

PARTICULARIDADES DEL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS DE PEQUEÑAS CUENCAS DE MONTAÑA CÁRSICAS EN EL TRÓPICO HÚMEDO: EL SISTEMA HIDROLÓGICO DE LA GRAN CAVERNA DE SANTO TOMÁS, PINAR DEL RÍO, CUBA

Leslie F. Molerio León

Ex Vice-Presidente Primero de la Sociedad Espeleológica de Cuba
 Consultor en Ingeniería Ambiental y Gestión de Recursos Hídricos
 Apartado 6219, CP 10600, Habana 6, La Habana, Cuba
 Apartado 0834-02235 Zona 9-A, Ciudad de Panamá, Panamá
 Email: especialista@principal@gmail.com

RESUMEN: La gestión eficiente de los recursos hidráulicos de las montañas cársicas del Trópico Húmedo debe basarse en el conocimiento adecuado de las características hidrogeológicas especiales de estos sistemas de flujo. Las aguas terrestres suelen estar compartidas por varias comunidades rurales y sostienen un ecosistema subterráneo frágil, vulnerable y desbalanceado, estresado por varios elementos externos. Esta contribución describe las características hidrológicas más importantes de estas montañas cársicas en el ejemplo del Sistema Cavernario Santo Tomás, 200 km al Oeste de La Habana, capital de Cuba, el mayor sistema cavernario de Cuba con 47 km de galerías subterráneas conectadas y un grupo de cuevas aún no conectadas directamente.

. Las aguas terrestres suelen estar compartidas por varias comunidades rurales y sostienen un ecosistema subterráneo frágil, vulnerable y desbalanceado, estresado por varios elementos externos. Esta contribución describe las características hidrológicas más importantes de estas montañas cársicas en el ejemplo del Sistema Cavernario Santo Tomás, 200 km al Oeste de La Habana, capital de Cuba, el mayor sistema cavernario de Cuba con 47 km de galerías subterráneas conectadas y un grupo de cuevas aún no conectadas directamente.

PALABRAS CLAVE: karst, trópico húmedo, Cuenca de montaña, cueva, Cuba, Sistema Cavernario Santo Tomás.

ABSTRACT: The efficient management of the water resources of the karst mountains of the Humid Tropics of the Caribbean has to be based in the proper knowledge of the special hydrogeologic characteristics of these flow systems. The terrestrial waters are shared by several rural communities and support a fragile, vulnerable and locally unbalanced underground ecosystem stressed by several external elements. This contribution describes the most important hydrological features of these karst mountains in the example of the Santo Tomas Cave System, 200 km West of La Habana, capital of Cuba, the largest cave system of the country with almost 47 km of connected subterranean galleries and several caves not yet connected by the speleological explorations.

KEY WORDS: karst, humid tropics, mountain watershed, cave, Cuba, Santo Tomás Cave System.

INTRODUCCIÓN

A casi doscientos kilómetros al Oeste de Ciudad de La Habana se encuentra la Sierra de Quemado, uno de los sistemas montañosos cársicos más famosos de Cuba. Es un sistema cársico epigenético constituido por rocas

carbonatadas del Jurásico superior - Cretácico inferior en contacto con sedimentos no carbonatados del Jurásico inferior (Fig. 1). La formación Guasasa es la unidad litoestratigráfica carbonatada en que se desarrollan las paredes escarpadas de los mogotes que a veces presentan, en la base, una pendiente más suave que suele corresponderse con la unidad formacional de Jagua. Las series no carbonatadas constituyen, en esencia, un



Fig. 1. Mapa de localización de la Gran Caverna de Santo Tomás.

complejo metacarbonatado terrígeno denominado Formación San Cayetano, compuesto por pizarras, aleurolitas, esquistos y areniscas. Los sedimentos más jóvenes son del Paleógeno. Sin embargo, es típico el solapamiento cronoestratigráfico debido a la estructura de mantos de sobrecorrimiento que caracteriza la región (Fig. 2) y que, originalmente fuera descrita por R.H. Palmer en 1940 (Furrazola et al, 1978; Psczolkowski, 1987; Piotrowska, 1972, 1987; Acevedo y Molerio, 1982).

Los fondos del valle de Santo Tomás y sus tributarios están rellenos por sedimentos terrígenos aluviales, fundamentalmente arcillas y arenas derivadas de las rocas de la Fm. San Cayetano, que alternan con limos y depósitos lacustres desarrollados como consecuencia de la evolución hidrológica del valle –que incluye una o más fases lacustres- y por calizas resultado de la recesión de los escarpes calcáreos (Núñez, Panos y Stelcl, 1964; Panos v Stelcl. 1968a; Molerio. 2012). La superficie de fondo del valle es prácticamente horizontal v se

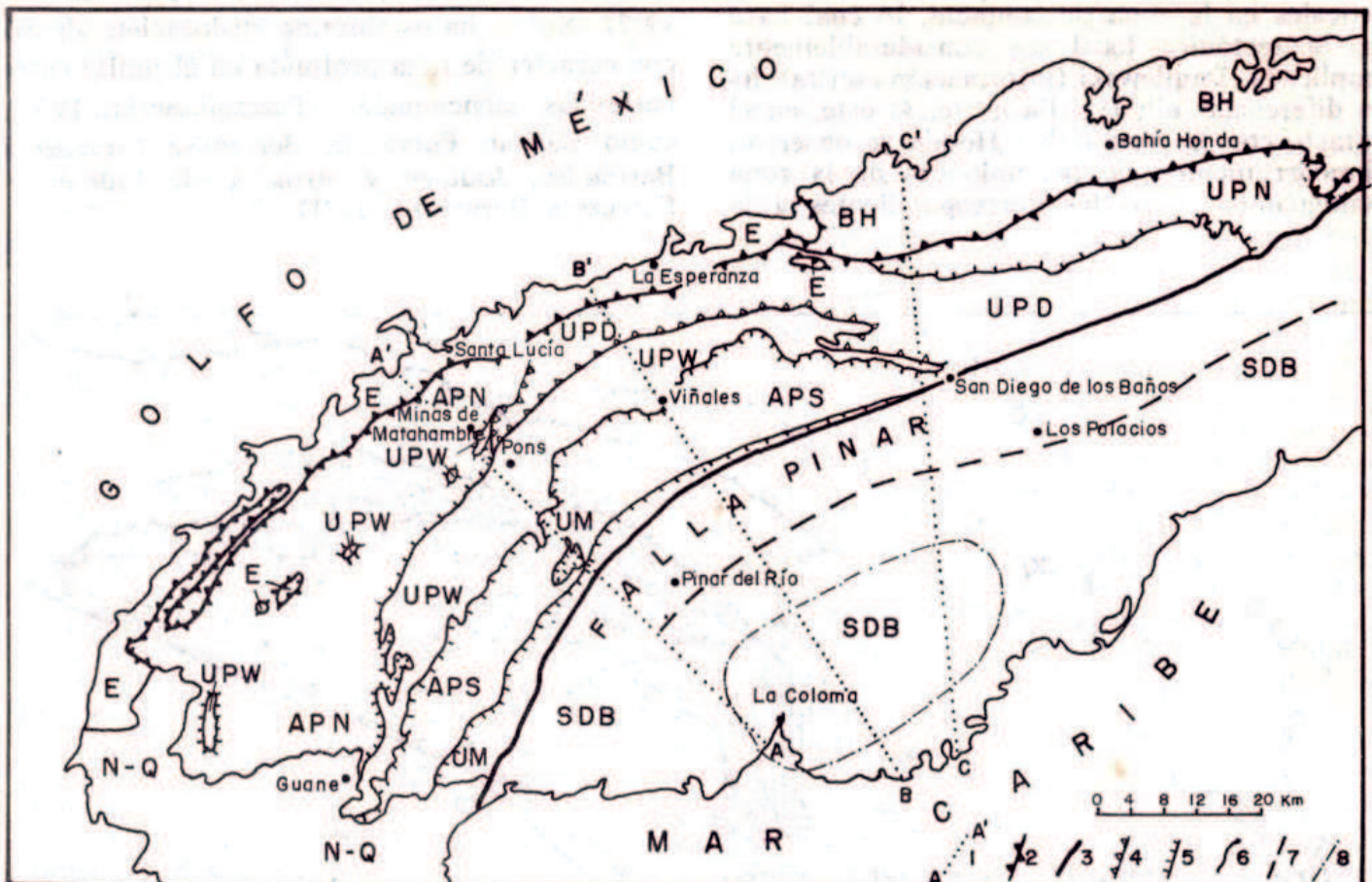


Fig. 2. Esquema general de situación geológica del territorio de la provincia de Pinar del Río según (Psczolkowski, 1987).

encuentra a una altitud promedio de 100 m sobre el nivel del mar, en tanto la cima de los mogotes alcanza cotas del orden de los 350 m. Por tal motivo, las paredes verticales (Fig. 3) se elevan unos 250 m sobre el fondo del valle, provocando una sorprendente morfología de elevaciones de paredes abruptas y cimas redondeadas que, en la toponimia cubana, se designan con el nombre de “mogotes” (Lehmann, 1953).



Fig. 3. Frente escarpado de la Sierra de Quemado a la altura del Sumidero del Arroyo Santo Tomás (Foto L. Molerio).

En la literatura geomorfológica clásica, estos relieves son comúnmente referidos como “carso de torres”, “turm-karst”, “hillstacks” o “kegelkarst” y durante muchos años fue considerada una morfología exclusiva del carso tropical. Formas similares se han reportado en China, Viet-Nam, Indonesia y Puerto Rico e, incluso en áreas que en la actualidad, no son tropicales, lo que constituye parte de una interesante controversia climamorfogenética de larga data sobre las características de la evolución de las formas cársicas tropicales (Lehmann, 1953; Panos y Stelcl, 1968a, 1968b).

Cinco pequeñas cuencas superficiales (la de los arroyos Santo Tomás, Bolo, Peñate, Arroyo de La Tierra y Los Cerritos) ingresan por sendos sumideros (ponores) en la vertiente oriental de las montañas calizas de la Sierra de Quemado y se unen subterráneamente en diferentes sectores del sistema de la Gran Caverna de Santo Tomás que, hasta ahora, es el mayor sistema cavernario de Cuba, con unos 47 km de galerías subterráneas comunicadas y varias decenas de cuevas no conectadas físicamente. El impresionante sistema de conductos subterráneos ha recibido la atención preferencial de los espeleólogos del país desde que en 1954 fuera explorada por la Sociedad Espeleológica de Cuba y cuya primera descripción general fue publicada al año siguiente (Núñez y Symington, 1955).

Durante casi 45 años los trabajos de Núñez lideraron las exploraciones en el sistema subterráneo y la historiografía de la Gran Caverna de Santo Tomás (Núñez, 1990a, 1990b; Suárez, 2004) reconoce en ese largo período varias etapas en el desarrollo del conocimiento de esta caverna que, sin embargo, adolece de una bibliografía publicada acorde con su importancia espeleológica (Núñez, 1955, 1956a, 1956b, 1967, 1990a, 1990b; Núñez & Symington, 1955; Martín y Jáimez, 1990; Aldana, 2004; Suárez, 2004). De manera independiente, a partir de la década de 1990 otros autores llevaron a cabo algunos estudios sobre temas específicos en el sistema cavernario o su entorno más inmediato (Díaz y Díaz, 1990; Guerra, 1995; Flores y Molerio, 1995; Parise y Valdés, 2005; Parise et al., 2004, 2005; Molerio 1995a, 1995b, 1995c, 2002, 2004a; Molerio y Sardiñas, 1995; Molerio et al., 1995; Molerio et al., 2007; Jáimez, 2004).

Este artículo pone en perspectiva los problemas básicos del aprovechamiento sustentable de los recursos hidráulicos en pequeñas cuencas de montaña cársicas del Trópico Húmedo, haciendo énfasis en las singularidades y particularidades de este particular contexto climático, hidrológico y geólogo-geomorfológico caracterizado por la fragilidad y vulnerabilidad natural y social de los ecosistemas de montañas cársicas. Toma el ejemplo del Sistema Hidrológico de la Gran Caverna de Santo Tomás en tanto desde el punto de vista hidrológico puede aislarse perfectamente, de manera que los estímulos y acciones exteriores sobre el sistema pueden medirse y conocerse con facilidad. Asimismo, buena parte del sistema subterráneo se integra físicamente. Como han demostrado la exploración espeleológica y la observación directa de su funcionamiento hidrológico es posible sistematizar los factores de control de la hidrodinámica biogeoquímica del territorio, distinguiendo aquellos factores catalizadores o de retardo en la distribución y calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

El conocimiento hidrológico de territorios de este tipo constituye el principal instrumento de gestión sostenible de sus recursos hidráulicos y, más allá, de todo su manejo y aprovechamiento ambiental. Las propiedades específicas de los sistemas cársicos como la heterogeneidad y anisotropía se muestran con particular intensidad en las zonas de montaña donde los errores de administración de los recursos naturales se magnifican de manera notable y alteran el frágil equilibrio de los ecosistemas y de los delicados nichos ecológicos subterráneos. Los efectos de la gestión deficiente o ineficiente de los recursos hidráulicos incrementan la vulnerabilidad social de comunidades predominantemente agrícolas y causan desbalances sociales, económicos y culturales especialmente importantes.

Un resumen de los problemas básicos de este tipo fue adelantado por el autor en una contribución al Simposio sobre Gestión del Agua en Espacios Protegidos Ecovida 2010, celebrado en el Parque Nacional Viñales, Pinar del Río, Cuba, en Noviembre 2010 y recientemente publicada (Molerio, 2013).

CONTEXTO HIDROAMBIENTAL

La región en su conjunto ha estado sometida a un fuerte estrés ambiental desde que a principios de 1960, la población campesina, antes dispersa, se concentrara en la comunidad de montaña de El Moncada (Fig. 4). Esta es una población de sustrato agropecuario que cuenta con servicios de infraestructura vial, hospitalaria, educacional, establecida en la parte alta de las cuencas de los ríos Santo Tomás, Bolo y Peñate, parcialmente sobre las rocas terrígenas de la Fm. San Cayetano, aguas arriba del sistema cavernario y colindando con la vertiente absorbente de la Sierra de Quemado.

En las cuencas que emergen, luego que los arroyos se unen subterráneamente bajo la Sierra de Quemado y descargan del otro lado de la montaña, en la vertiente occidental de la Sierra, existen viviendas dispersas de campesinos en los valles llamados de Isabel María y Quemado. Estos asentamientos al Oeste de la Sierra de Quemado poseen una infraestructura social y económica más modesta, de inferior eficiencia y menor carga contaminante que la de la población aguas arriba y, por su posición geográfica y la dependencia que tienen de las aguas superficiales y subterráneas para su consumo, reciben las cargas de nutrientes y contaminantes en general no tratados de la población asentada en la vertiente absorbente (oriental). Del mismo modo, sufren con mayor intensidad del déficit de agua derivado de la explotación de los recursos naturales aguas arriba, básicamente en la comunidad de El Moncada. El tratamiento y la disposición segura de las aguas residuales son totalmente inexistentes a ambos lados de la Sierra.

En ambas vertientes de la Sierra de Quemado la economía local se sustenta en el aprovechamiento agropecuario y, específicamente en el cultivo del café y frutos menores, ganadería menor y, más recientemente, la comunidad de El Moncada, se beneficia con el turismo.

De la vegetación indígena apenas quedan manifestaciones en las paredes de los mogotes, en algunas dolinas (denominadas localmente "hoyos") y en algunos bosques de galerías asociados a los cursos fluviales (Gerhartz y Abraham, 1991).

En la base de los mogotes se reconocen (Fig. 5) restos de un bosque semideciduo mesófilo representado por almácigos (*Bursera simaruba*), algarrobo cubano (*Samanea saman*), cedro (*Cedrela odorata*) y ceiba (*Ceiba pentandra*). Pero en las laderas verticales y en algunos fondos de dolinas en la cima de los mogotes, se encuentra alguna flora endémica o con rasgos de endemismo. Los individuos más representativos son la palma barrigona (*Gaussia princips*), el ceibón (*Bombax emarginatum*) y el guanito de sierra (*Thrinax microcarpa*) (Domínguez, et al., 1991). Contrastante en extremo es la vegetación de las Alturas de Pizarras, elevaciones constituidas por los sedimentos terrígenos de la formación San Cayetano. Este es el escenario donde crece un impresionante bosque aciculifolio de pinares que dan nombre a la provincia. Aquí se encuentran el pino hembra (*Pinus tropicalis*) y el pino macho (*Pinus caribaea*). En sectores muy apartados, aún se encuentran ejemplares de la palma de corcho (*Mycrocicas calocoma*) relictos de la flora Cuaternaria en peligro de extinción (Molerio, 1965).

En general, el contexto hidroambiental comprende un sistema de aguas terrestres compartidas que, al discurrir subterráneamente, soportan un ecosistema subterráneo frágil, vulnerable y, localmente, en desequilibrio con ciertos elementos de estrés provocados desde el exterior. Ellos, a su vez, repercuten en la salud ambiental de los habitantes en las cuencas receptoras.

El uso de algunas galerías subterráneas de la Gran Caverna de Santo Tomás como almacenes temporales o permanentes, su iluminación artificial parcial, la adaptación ingeniera de algunos sectores y la visita de numerosos exploradores ha provocado un importante desajuste en el ecosistema subterráneo, incrementando la vulnerabilidad de algunos sectores, cambios en los patrones de escurrimiento y, con ello, en las cadenas tróficas, migración de especies, incorporación de otras nuevas, modificación de senderos, y alteraciones en los patrones de luz, calor, humedad y circulación del viento que han conducido a la pérdida de estabilidad ecológica



Fig. 4. Vista general de la comunidad de El Moncada (Foto M. Condís)



Fig. 5. Bosque semideciduo mesófilo de la base de los mogotes.

El uso de algunas galerías subterráneas de la Gran Caverna de Santo Tomás como almacenes temporales o permanentes, su iluminación artificial parcial, la adaptación ingeniera de algunos sectores y la visita de numerosos exploradores ha provocado un importante desajuste en el ecosistema subterráneo, incrementando la vulnerabilidad de algunos sectores, cambios en los patrones de escurrimiento y, con ello, en las cadenas tróficas, migración de especies, incorporación de otras nuevas, modificación de senderos, y alteraciones en los patrones de luz, calor, humedad y circulación del viento que han conducido a la pérdida de estabilidad ecológica

del sistema subterráneo y a la modificación del hábitat subterráneo de numerosas especies cavícolas.

La problemática hidrológica del territorio se circunscribe, básicamente, al hecho de que las vertientes absorbentes de los mogotes son muy poco acuíferas. Aún cuando en ocasiones se encuentran “tanques”, es decir, almacenamientos locales y discontinuos, tienen posibilidades limitadas de explotación, toda vez que se asocian a galerías subterráneas cuya dependencia con respecto a la alimentación alóctona es muy elevada, por lo que suelen agotarse rápidamente en períodos normales de estiaje. La prospección de aguas subterráneas debe orientarse, por tanto, a las vertientes emisivas y en este caso, es promisoría la zona aguas arriba de El Moncada, que constituye la vertiente meridional -de descarga- de la Sierra del Infierno en los alrededores del sistema inundado de la Cueva de El Gato. La regulación artificial de las aguas superficiales en la cuenca superior del sistema cavernario y los cambios en el uso de la tierra han contribuido a agravar este problema.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LOS SISTEMAS DE MONTAÑAS CÁRSICAS DEL TRÓPICO HÚMEDO

Las montañas cársicas del Trópico Húmedo, las del Caribe y de Cuba en particular presentan las siguientes características (Lehmann, 1953, 1960; Sweeting, 1972; Jennings, 1971; Panos y Stelcl, 1968a, 1968b; Molerio 1981, 1995a, 2003, 2004a, 2004b; Molerio, Guerra y Flores, 1983; Molerio et al., 1995, 1996, 1997, 1998; Molerio y Flores, 2003):

- Su localización geográfica en un área de influencia de huracanes con típicas lluvias torrenciales de corta duración y elevada intensidad.
- Un drenaje superficial desarrollado en pequeñas cuencas donde las avenidas instantáneas o súbitas (flash-floods) constituyen la expresión distintiva de la respuesta del escurrimiento a los aguaceros.
- Una baja capacidad de almacenamiento de agua en la cuenca fluvial, donde los acuíferos granulares asociados son comúnmente de baja productividad o con recursos hidráulicos subterráneos prácticamente despreciables.
- Desarrollo de cursos fluviales subterráneos comúnmente dispuestos en niveles de cavernamiento superpuestos con un grado variable de integración pero en los que tienen lugar importantes modificaciones del escurrimiento superficial y subterráneo.
- Por lo común se reconocen una vertiente absorbente de los caudales fluviales superficiales y una vertiente emisiva (de descarga) de los caudales superficiales y subterráneos conjugados. Sobre las montañas, una zona de captación de caudales autógenos (o autóctonos) provenientes básicamente de las precipitaciones pluviales.
- Los hidrógrafos de tormenta muestran diferencias debidas a las modificaciones asociadas a las restricciones hidráulicas del curso subterráneo en el(los) sistema(s) cavernario(s), tales como estrechamientos y alargamientos de las galerías, lagos, cascadas, sinuosidad y desarrollo de meandros, laberinticidad, sifones y otras características morfológicas que actúan básicamente como retardadores de flujo. Por ello, los hidrógrafos de entrada (input) comúnmente de un solo pico de avenida, se transforman en la descarga en hidrógrafos de avenida de dos y hasta tres picos.
- En dependencia de la organización local de los cursos subterráneos y de la conexión entre los conductos, la capacidad de autodepuración del sistema cársico es muy variable. Mientras en algunos casos una buena re-aeración mejora la concentración de oxígeno disuelto aún en corrientes deprimidas en otros casos no ocurre modificación alguna, afectando negativamente la calidad de los recursos hidráulicos aguas abajo. De este modo, las comunidades situadas en las vertientes emisivas muestran una elevadísima vulnerabilidad a la contaminación.
- Casi todas estas cuencas cársicas están pobladas por comunidades rurales de bajo ingreso. Cuando la población se concentra aguas arriba de la vertiente absorbente de las montañas, las cargas de nutrientes derivados de los residuales domésticos prácticamente sin tratar o completamente crudos convergen a las corrientes fluviales que penetran en el macizo cársico y se transportan bajo tierra hacia las vertientes emisivas o circulan o se retienen en las galerías subterráneas.
- En el caso particular del karst de torres (mogotes) del área estudiada en este artículo, como en otras áreas semejantes como el Cockpit de Jamaica, los sistemas de tipo Goeneng Sewu de Java o los Fenglin de China meridional, las cimas de las montañas están deshabitadas a diferencia de los valles fluvio-cársicos que las colindan y al pie de las elevaciones (o en los poljes y dolinas entre montañas). Por ello, las vías fundamentales de contaminación son los cursos de agua horizontales o sub-horizontales (concentrados o difusos) que penetran en los sistemas de cavernas y no la recarga vertical desde las cimas de las elevaciones que, por el contrario, suele contribuir a mejorar la calidad de las aguas en el balance total.

EL SISTEMA CAVERNARIO DE SANTO TOMAS Y SUS CUENCAS TRIBUTARIAS

El Sistema Cavernario Santo Tomás es un sistema de 47 Km de galerías interconectadas físicamente por la exploración espeleológica (Fig. 6). Las relaciones hidráulicas se muestran en la Fig. 7, pero ensayos con trazadores (Molerio, 2004a) mostraron que esta cifra puede duplicarse (Fig. 8).



Fig. 6. Vista general de los pasajes interconectados del sistema Cavernario de Santo Tomás (Cortesía de Hermes Farfán).

Contexto Hidrológico Regional

Como se ha señalado, hacia la vertiente oriental de la Sierra de Quemado confluyen cinco pequeñas cuencas superficiales (Santo Tomás, Bolo, Peñate, Arroyo de La Tierra y Los Cerritos), que ingresan por sendos sumideros.

Por la exploración espeleológica se conoce que los arroyos Santo Tomás, Peñate y Bolo (Figs. 9 y 10) se

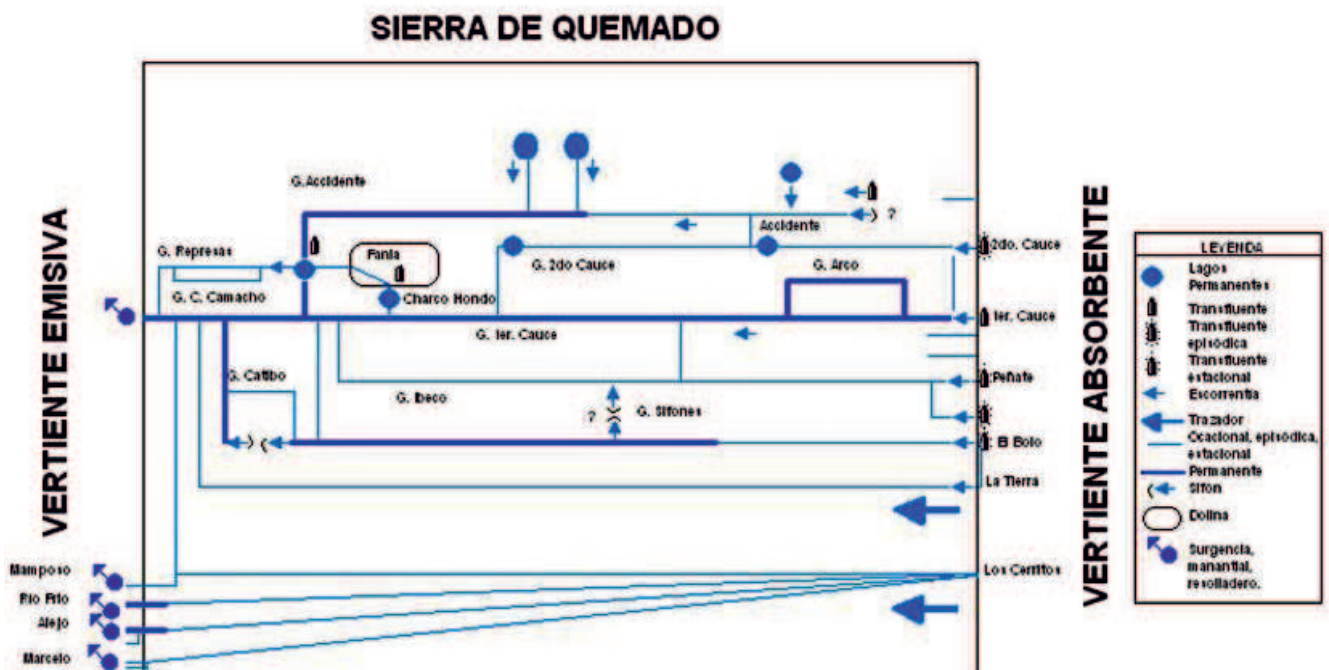


Fig. 7. Relaciones hidráulicas entre los sistemas de flujo absorbentes y emisivos de la Sierra de Quemado (esquema elaborado por H. Farfán).



Fig. 9. Sumidero del Arroyo Santo Tomás. Obsérvese el claro patrón de agrietamiento en la bóveda de la sección de galería erosiva mixta del tipo de conducción forzada y gravitacional con un fuerte relleno pavimentario de cantos rodados. Estos sedimentos aluviales están básicamente formados por los sedimentos metacarbonatado terrígenos de la formación San Cayetano y se mezclan con cantos, menos

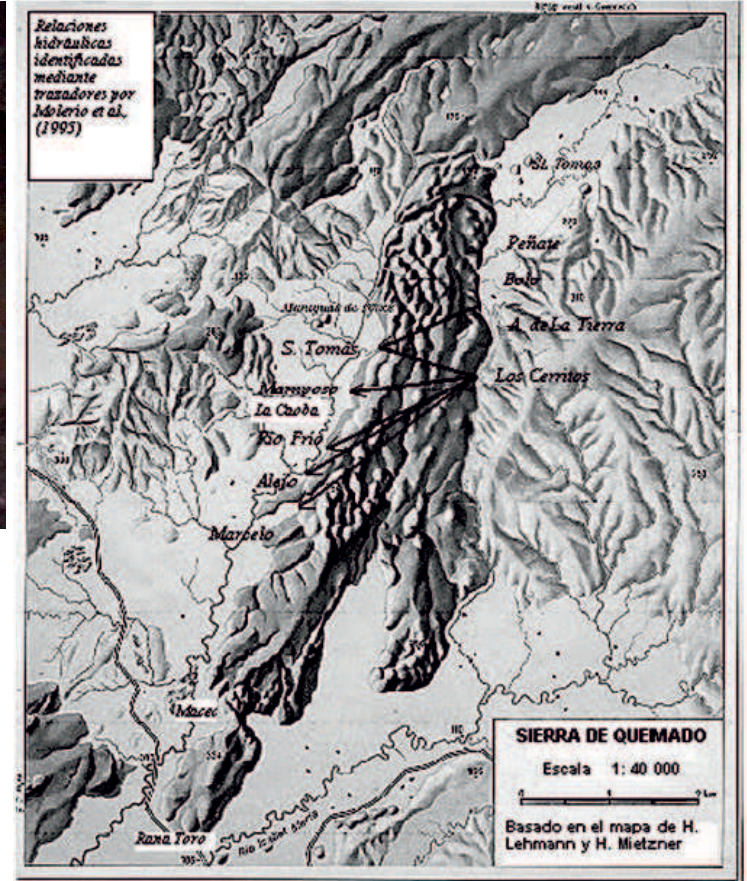


Fig. 8. Conexiones hidráulicas establecidas durante la campaña de trazadores de 1994 (según Molerio, 2004a). Destacadas en saetas negras desde los puntos de inyección en la vertiente oriental hasta los de descarga en la vertiente occidental.

Fig. 10. Sumidero del Arroyo Peñate, en el que se nota la morfología de erosión antigua enmascarada por procesos de revestimiento litoquímico, incluso, sobre sedimentos clásticos. El nicho inferior asociado al nivel de flujo actual está re excavado sobre los sedimentos del cauce y, en las paredes, se notan numerosas formas de erosión del tipo de scallops indicadoras de un fuerte régimen turbulento de circulación de las aguas (Foto del Autor).

unen en el interior de la Sierra de Quemado formando el sistema local de flujo de la Gran Caverna de Santo Tomás.

Las relaciones hidráulicas varían en el tiempo dependiendo básicamente de las condiciones de organización del escurrimiento superficial aguas arriba. Este sistema de flujo integrado tiene casi 50 km de galerías subterráneas comunicadas físicamente y varias decenas de cuevas no conectadas por la exploración espeleológica directa.

En la vertiente occidental de la Sierra de Quemado otros cinco sistemas egresan; a saber: los arroyos Santo Tomás, Mamposo, Río Frío, Alejo y los dos manantiales de Marcelo (1 y 2). Las conexiones hidráulicas entre Los Cerritos y Arroyo de La Tierra, con Santo Tomás y los manantiales de río Frío y Marcelo 1 y 2 fueron identificadas mediante un ensayo múltiple de trazadores fluorescentes y salinos.

Condiciones de absorción

La absorción principal es la alóctona a través de los sumideros (ponores) de las corrientes fluviales mencionadas, y se realiza por la vertiente absorbente (Fig. 11), ubicada al este de la sierra, una característica muy peculiar, ya que en el resto de los macizos de la Sierra de los Órganos, esta vertiente absorbente se encuentra al sur o al norte. En ésta se desarrollan las redes fluviales de las cinco subcuencas del tipo dendrítico asimétrico de los arroyos de Santo Tomás, Bolo, Peñate, de la Tierra y Los Cerritos.

Las redes fluviales nacen en las alturas pizarrosas y cortan transversalmente el polje marginal o de contacto que se desarrolla en toda la zona de articulación entre las calizas y las series terrígenas. En la parte alta de la subcuenca del arroyo de Santo Tomás, se aprecian rasgos marcados de fluvio-carso combinando los efectos de la erosión fluvial y los procesos de carsificación, de tal modo que la red fluvial se ha establecido solamente en dirección longitudinal a lo largo del contacto entre éstas.

La recarga autóctona es menos significativa, aunque en épocas de lluvias se activan conductos que



Fig. 11. Vista parcial de la vertiente absorbente de la Sierra de Quemado
(Foto del Autor)

presentan una rápida respuesta ante el estímulo. Mediante balance de cloruros se ha definido que la tasa de recarga anual para el sistema puede ser tan alta como del 90 % de la lluvia media anual, con un mínimo del orden del 70% que, en cualquier caso, representan valores elevados pero que pueden explicar el desarrollo de fenómenos internos de mezcla de aguas autóctonas y alóctonas y el de la variedad de espeleotemas y el notable revestimiento secundario que exhibe el sistema subterráneo.

Condiciones de conducción

Las formas de conducción son predominantemente del tipo directas, absorbentes, y transfluentes, con patrones individuales ramificados por niveles, y algunos con laberintos sobreimpuestos, con una densidad de conductos del orden de 1,36 Km/Km², ocupando solo aproximadamente el 34,04 % del área del macizo¹.

La Gran Caverna de Santo Tomás, presenta un nivel de cavernamiento hidrológicamente activo, dos niveles de funcionamiento estacional, ocasional y/o episódico (trop-pleins), y cuatro niveles fósiles. En los niveles estacionales del sistema, se aprecian varios lagos permanentes de caudal predominantemente autóctono, aunque algunos son aguas estancadas que no se infiltran hacia las zonas de drenaje más profundas, producto a la capa de sedimentos impermeables que se encuentran en su fondo, provenientes del arrastre de las corrientes alóctonas hacia la cueva. Otros pueden estar vinculados a fuentes de drenaje profundo asociadas a sistemas de flujos intermedios o regionales.

En la Gran Caverna de Santo Tomás, se encontraron valores de sinusidades entre el rango de 1,06 a 1,29, con una media de 1,15 muy similar al rango de valores encontrado por Worthington (1991), lo que evidencia la transfluencia de las redes de drenaje del sistema, y una tendencia a desarrollarse con conexiones muy directas entre sus entradas y salidas. Los valores del coeficiente de no linealidad, como es lógico, son muy cercanos a la unidad. Los altos valores de dicho coeficiente se relacionan con bajos valores de velocidad en conductos y bajos valores del Índice de Excavación.

Los depósitos de cobertura, tanto en los valles fluvicársicos de contacto, como en el fondo de los hoyos de montaña, sólo ocasionalmente son acuíferos; sin embargo, como su evolución hidrológica lleva asociada una fase lacustre, las posibilidades de desarrollo de las aguas subterráneas que a veces se encuentran en ellos son muy limitadas, por razón de alto contenido de sólidos en suspensión que presentan las aguas.

Condiciones de descarga

La descarga principal se realiza por el resolladero del río Santo Tomás a la que se integran todas las corrientes alóctonas en cierto momento. El arroyo los Cerritos también descarga por el río Frío, y los Manantiales de Alejo y Mamposo, cuya conexión hidráulica fue detectada a partir del ensayo de trazadores. La descarga es predominantemente concentrada.

SINGULARIDADES DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EN LAS MONTAÑAS CARSTICAS

Según Rodríguez-Becerra y Espinoza (2002) los instrumentos de gestión ambiental se clasifican en cuatro grandes categorías:

1. *Los instrumentos de regulación directa*, denominados de comando y control, basados en la promulgación de normas y en la ecuación coerción sanción; es decir, se trata de la forma tradicional de hacer cumplir la ley llevada al campo de la conducta ambiental.
2. *Los instrumentos administrativos* consistentes en el otorgamiento de licencias, permisos y demás modos de adquirir el derecho a usar los recursos naturales previstos en las diferentes legislaciones. La licencia ambiental ha sido el instrumento predominante dentro de esta categoría.
3. *Los instrumentos económicos* que están dirigidos a hacer que las fuerzas del mercado sean las principales propiciadoras del cumplimiento de las metas ambientales de la sociedad.
4. *La educación, la investigación, la asistencia técnica y la información ambiental* conforman la cuarta categoría.

En las regiones cársticas de montaña del Trópico Húmedo expuesta a lluvias torrenciales y huracanes se deben tener en cuenta algunas especificidades; a saber:

¹ M. Guerra Oliva, com. pers., 2007

- Las particularidades de la formación del escurrimiento superficial.
- El desarrollo local del sistema hidrológico del carso y su hidrodinámica física y geoquímica.
- El nivel de desarrollo socioeconómico local.

No puede ejercerse control alguno sobre lo que se desconoce. Por ello para una adecuada gestión hidrológica y ambiental de un determinado sistema cársico es necesario tener en consideración sus particularidades físicas, bióticas y socio económicas específicas.

SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL EN EL SISTEMA HIDROLÓGICO DE LA GRAN CAVERNA DE SANTO TOMAS

En el caso particular de las montañas cársicas del Trópico Húmedo se han identificado cinco características hidrológicas básicas cuyo conocimiento es esencial para la gestión adecuada de los recursos hidráulicos y el medio ambiente en estas regiones. Estas son:

- Las leyes que gobiernan la organización de la escorrentía superficial y subterránea.
- El desarrollo local del sistema cársico.
- La hidrodinámica física y biogeoquímica.
- El nivel local de desarrollo social y económico.
- La vulnerabilidad social, natural y los riesgos hidrológicos.

La organización del escurrimiento superficial y subterráneo

El escurrimiento superficial está gobernado por muy bajos tiempos de concentración. Ello se debe a las elevadas pendientes de las pequeñas cuencas fluviales, comúnmente de orden muy pequeño. En el caso del Sistema Cavernario de Santo Tomás, solo uno de los cinco arroyos que ingresa en el sistema, precisamente el Santo Tomás, tiene un área de casi 11 Km². Los otros muestran áreas entre 0,437 (Arroyo Peñate) y 0,744 Km² para el Arroyo Los Cerritos. Los tiempos de concentración suelen ser de unas pocas horas y las lluvias torrenciales producen característicos hidrógrafos de avenidas de un solo pico.

Un rasgo distintivo es la notable transformación que sufren los hidrógrafos de avenida en respuesta a la misma tormenta. Los típicos hidrógrafos de avenidas de un solo pico se transforman en hidrógrafos de dos y tres picos en las emergencias situadas en la vertiente de descarga. En modo alguno ello significa que no se conserven hidrógrafos de un solo pico en las vertientes emisivas pero ello suele ocurrir casi exclusivamente cuando la línea de flujo está asociada con pasajes subterráneos rectilíneos.

Los caudales a la salida también varían y, muchas veces dramáticamente, incrementando o reduciendo los volúmenes que ingresan en el macizo. Eso se debe al llamado "efecto de almacenamiento" del sistema cavernario² que están controlados por:

- a) El grado de integración hidráulica y de la conexión física entre las galerías subterráneas.
- b) El desarrollo y funcionamiento hidrológico de los acuatorios subterráneos, como los lagos de las cuevas y los grandes sistemas de gours, algunos incluso navegables.
- c) La contribución de otras corrientes (a veces desconocidas) que ingresan en el sistema o que funcionan estacional o episódicamente descargando al interior del sistema por flujo lateral.
- d) El desarrollo de pasajes estrechos, diques y otras restricciones hidráulicas como los sifones y galerías totalmente inundadas.
- e) El efecto de la lluvia autóctona o autógena; es decir, aquella que se produce solamente en la cima de las montañas y que constituye un típico fenómeno pluviométrico en la Sierra de los Órganos, donde comúnmente se aprecian aguaceros especialmente importantes que se circunscriben exclusivamente a la cima de los mogotes, sin que llueva en el valle contiguo.

La extensión de la conexión física y la integración hidráulica de los pasajes subterráneos activos permite una mayor o menor velocidad de respuesta de las emergencias en la zona de descarga. Una medida de ello es la linealidad (o sinuosidad) de los conductos. Mientras más rectilíneo sea éste, menos se amortiguará el hidrógrafo de la avenida de ingreso si el resto de los factores ejerce escasa influencia. De hecho, prácticamente no se modifica el hidrógrafo de avenida y es prácticamente el mismo en la entrada del sistema que en la salida. Otro comportamiento se manifiesta cuando los conductos son sinuosos o incluso laberínticos, que llegan a modificar radicalmente las avenidas a medida que circulan por el sistema de galerías; de tal modo que muchas veces, en el punto o los puntos de descarga se producen hidrógrafos sustancialmente diferentes al del punto o los puntos de ingreso. Incluso, entre diferentes puntos de descarga los hidrógrafos pueden llegar a ser muy diferentes entre sí.

La presencia de acuatorios de diferente tipo en los pasajes subterráneos activos es un factor de consideración. De la mayor importancia ecohidrológica (y no solamente espeleogenética) es el efecto de mezcla que se produce cuando las aguas de avenida ingresan en el sistema subterráneo. La llegada de nutrientes y algunos contaminantes cambia el equilibrio biogeoquímico en el sistema cavernario y eventualmente lo devuelve

² Cuando a principios de la década del 70 del siglo pasado descubrimos y cuantificamos estos fenómenos acuñamos el término de "efecto de tanques" en la práctica espeleológica.

a la superficie en los puntos de descarga. Por otro lado, los a veces grandes volúmenes de agua almacenados en lagos, gours y depresiones transforman el hidrógrafo de la avenida de ingreso suavizando el limbo creciente y usualmente extendiendo el tiempo base donde suele aparecer un segundo pico, a veces más pequeño, como consecuencia de la remoción de estos volúmenes retenidos en el subsuelo en la dirección del flujo e incorporados con cierto retardo en el tiempo (lag) a los caudales de drenaje.

En ocasiones, otras corrientes fluviales superficiales contribuyen de modo secundario al escurrimiento directo principal. Sus picos de avenida llegan con diferentes tiempos de retardo y el hidrógrafo principal (de entrada) se transforma alargando el tiempo base y mostrando más de un pico a la salida.

Las restricciones hidráulicas están asociadas con la morfología de los pasajes subterráneos y cambian los patrones de flujo. Las galerías estrechas o los estrechamientos alternativos de galerías y salones, represamientos, cascadas y simas verticales son los elementos que más comúnmente actúan como restricciones para el desarrollo de un flujo subterráneo uniforme.

La elevada carsificación en la cima redondeada de los mogotes y montañas del tipo de torres cársicas permite una infiltración de casi el 85% de la lluvia total (según se deriva de balance hidráulico y de cloruros). Esto significa que prácticamente toda la lluvia que precipita en la cima de las montañas escurre con pocas pérdidas (excluyendo la interceptación por la vegetación) y alcanza los niveles de cavernamiento inferiores, contribuyendo directamente al escurrimiento total pero con cierto retardo en el tiempo. Este proceso es común durante el verano, cuando algunas lluvias de tipo orográfico tienen lugar solamente en la cima de los mogotes pero no en los valles contiguos y producen pequeñas y breves crecidas en los cursos de agua emergentes (en las vertientes de descarga) en modo alguno relacionados con eventos hidrológicos en las cuencas superiores, aguas arriba de los sumideros. Cuando el retardo es mayor y está asociado a aguaceros torrenciales en las cuencas superiores, es común el desarrollo de hidrógrafos de avenidas de al menos dos picos en la salida.

El desarrollo hidrológico local del sistema cársico

El grado de organización e integración de los conductos subterráneos es de la mayor importancia, como ya fue mencionado. Esta organización debe ser considerada tanto en el plano horizontal como en el vertical.

Mientras que la integración horizontal de los conductos subterráneos afecta el escurrimiento directo, la particular integración entre los distintos niveles de cavernamiento superpuestos es de la mayor importancia en tanto afecta el almacenamiento por retención. Los niveles de cavernamiento superpuestos y las galerías con meandros interconectadas provocan un retardo del flujo que modifica el hidrógrafo de salida mucho más sustancialmente que en el caso de galerías rectilíneas. Las pequeñas diferencias en altitud que a veces se observan entre niveles de cavernamiento (realmente epiciclos de cavernamiento) contiguos permiten que el flujo lateral superficial y subterráneo se conecte con las corrientes de entrada. La presencia de grandes lagos puede retardar la crecida, y de hecho lo hace, por horas y hasta días variando los patrones de flujo y las cargas de nutrientes en el sistema.

La notable sinuosidad de los pasajes subterráneos principales es una de las causas de retardo de flujo, de la transformación del hidrógrafo de avenida y del incremento en el volumen total del escurrimiento en la zona de descarga con respecto a los sumideros. Pero este hecho no es solamente importante al considerar los eventos de avenida. En efecto, durante la estación seca (o preferiblemente la estación menos lluviosa del año) suele observarse un incremento en el caudal en las descargas que está directamente asociado con la sinuosidad o la no linealidad de los pasajes subterráneos.

A principios de la década de 1970 el autor llevó a cabo una serie de experimentos con trazadores en algunas cuevas transfluentes de la sierra de Los Órganos con la intención de identificar el tiempo de residencia de las aguas subterráneas entre los sumideros y los resolladeros. La conexión entre los puntos seleccionados fue debidamente identificada mediante exploración espeleológica directa y el caudal de las corrientes de ingreso-egreso fue cuidadosamente medido durante los experimentos **uno de cuyos resultados más importantes fue identificar que existía un incremento en los caudales de salida proporcional a la sinuosidad de los conductos**. Este fenómeno contribuye a explicar el incremento de caudal que comúnmente se observa en la vertiente de descarga de los macizos cársicos con respecto al que ingresa y está relacionado con el mayor número de puntos de captación de infiltración local de galerías sinuosas respecto a una galería rectilínea.

Hidrodinámica física y biogeoquímica

En este tema los aspectos más importantes son los siguientes:

- a) La emisión y asimilación de cargas de nutrientes y contaminantes no conservativos que por lo común proceden de las comunidades rurales o periurbanas que descargan aguas residuales pobremente tratadas o simplemente no tratadas en modo alguno.
- b) La variable capacidad de autodepuración del sistema cavernario activo.
- c) La variación y variabilidad de la composición química de las aguas debida al tiempo de residencia en el acuífero, la longitud de mezcla y el tiempo de contacto agua-roca.

El caso de la Sierra de Quemado es típico para muchas locaciones de la Sierra de Los Órganos. Las aguas que ingresan en el sistema vía el Arroyo de La Tierra recibe la contribución de una fuente no persistente no

tóxica de contaminación proveniente básicamente de los productos carbonatados utilizados para limpiar y alimentar una granja avícola. Adicionalmente se registran valores muy altos de NH_4 en estas aguas. Este amonio disociado constituye un compuesto tóxico que ingresa en el sistema amenazando la vida acuática dulce en el ecosistema hipogeo y, debido al ambiente alcalino que la rodea la convierte en un elemento aún más tóxico.

El Arroyo de La Tierra muestra los valores más deprimidos de Oxígeno disuelto (DO) de todos los muestreados en las aguas del sistema (alrededor de 40 muestras). El modo y la intensidad que este comportamiento afecta la biota de la caverna no ha sido estudiado aún, pero en los alrededores del sumidero (ponor) donde el arroyo ingresa al sistema cavernario y aguas arriba del mismo no se ha registrado vida acuática.

Todas las corrientes que ingresan en la Sierra de Quemado y que quedan almacenadas en cuevas como Las Represas, Charco Hondo y Segundo Cauce también muestran valores deprimidos de DO. Todos los valores están por debajo del límite estándar de 4 mg/L DO adoptado para la preservación de la vida acuática dulce.

Charco Hondo y Represas-Hoyo de Fanía están básicamente vinculados al Arroyo Santo Tomás excepto cuando bajo lluvias torrenciales se produce un retroceso (back-flow) del escurrimiento debido a su interacción con el Arroyo El Bolo (Fig. 12). Pero en las condiciones a que se hace referencia en este artículo no se produjeron fenómenos de reflujo (back-flow) ni lluvias torrenciales. De este modo, las aguas en la línea de flujo arroyo Santo Tomás-Charco Hondo-Represas resultan más deprimidas en DO, disminuyendo hasta 1 mg/L. En esta larga línea de flujo tiene lugar la descomposición de materia orgánica disminuyendo el Oxígeno en el sistema.

En el lago permanente de la Cueva del Segundo Cauce, la situación es aún peor. Las aguas prolongadamente estancadas de este lago permiten unas condiciones casi estables de temperatura y flujo, incrementando la oxidación de la materia orgánica y un alto consumo de oxígeno. De hecho, los valores más bajos en todo el sistema han sido obtenidos aquí. Este sitio constituye un nicho ecológico particular de aguas deprimidas en oxígeno y con alto tiempo de residencia en el sistema. Nunca se ha reportado biota en este sitio excepto luego de lluvias torrenciales que producen crecidas en la cueva.

Los valores de DO medidos en las descargas de Río Frío y Resolladero de Santo Tomás mostraron resultados no esperados. De hecho se registró una recuperación en los valores de DO en ambas estaciones de monitoreo con apenas cambios en la concentración de NH_4 . Todo parece indicar que los procesos de re-aeración tienen lugar muy cerca de los puntos de descarga de las corrientes subterráneas. Teóricamente, este proceso puede estar controlado por la turbulencia del agua en las corrientes próximas a la vertiente de descarga de la Sierra de Quemado y a la influencia de las amplias y bien ventiladas galerías subterráneas en la interface atmósfera-agua. La tasa de re-aeración en el primer modelo es menor de un (1) día para la corta distancia que separa Charco Hondo de la resurgencia del Santo Tomás.

Los resultados derivados del ensayo de trazadores combinados (salinos, conservativos y fluorescentes) de 1994, independientemente de los resultados de la exploración espeleológica, son clave para operar la red de monitoreo y de protección de los recursos hidráulicos locales.

El nivel de desarrollo social y económico local

En la Sierra de Quemado y sus alrededores la sociedad local se ha desarrollado como una comunidad agropecuaria de bajo ingreso, concentrada aguas arriba de la vertiente absorbente y que, en cambio, se presenta dispersa aguas debajo de la vertiente emisiva (de descarga). En la Sierra de Quemado en sentido estricto; es decir, sus laderas y cima, no hay población. Los indicadores relacionados con el desarrollo social conciernen particularmente con la demanda de agua y el tratamiento de las aguas residuales; la oferta de agua es en general suficiente en cantidad y calidad para satisfacer la demanda pero el limitado tratamiento es totalmente incapaz -en términos de depuración- de devolver aguas de buena calidad al ecosistema.

Por ello, los problemas socioeconómicos básicos están relacionados con el agua y **son sustancialmente diferentes** en términos de cuál de las dos vertientes de la Sierra de Quemado (la absorbente o la emisiva) sea considerada.

Los problemas aguas arriba, en la vertiente absorbente, son básicamente los siguientes:

- Falta de tratamiento a las aguas de abastecimiento a la comunidad de El Moncada, con una población de unas 1600 personas distribuidas en unas 240 casas independientes.



Fig. 12. Reflujo (back-flow) en el sumidero del Arroyo Santo Tomás producido por una avenida del 2 de Septiembre del 2006. Este fenómeno ocurre comúnmente cuando el Arroyo el Bolo impide que el Sumidero del Arroyo Santo Tomás sea incapaz de evacuar la avenida de ingreso (Foto del Autor).

- Solamente 170 casas están conectadas con la fuente municipal y disponen de conexión intradomiciliaria. Las restantes se abastecen de manera independiente.
- Las aguas residuales domésticas de 85 casas se disponen en un tanque común. Las restantes tienen sus propios tanques sépticos.
- No existe tratamiento de aguas negras ni sistemas de colección para las granjas, escuelas e instalaciones locales de procesamiento de alimentos y productos agrícolas.

El problema más importante **aguas abajo** de la Sierra de Quemado es la absoluta falta de una fuente de tratamiento municipal de las aguas residuales. Las familias dispersas se abastecen directamente de los manantiales y los ríos que descargan en este lado de la sierra. En otros términos, ello significa que utilizan las aguas previamente contaminadas o con su calidad deteriorada por las comunidades al otro lado de la montaña. Estas aguas son acarreadas en tanques individuales³ una o dos veces al día. El único tratamiento que reciben en las casas de familia suele ser el filtrado en dispositivos de arenisca para eliminar los sólidos en suspensión. El agua suministrada de este modo no es en modo alguno adecuada para propósitos sanitarios y como máximo fluctúa entre 40 y 80 litros/día/persona para bebida, cocina, baño y limpieza.

Vulnerabilidad social y natural y riesgos hidrológicos

La vulnerabilidad social y los riesgos naturales son más evidentes en las vertientes emisivas debido a la dispersión de la población, la estructura ocupacional y los tipos de vivienda.

La demanda de agua para todos los usos se satisface individualmente mediante colecta familiar y su almacenamiento tampoco es supervisado por las autoridades de salud. Ello conlleva un abastecimiento de agua insuficiente y una baja calidad de agua de consumo. Este, sin embargo, no es el caso de la comunidad de El Moncada donde existe un sistema de abastecimiento municipal de agua aunque opera con deficiencias. Isabel María es la comunidad más vulnerable al deterioro de la calidad del agua pero no a los eventos de crecidas. En este caso, el Moncada es mucho más vulnerable debido a que las propias capacidades de absorción del sistema de cavernas absorbentes no son suficientes para captar las aguas de crecida y los fenómenos de refluo, con la consiguiente inundación de la comunidad son más que comunes, como suele ocurrir en eventos de lluvia asociados a huracanes.

NOTA FINAL

La efectividad de cualquier instrumento de gestión ambiental tiene que estar fundamentada en el adecuado conocimiento del sistema donde debe aplicarse. En el caso particular de las montañas cársicas del Trópico Húmedo deben destacarse los siguientes instrumentos de conocimiento imprescindibles para lograr la eficiencia y sostenibilidad de la gestión ambiental y, en particular, hidrológica:

- La organización del escurrimiento superficial.
- El desarrollo local del sistema hidrológico cársico.
- La hidrodinámica física y biogeoquímica.
- El nivel de desarrollo social y económico local.
- La vulnerabilidad social y natural y los riesgos hidrológicos.

En estas regiones, la mayor vulnerabilidad a la contaminación se localiza en la vertiente emisiva y el mayor estrés proviene de los flujos horizontales. El mayor estrés antrópico se identifica en las vertientes, sobre todo emisivas y rara vez en la cima de las elevaciones las que, por su morfología y accesibilidad no son aptas para el desarrollo poblacional. Los sistemas de cavernas (de flujo) bien integrados contribuyen al mejoramiento de las aguas de ingreso de baja calidad en términos de Oxígeno Disuelto. Por otro lado, el pobre desarrollo de meandros y/o de la integración de los sistemas de galerías subterráneas no produce mejoramiento alguno a la calidad de las aguas y constituyen una fuerte amenaza a la salud y bienestar de las comunidades que habitan las vertientes emisivas.

RECONOCIMIENTOS

Muchos colegas han compartido los trabajos de campo y las discusiones de algunos de los resultados de estos trabajos. Por tal motivo, nuestro agradecimiento a los siguientes: H. Farfán, E. Rocamora, E. Flores, L. Fiallo, M. Valdés, C. Aldana Vilas, C.M. Aldana Ravelo, J.L. Gerhartz, A. Abraham, M. Labrada, M. Condis, M. Guerra, E. Balado, M. Parise, M. Suárez, V. Otero, J. Pajón y A. Graña. Y siempre, muy especialmente, a Ana mi compañera.

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo González, M. y L.F. Molerio León (1982): El Valle de San Carlos y sus Inmediaciones. Características de un Sistema

³ Comúnmente de 55 galones, llamados rastras, arrastradas por bueyes que entran en las corrientes fluviales para facilitar la colecta manual de agua.

Cársico para Propósitos de Simulación Matemática. Coloquio Internac. Hidrol. Cársica de la Región del Caribe, UNESCO, La Habana:248-256

Aldana Vilas, C. (2004): La Princesa, 50 años de la primera exploración. El Explorador, Periódico Digital Espeleológico. Edición Especial, Noviembre 5, 2004.

Díaz, L.R. y J.L. Díaz (1990): Evaluación turística de la Cueva del Salón, Sistema Cavernario Santo Tomás. In/ Núñez Jiménez, A.: Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba. Tomo II, La Habana, Impr. Ctral de las FAR, :197

Domínguez, M., et al. (1991): Aspectos generales sobre el entorno geográfico del sistema cavernario de Palmarito. Lapiaz, Mon. II, Valencia :43-46

Flores Valdés, Ernesto & L.F. Molerio León (1995): Patrones de Agrietamiento en la Sierra de Quemado, Pinar del Río, Cuba. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana,:35-36

Furrazola-Bermúdez, G., R. Sánchez Arango, R. García, V.A. Basov (1978): Nuevo esquema de correlación estratigráfica de las principales formaciones geológicas de Cuba. "La Minería en Cuba". 4 (3) pp30-35.

Gerhartz, J.L. y A. N. Abraham (1991): Características climáticas de la región de Viñales y su relación con el funcionamiento hidrológico del Sistema Cavernario de Palmarito. Lapiaz, Mon. II, Valencia :50-53

Guerra Oliva, M. (1995): Patrones de formas del relieve en la cuenca del Río Santo Tomás, Sierra de los Organos, Cuba. Memorias Congreso Internacional LV Aniversario SEC: 88.

Jáimez Salgado, E. (2004): Acerca de fenómenos hidrotermales. El Explorador, Periódico Digital Espeleológico.; La Habana, 6.

Jennings, J.N. (1971): Karst. Australian National University Press, 252 :

Lehmann, H. (1953): Karst-Entwicklung in den Tröpen. Die Uns. In Wissenschaft und Technik, Frankfurt,(18):32-45.

Lehmann, H. (1960): Las Áreas Cársicas del Caribe. Rev. Soc. Geog. de Cuba

Martín Pérez, H. & E. Jaimez Salgado (1990): Informe sobre una nueva localidad con flores de yeso en la Sierra de los Organos. Estudio mineralógico preliminar. In/ Núñez Jiménez, A.: Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba. Tomo II, La Habana, Impr. Ctral de las FAR, :285

Molerio León, L. F. (1965): La Palma de Corcho. Arch. Grupo Espel. Martel, La Habana, 5:

Molerio León, L. F. (1981): Problemas Hidrogeológicos del Karst de Montaña de Cuba. Voluntad Hidráulica, La Habana XVIII (55):37-40

Molerio León, L. F.(1995a): Field Trip Guide: Mogotes in the Viñales Valley, Pinar del Río Province, Cuba. Internatl. Geogr. Union (IGU) Conf. of Latin America and Caribbean Countries, La Habana, 38:

Molerio León, L. F. (1995b): Regionalización Hidrogeoquímica de las Aguas Subterráneas en la Sierra de Quemado, Pinar del Río, Cuba. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana, pp 92-93

Molerio León, L. F. (1995c): Distribución del Campo de Tensiones en Espeleotemas Colapsadas de la Cueva de La Incógnita, Gran Caverna de Santo Tomás, Pinar del Río, Cuba. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana,:34-35

Molerio León, L. F. (2002): Primeras mediciones de Radón en cuevas cubanas. Com. Hidrogeología Cársica. Sociedad Espeleológica de Cuba., La Habana, 1:

Molerio León, L. F.(2003): Evaluación, aprovechamiento y protección de las aguas subterráneas en cuencas de montañas cársicas. Geocuenca III-2003, La Habana

Molerio León, L. F. (2004a): El enlace absorción-descarga de la Gran Caverna de Santo Tomas. Evidencias derivadas de un ensayo con trazadores artificiales. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana, XXV (3) pp 22-26

Molerio León, L. F. (2004b): Los mogotes del Valle de Viñales, Monumento Nacional, Pinar del Río, Cuba. Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (98), Madrid, Noviembre,:12-22.

Molerio León, L. F. (2012): Hydrological controls in the development of the slopes of the mogotes (hillstacks, conic karst, kegel karst, tower karst, turm karst) of Sierra de Los Organos, Cuba. Espeluncadigital No. 10, Mayo 2012, La Habana: 1-18.

Molerio León, L.F. (2013): Water Resources Management in Small Mountain Watersheds in the Humid Tropics: The Hydrologic System of the Santo Tomas Cave System, Pinar del Río, Cuba. H. Farfán et al (eds) Management of Water Resources in Protected Areas.Environmental Earth Sciences :137-144 http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-16330-2_16

Molerio León, L. F., M. Guerra Oliva & E. Flores Valdés (1983): Geomorfología e Hidrogeología Cársica del Valle de Pan de Azúcar, Sierra de los Órganos, Pinar del Río. Voluntad Hidráulica, (62):23-36

Molerio León, L. F. & Ana M. Sardiñas (1995): Indicadores Hidráulicos del Paleoflujo Subterráneo en la Sierra de Quemado, Pinar del Río, Cuba. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana,:93-94

Molerio León, L. F.; A. Menéndez; E. Flores, C. Bustamante & M. Guerra (1995): Hidrodinámica de los Grandes Sistemas Cavernarios de Cuba Occidental. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana,:88-89

Molerio León, L. F.; A. Menéndez Gómez; E. Flores Valdés; M.G.Guerra Oliva & C. Bustamante Allen (1996): Aguas Subterráneas en las Zonas de Montaña de Cuba. Voluntad Hidráulica (86):23-33

Molerio León, L.F.; A. Menéndez Gómez; E. Flores Valdés; M.G. Guerra Oliva & C. Bustamante Allen (1997): Potencial y Recursos de Aguas Subterráneas en las Zonas de Montaña de Cuba. In/D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín & I. Antigüedad (Eds.): Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eibar, País Vasco: 211-224

Molerio León, L. F.; E. Flores Valdés; M. Guerra Oliva; A. Menéndez Gómez; C. Bustamante Allen; E. Rocamora Alvarez (1998): Evaluación, Aprovechamiento y Protección de las Aguas Subterráneas en las Zonas de Montaña de Cuba. Geología y Minería '98. Memorias, Volumen I, Versiones Resumidas,: 441-444

Molerio León, L. F. & E. Flores Valdés (2003): Hidrogeología y geomorfología cársica de Valle Ancón, Pinar del Río, Cuba. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana XXIV, 3:3-9

Molerio León, L. F., H. Farfán González, M. Parise, C.Aldana Vilas, (2007): Self-purification capability of underground water courses in the humid tropics: Results of a tracing experiment at the Gran Caverna de Santo Tomás, Cuba. Espelunc@digital, Soc. Espeleologica de Cuba, La Habana, (6) 18:

Núñez Jiménez, A., (1955): Navegando por el subsuelo de Cuba. Exploración de una de las cavernas más grandes del Nuevo Mundo: la de Santo Tomás en la provincia de Pinar del Río. Rev. Bohemia. Febr. 13, 1955 47(7):34-36 y 96-97

Núñez Jiménez, A., (1956a): Notas sobre un gran descubrimiento espeleológico: La Cueva Escarlata. Diario de La Marina, La Habana, Oct. 28, 1956.

Núñez Jiménez, A., (1956b): Descubren en Cuba una de las más bellas cavernas (Santo Tomás, Pinar del Río). Diario El Mundo, La Habana, Agosto 24, 1956.

Núñez Jiménez, A., (1967): Clasificación Genética de las Cuevas de Cuba. Acad.Cienc.Cuba,Inst. Geogr., Depto. Espel., Edic. Prov.,La Habana, 224:

Núñez Jiménez, A. (1990a): La Gran Caverna de Santo Tomás. Monumento Nacional. Editorial FAR. La Habana, 169:

- Núñez Jiménez, A. (1990b): Resultados de treinta años en la exploración de la Gran Caverna de Santo Tomás (1954-1984). In/ Núñez Jiménez, A.: Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba. Tomo II, La Habana, Impr. Ctral de las FAR, :276
- Núñez Jiménez, A., K.A. Symington (1955): Caverns of St. Tomás. Bull. Natl.Speleol.Soc. 17:2-7
- Núñez Jiménez, A., V. Panos & O. Stelcl. (1964): Investigaciones carsológicas en Cuba. Acad. Cienc. Cuba 80:
- Panos, V. & O. Stelcl (1968a): Problems of the conical karst in Cuba. Proc. 4th Internatl. Congr. Speleol. III :533-555, Ljubljana
- Panos, V. & O. Stelcl (1968b): Physiographic and geologic controls in the development of Cuban mogotes. Zeit. Geomorphol. 12 (2) :117-173
- Parise, M., U. del Vecchio, R. Potenza, M.V. Valdés Suárez, A. Vecchione (2004): Nel caos della Gran Caverna di Santo Tomás. Speleologia. 50 :58-67
- Parise, M. & M. Valdes Suárez (2005): The show cave at "Gran Caverna de Santo Tomás"(Pinar del Río province, Cuba). Acta Carsologica (34) 1:135-149, Ljubljana.
- Parise, M., M.V. Valdes Suárez, R. Potenza, U. del Vecchio, A. Marangella, F. Marrano, L.D. Torrez Mirabal (2005): Geological and morphological observations in the eastern part of the Gran Caverna de Santo Tomás, Cuba (Results of the "Santo Tomas 2003" speleological expedition). Caves and Karst Sci. TRans, British Cave Res. Ass.,32 (1):19-24
- Piotrowska K. (1972): La tectónica de la Sierra de los Órganos en el área comprendida entre las localidades de El Cangre, Santo Tomás, Santa Lucía, Baja y San Juan y Martínez. Actas 2, Instituto de Geología y Paleontología. La Habana. : 35-38.
- Piotrowska, K. (1987): Las estructuras de nappes en la Sierra de los Órganos. en/ Psczchlowski, A et. al. (1987) Contribución a la geología de la provincia de Pinar del Río. Edit. Cien.-Téc. La Habana pp 85-156
- Psczolkowski, A. (1987): Secuencias miogeosinclinales de la Cordillera de Guaniguanico. In/ Psczchkowski, A et. al. (1987) Contribución a la geología de la provincia de Pinar del Río. Edit. Científico-técnica. La Habana pp 4-84
- Rodríguez Becerra, M. G. Espinoza, D.Wilk Editor (2002): Gestión ambiental en América Latina y el Caribe evolución, tendencias y principales prácticas. Banco Interamericano. Des., Washington, 286 pp
- Suárez Valdés, M.V. (2004): Gran Caverna de Santo Tomás (Cuba): Storia di una esplorazione in corso di svolgimento. Grotte e Dintorni, 4(8):55-62
- Sweeting, M. M. (1972): Karst Landforms. McMillan, London, 362:
- Worthington S.R.H (1999): A comprehensive strategy for understanding flow in carbonate aquifers. In:Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D.(eds.), Karst Modeling. Special Publication 5, Charles Town, West Virginia (USA): The Karst Waters Institute, 30-37.

Este trabajo ha sido publicado on-line con fecha 15/03/2014

Se citará como:

MOLERIO LEÓN, L.F., 2014. Particularidades del aprovechamiento sostenible de los recursos hidráulicos de pequeñas cuevas de montañas cársicas en el Trópico húmedo: el sistema hidrológico de la Gran Caverna de Santo Tomás, Pinar del Río, Cuba. *Gota a gota*, nº 4: 23-36. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.)