas magnitudes son intermedias entre ambos tipos de aguas.

Todas las aguas procedentes de diferentes tipos de acuíferos en la Sierra del Rosario, que emergen desde diferentes profundidades son de origen meteórico.

Mediante la metodología empleada quedó demostrado, que en la Sierra del Rosario, la litología y estructura locales, controlan el modo en que las aguas adquieren su composición química.

REFERENCIAS

- APPELO, C.A.J.; POSTMA, D. **Geochemistry, Groundwater and Pollution**: Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1993.
- APHA **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 17 ed: APHA, AWWA, WPCF. Washington, 1989.
- CARRILLO-RIVERA, J.J.; CARDONA, B.; MOSS, D. Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrogeochemical approach in the valley of San Luis Potosí, México. **Journal of Hydrology**. n 185: p 23-44, 1996.
- ÉMBIL, J. El ácido sulfhídrico de las aguas medicinales de San Diego de los Baños y su posible relación con las calizas fétidas de donde brotan. **Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas**, Año I, n 4, 17-20, 1947.
- ERGOROV SV, LUEGE, JR. (1967) Hidrogeología de Cuba. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos e Instituto Cubano de Recursos Minerales. La Habana.
- FAGUNDO, J.R.; RODRÍGUEZ, J.E.; PAJÓN, J.M.; FRANCO, E.; BENÍTEZ, G.; RODRÍGUEZ, A.C.; GÜERÓN, J.; ABELLÓ, I. **Caracterización hidroquímica de las aguas del Pan de Guajaibón y otras áreas cársicas cercanas a la Sierra del Rosario**. Libro de Comunicaciones. Ed.: Univ. Jaume I, Castellón (España): 43-53, 1993.
- FAGUNDO, J.R.; RODRÍGUEZ, J.E. Contribución al conocimiento hidrodinámico de los sistemas cársicos del Pan de Guajaibón y la meseta del Guaso a partir de datos hidroquímicos durante las crecidas. En: **El Karst y los acuíferos Kársticos, ejemplos y métodos de estudio**. Ed.: A. Pulido-Bosch, J.R. Fagundo J. Rodríguez, Univ. Granada (España), p 119-135, 1995.
- FAGUNDO, JR.; RODRÍGUEZ, JE.; FERRERA, V.; GONZÁLEZ, P. Geoquímica de acuíferos cársicos de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. En: Arellano, DM y Gómez-Martín, Ed. **Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba**: LANKOPY, SA, Bilbao (BI-2133-97). p 135-149, 1997.
- FAGUNDO, J.R.; RODRÍGUEZ, J.E.; VEGA, J., PAJÓN, J.E. Estudio del desarrollo de la carsificación a partir de las respuestas naturales en las emergencias. En: **Memorias Geología y Minería'98**. Ed.: Centro Nacional de Ingeniería Geológica, I.G.P., La Habana, p 215-218, 1998.
- FAGUNDO, J.R.; GONZÁLEZ, P.; SUÁREZ, M.; FAGUNDO-SIERRA, J.; SÁNCHEZ, L.; PEÑA, B.; MELIÁN, C. Origen de la composición química de las aguas del sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Los Bermejales, Pinar del Río. En: **Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente**: ISCTN, La Habana. ISBN 959-7136-13-9, 2001a.
- FAGUNDO, J.R.; GONZÁLEZ, P.; SUÁREZ, M.; SÁNCHEZ, L.; PEÑA, B. Estimación de la temperatura de los acuíferos profundos del Sistema Hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales. IV Congreso de Geología y Minería, Ingeniería Geológica e Hidrogeología, **Memorias GEOMIN 2001**, ISBN 959-7117-10-X, 10 pp, 2001b.
- FAGUNDO J.R.; GONZÁLEZ, P.; SUÁREZ, M.; FAGUNDO-SIERRA, J.; MELIÁN, C.; ALVAREZ, E. **HIDROGEOQUIM**. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. Vol. 6 ISBN 959-7136-24-4, 2005.
- FAGUNDO-SIERRA, J.; FAGUNDO, J.R.; GONZÁLEZ, P.; SUÁREZ, M. **Modelación de las aguas naturales**. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. v 2: ISCTN, La Habana 2001. ISBN 959-7136-13-9, 2001.
- FRANCO, E.; FAGUNDO, J.R.; PAJÓN, J.M.. 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**, n 11, 17 pp, 1987.
- GONZÁLEZ, P.; SUÁREZ, M.; BENÍTEZ, G.; RAMÍREZ, J.; FAGUNDO, J.R. **Caracterización de aguas minerales de algunos yacimientos del país**. Le Monde du Thermalisme. Ed. L'Organisation Mondiale du Thermalisme (O.M.Th). París (Francia), p 14-15, 2000.
- GONZÁLEZ, P., LLERENA, M.; SUÁREZ, M.; FAGUNDO, J.R.; MELIÁN, C.; LUNA, B.; HERRERA, I. **Sectorización de las aguas naturales y mineromedicinales de las montañas de la Sierra del Rosario y las Alturas del Mariel**. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. v 2: ISCTN, La Habana 2001. ISBN 959-7136-13-9, 2001.
- KRAWCZYK, W. **Methods of field analytic of karst water**. In: **Hydrochemical methods in dynamic geomorphology**. Scientific Works of Silesian University in Katowice, Katowice, (1254), p 65-83, 1992.
- PELÁEZ, R.; OLIVARES, M.; NÚÑEZ, M. del C.; VALDIVIA, M. **Informe sobre la búsqueda detallada y exploración orientativa de las aguas minero-medicinales San Diego Bermejales**. Ministerio de la Industria Básica, Centro Nacional del Fondo Geológico, La Habana, Cuba. 159 p, 1990.
- PEÑA, B.; FAGUNDO, J. R.; DELGADO, F.R., ORBERA, L. Caracterización de fuentes minerales en el Distrito Físico Geográfico Pinar del Río, Cuba. IV Congreso de Geología y Minería, Ingeniería Geológica e Hidrogeología, **Memorias GEOMIN 2001**, ISBN 959-7117-10-X, 9 pp, 2001.
- PSZCZOLKOWSKI, A. (1978). Geosynclinal Sequences of the Cordillera de Guaniguanico in

Western Cuba, their Lithostratigraphy, Facies Development and Paleogeography. *Acta Geológica Polónica*, 28 (1): 1-96.

PULINA, M.; FAGUNDO, J.R. **Tropical karst and chemical denudation of western Cuba**. *Geographia Polonica* (Warsow) n 60, p 195-216, 1992.

RODRÍGUEZ, J.E.; FAGUNDO, J.R.; CUTIÉ, F., CRUZ, C.; FRANCO, E. **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, La Habana, 60 pp, 1989.

RODRÍGUEZ, J.E.; J.R. FAGUNDO, 1995, **Hydrology and dynamics of tropical karst processes in Cuba**. *Studia Carsologica* (Brno) n 6, p 42- 54.

TRELLES, F. **Análisis de algunas de las aguas minero-medicinales cubanas estudiadas por este Instituto**. *Archivos del Instituto de Hidrología, Climatología Médicas*, Año 2, n 2, p 171-184, 1948.

TÓTH, J. **Groundwater as a geological agent. An overview of the causes, processes and manifestations**. *Hydrogeology Journal* n 7, p 1-14, 1995.