

Breve síntesis histórica de las investigaciones hidrogeológicas en el karst: de Cvijic y Martel a la actualidad

Brief historical overview of hydrogeological karst research: from Cvijic and Martel to the present

ANTONIO PULIDO-BOSCH, ÁNGELA VALLEJOS IZQUIERDO Y FERNANDO SOLA GÓMEZ

Grupo de Investigación RHyGA, Universidad de Almería. Campus de La Cañada. Almería. E-mail: apulido@ual.es, avallejo@ual.es, fesola@ual.es

Resumen Aunque la humanidad ha utilizado el agua del karst desde tiempo inmemorial, la explicación científica de los procesos no avanzó hasta las contribuciones del francés Martel, del serbio Cvijic y del alemán Grund; este último fue el primero en considerar la existencia de una franja saturada continua, aunque esencialmente estática. Poco tiempo fue necesario para profundizar en la génesis de las principales formas exo y endokársticas e hidrogeología kárstica. UNESCO, la Asociación Internacional de Hidrología Científica y la Asociación Internacional de Hidrogeólogos promovieron el Decenio Hidrológico Internacional y convocaron reuniones científicas en muchos países. Las escuelas de Moulis (Francia), de Neuchâtel (Suiza) y Montpellier (Francia) fueron muy innovadoras, lo que favoreció un espectacular avance en los conocimientos a partir de los años 70 del siglo XX. La densa investigación llevada a cabo por numerosos expertos en diversos dominios permite afirmar hoy que el conocimiento adquirido es muy amplio. Por último, se pasa revista a los principales Grupos de Investigación españoles con especial énfasis en el impacto que las Acciones COST promovidas por la Unión Europea tuvieron en el avance de la hidrogeología kárstica moderna.

Palabras clave: Acuífero fracturado, hidrogeología kárstica, karst.

Abstract *Mankind has been using the water from karst since immemorial time. However, the scientific explanation of the processes didn't advance until the contributions of Martel, Civjic and Grund; the latter one was the first to consider the existence of a continuous saturated zone, which is nonetheless essentially static. Research about the genesis of the main exo and endokarstic forms, as well as the karstic hydrogeology started soon. UNESCO, the International Association of Scientific Hydrology and the International Association of Hydrogeologists promoted the International Hydrological Decade and organized scientific meetings in many countries. Schools in Moulis (France), Neuchatel (Switzerland) and Montpellier (France) were very innovative, favoring a spectacular advance in the knowledge of karst from the 70s in the 20th century. This extensive research conducted by numerous experts in different domains allows us to assert today that the acquired knowledge is very broad. Finally, we review the main Spanish Research Groups, with a special emphasis on the impact that COST Actions, promoted by the European Union, has had in the advancement of modern karst hydrogeology*

Keywords: *Fissured aquifer, karst, karstic hydrogeology.*

INTRODUCCIÓN

Los materiales karstificables han despertado siempre un notable interés por sus singularidades, su importancia económica y por ser terrenos que, con cierta frecuencia, permiten acceder a su interior. Este hecho ha constituido históricamente un aliciente para todos aquellos amantes de las cosas

ocultas. Es por eso que las primeras contribuciones científicas tuvieron una componente exploratoria de lo desconocido, del mundo subterráneo.

En realidad, las regiones kársticas son objeto de interés desde muchos puntos de vista y por especialistas de muchos dominios tales como geología –estratigrafía, sedimentología, paleontología, hidrogeología–, biología –botánica, ecología, microbiolo-

gía-, geografía, geomorfología, arqueología, antropología, hidrología, geofísica e ingeniería de muy diversas especialidades. Ocupa un lugar preferente la espeleología en su triple modalidad, la meramente deportiva, la espeleobiología y la geoespeleología. Este trabajo se ciñe especialmente al enfoque hidrogeológico, con algunas pinceladas geomorfológicas y espeleológicas.

Los filósofos griegos (Empédocles, Aristóteles, Eratóstenes) describieron el ciclo hidrológico a partir de las observaciones en un medio kárstico litoral, donde había puntos de absorción (katavotras) que indujeron a concebir el mar como origen directo del agua subterránea. Los filósofos griegos y posteriormente los romanos (Estrabón, Séneca –quien describe los procesos de disolución de las calizas, el desarrollo de las cavidades, los sumideros y las surgencias kársticas-) mantuvieron estas teorías, que llegaron a la Edad Media con apenas ligeras variaciones.

El aprovechamiento de las aguas del karst es algo que se lleva a cabo desde tiempo inmemorial, aunque el origen de tales surgencias no fue deducido hasta muchos siglos más tarde. Pero las aguas del karst sirvieron para el abastecimiento de numerosos asentamientos humanos y como resultado se desarrolló una ingeniería del agua que sorprende por su increíble precisión. Conducciones kilométricas que incluyen acueductos y túneles con gradientes óptimos fueron construidos para estos abastecimientos, sin las herramientas disponibles hoy en día, pero con precisión milimétrica; Siracusa, Corinto, Mileto, Éfeso o Nîmes son ciudades abastecidas con surgencias kársticas. A título de ejemplo se puede decir que a pesar de que los

romanos solían emplazar sus ciudades cerca de los ríos, siempre mostraron una cierta preferencia por la utilización de las aguas de manantiales kársticos, aunque para ello hubiese que realizar complejas obras de ingeniería. La razón fundamental era los elevados caudales y excelente calidad de las aguas de estas surgencias. La primera exploración espeleológica documentada de una cavidad natural fue en Mesopotamia; el río Tigris, a una cierta distancia de su nacimiento, atraviesa un túnel natural. En el año 1100 a.C. el rey asirio Tiglath Pileser III ordenó construir una estatua suya junto a una inscripción en la entrada de la cueva, la cueva de Tiglath, Persépolis (Irán) (LaMoreaux y LaMoreaux, 2007; Forti, 2009).

Ya en la Edad Media, en 1674, el monje y alquimista Athanasius Kircher escribió el libro *Mundus subterraneus* que hoy se considera el primer manual de Espeleología. La imagen adjunta (Fig. 1) muestra sus “hidrofilacios”, con los que explica la existencia y el movimiento del agua subterránea, que simulan auténticas redes kársticas con “cuevas” y numerosos conductos, con fuegos internos que explicarían las aguas termales.

A mediados del siglo XVIII, Hackuet describió el karst europeo en cuatro volúmenes, y Pfaff, en 1872, cuantificó la denudación kárstica en pequeñas muestras de caliza expuestas a los agentes ambientales. Desde pocos años antes (1854) ya se medía el caudal en el manantial de Vacluse (Francia); cuyo nombre se ha utilizado para designar un tipo de manantiales que emergen de un conducto-sifón kárstico y presentan gran variabilidad en el caudal.

LOS INICIOS CIENTÍFICOS

Al final del siglo XIX, Europa contaba con dos figuras relevantes en la exploración de cavidades kársticas: el austriaco Schmidl y el francés Martel. La geomorfología kárstica también surgió con gran energía, esta vez de la mano del vienés Penck, que junto a Davis en USA hicieron avanzar esta rama de la ciencia. El primero de ellos fue el maestro del serbio Cvijic, al que dirigió su tesis doctoral *Das Karstphänomen*, defendida en 1893; sus ideas se

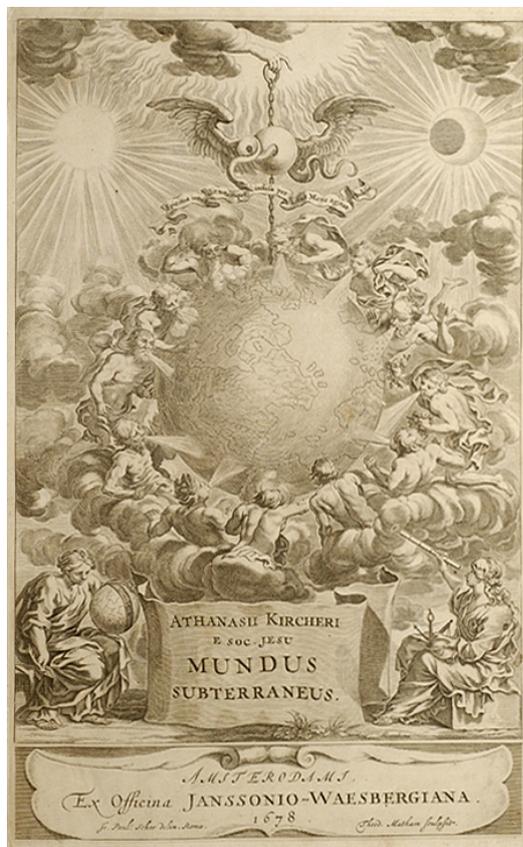
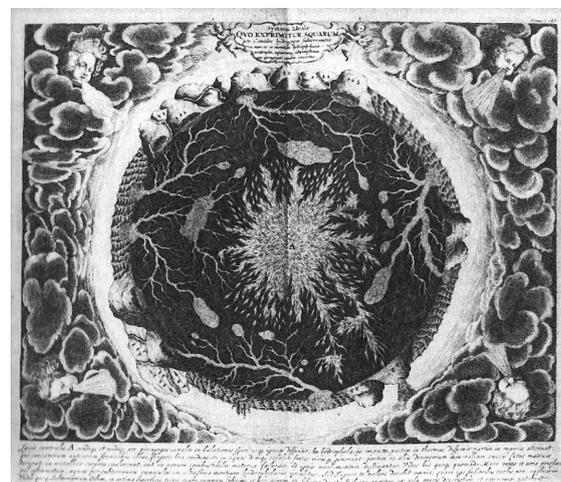


Fig. 1. Portada de la obra de Kircher y ilustración de los “hidrofilacios”. Tomado de Forti (2009). Esta imagen fue portada de la revista *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* desde su inicio hasta el año 2004.



difundieron ampliamente en numerosos artículos y libros y han constituido la base de la geomorfología kárstica moderna. En 1900 publicó *Los poljes kársticos de Bosnia Occidental y Herzegovina*, y en 1926 *Geomorfología*, ambas obras publicadas en serbio. En esta obra introdujo su clasificación de macizos kársticos, en tres grupos: Holokarst, que muestra un desarrollo completo de formas kársticas; Merokarst, con escasa o nula presencia de formas kársticas; y el karst de Transición, intermedio entre ambos.

Grund (1903), también discípulo de Penck, profundizó en la hidrología kárstica. Fue este autor quien lideró la escuela que defendía la existencia de una franja saturada, con “dos capas”, una superior con agua móvil, y otra inferior con agua estancada; sería la *escuela freática*. Paralelamente se desarrolló la escuela que defendía que en el karst existe sólo una red de conductos o ríos subterráneos independientes entre sí. Esta escuela estaba integrada esencialmente por espeleólogos habituados a recorrer estos “ríos subterráneos”, que en apariencia están desconectados entre sí; se trata de la *escuela vadosa* (von Knebel, 1906; Katzer, 1909; Martel, 1910). Dentro de este dominio han sido obras clásicas *Les abîmes* y *Nouveau traité des eaux souterraines* de Martel (1894 y 1921) y los trabajos publicados en las numerosas revistas, que en todo el mundo, difundían resultados más o menos deportivos de las hazañas de tantos esforzados espeleólogos. Revistas como *Spelunca* –promovida por Martel– *Lapiaz*, *Speleon*, *Annales de Spéléologie* y otras muchas han dado soporte a miles de levantamientos topográficos y récords diversos. Hoy en día, algunas revistas espeleológicas ocupan puestos destacados dentro del JCR (*Journal Citation Reports*). La Unión Espeleológica Internacional (UIS) agrupó tanto a ilustres deportistas amantes de lo subterráneo, como a los científicos apasionados de las profundidades, con actividades no exentas de riesgo.

En la década de los 50 del siglo pasado los expertos más relevantes en el dominio de la hidrogeología kárstica española han sido Fernández-Rubio –activo espeleólogo en su juventud– y Llopis Lladó, geólogo y espeleólogo, quien desde los inicios de la década de los años 30 estudió y divulgó el karst. En el año 1954 publicó *Nociones de Espeleología*, y editó la revista *Speleon*. Su obra póstuma *Fundamentos de Hidrogeología kárstica* (Llopis, 1970), aún hoy es de utilidad para los espeleólogos e hidrogeólogos. El espeleólogo español más sobresaliente en el ámbito internacional fue Eraso, quien llegó a ser presidente de la UIS. Fernández-Rubio y Eraso organizaron el Simposio Internacional sobre físico-química del karst en Granada, en 1973, con participación de los principales grupos europeos. Mucho más tarde, en 1998, nació la SEDECK (Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del karst), en Madrid, con el objeto de promover y difundir la parte científica de la Espeleología y el estudio del Karst. Ha organizado numerosas jornadas científicas centradas en los medios kársticos más emblemáticos de toda España. Publica el *Boletín SEDECK*, como vía de comunicación entre los científicos españoles relacionados con la Geo y Bioespeleología.

LA HIDROGEOLOGÍA KÁRSTICA

El Decenio Hidrológico Internacional (1964-1974)

En 1963, Naciones Unidas publicó la obra de componente didáctica *Handbook of Karst Hydrology* de Burdon y Papakis, que sintetiza parte de los conocimientos científicos sobre el tema. Está muy cerca la iniciativa que va a desarrollar, de manera muy notoria, todo lo relacionado con la Hidrología, incluyendo el karst; se trata de la *Década Hidrológica Internacional*. El Coloquio de Dubrovnik, celebrado en 1965 (aunque las actas se publicaron en 1966) bajo el patrocinio de la UNESCO y de la *International Association of Hydrological Sciences* (IAHS), constituyó un hito; la mayor parte de los expertos de la época participaron, presentando numerosas publicaciones sobre las aproximaciones hidrodinámicas al estudio del karst, esencialmente basadas en el estudio de los datos de caudales de las surgencias kársticas, en las que la ecuación de Maillet (1905) y sus variantes eran la base de las interpretaciones.

En esta reunión Sokolov (1966) hizo su propuesta de zonación vertical de los acuíferos kársticos, con cuatro franjas o zonas: de *aireación*, donde se pueden encontrar aguas kársticas colgadas; de *fluctuación estacional*; de *saturación completa*; y de *circulación profunda*, cuyas características eran poco conocidas y correspondería a la circulación regional, dentro del esquema hidrodinámico de Toth para las cuencas sedimentarias. La concepción más extendida de variación de la permeabilidad –que cuantifica la mayor o menor facilidad de tránsito del agua en el acuífero– con la profundidad está en gran medida soportada por los resultados de pruebas en los entornos de obras civiles.

Las reuniones científicas de ámbito regional, nacional e internacional proliferaron durante este período, con patrocinio –en numerosos casos– de organizaciones y asociaciones internacionales como IAH (*International Association of Hydrogeologists*), IAHS, FAO (*Food and Agriculture Organization of United Nations*) y UNESCO, a su vez enmarcadas en el Decenio Hidrológico Internacional (DHI) o en el Programa Hidrológico Internacional (IHP). En el DHI se constituyó la Comisión permanente de Hidrogeología Kárstica que posteriormente hizo suya la IAH y de la que es parte muy productiva. Ha editado obras de consulta obligada y organizado numerosos eventos que han marcado hitos en el avance de esta disciplina. La primera obra colectiva, editada por Burger y Dubertret en 1975, es *Hydrogeology of karstic terrains*, seguida posteriormente por *Hydrogeology of karstic terrains. Case Histories* (Burger y Dubertret, 1984), volumen 1 de la denominada “colección azul”; el volumen 2, *Hydrology of Limestone Terrains*, y el volumen 3, *Annotated Bibliography of Carbonate Rocks*, fueron editados por LaMoreaux, a los que siguieron el volumen 14 de la serie azul (1994). Entre medias hubo otra obra colectiva, editada por Mijatovic (1984), titulada *Hydrogeology of Dinaric Karsts* (volumen 4). En todas ellas –menos el volumen 14– figuran UNESCO e IUGS (*International Union of Geological Sciences*) como instituciones co-editoras. La colección continúa en la actualidad; las últimas obras editadas han sido las de Drew y Hötzl (1999) *Karst Hydrogeology and Human Activities* y por Goldscheider y Drew (2007) *Methods*

in *Karst Hydrogeology*. Posiblemente una de las obras más consultada sea la de Ford y Williams, *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, publicada en 1989 y reeditada en 2007, aunque también es un clásico el libro de White (1988).

Los congresos, simposios y otras reuniones científicas han sido también muy numerosos; las asociaciones científicas y los centros de investigación promovieron muchas reuniones sobre hidrología que solían albergar sesiones sobre karst; algunas de las reuniones específicas fueron las de Besançon (Francia) en 1970, Olomouc (Checoslovaquia), Hannover (Alemania) y Kranj (Yugoeslavia) en 1974. Siguió una larga lista de eventos, de los que destacan por su continuidad los celebrados en varias ciudades de Turquía, y los de Besançon y Neuchâtel, que se han alternado desde hace más de dos décadas, y a los que se unió Málaga, tras dos previos en Nerja. Las actas de todos estos eventos sirvieron para difundir los nuevos avances científicos. Mención especial merecen los eventos *Reunión Monográfica. Karst de Larra* (Navarra, 1982), las *Jornadas sobre Karst de Euskadi* (San Sebastián, 1986) y las *Jornadas sobre recursos hídricos en regiones kársticas* (Vitoria, 1996).

La aproximación sistémica y los modelos conceptuales

Los investigadores del Laboratorio subterráneo de Moulis del CNRS (*Centre National de la Recherche Scientifique*) abrieron nuevas líneas de investigación tras la toma de una ingente cantidad de datos de surgencias kársticas. Mangin (1975), en su tesis doctoral, profundizó en el análisis hidrodinámico de surgencias kársticas y propuso una clasificación atendiendo a nuevos parámetros, tales como el agotamiento y el coeficiente de heterogeneidad. Este mismo autor consideró la existencia de una red *jerarquizada*, como concepto de sistema kárstico, a modo de un río subterráneo, pero con existencia de nivel freático y diversas fuentes de alimentación lateral, que denomina *sistemas anexos* y que pueden o no ser kársticos. Un ejemplo se-

ría un río sobre granitos o esquistos que pierde sus aguas en una sima en el contacto con las calizas (Fig. 2); en este último caso se tendrá un sistema *binario*. En la franja más superficial de la zona no saturada pueden existir aguas colgadas en lo que denomina el *epikarst*. Tanto Mangin como Bakalowicz interpretaron que la zona de karstificación se restringe esencialmente a la franja de fluctuación piezométrica, salvo que hayan existido cambios -actuales o pretéritos- en el “nivel de base” o cota del punto de salida del manantial. El sistema dejaría de ser “funcional” cuando la red está sobredimensionada como para evacuar el caudal de agua que recibe como alimentación; la funcionalidad aludida se refiere a que la red kárstica dejaría de contribuir al drenaje del sistema; el agua fluiría esencialmente por discontinuidades menores.

Un modelo conceptual más adecuado para el acuífero kárstico consiste en considerarlo como constituido por grandes bloques muy voluminosos de baja permeabilidad, separados por una red de discontinuidades o conductos de alta permeabilidad (Fig. 3) pero que suponen un porcentaje volumétrico bajo (Drogue, 1980).

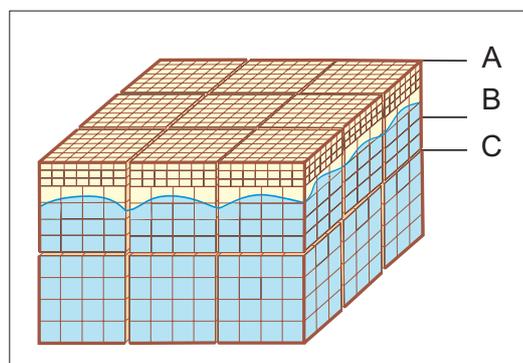


Fig. 3. Modelo conceptual de bloques y conductos; A: epikarst; B: bloques con fracturas de baja permeabilidad y flujo lento; C: conductos kársticos de alta permeabilidad con flujo rápido (adaptado de Drogue, 1980).

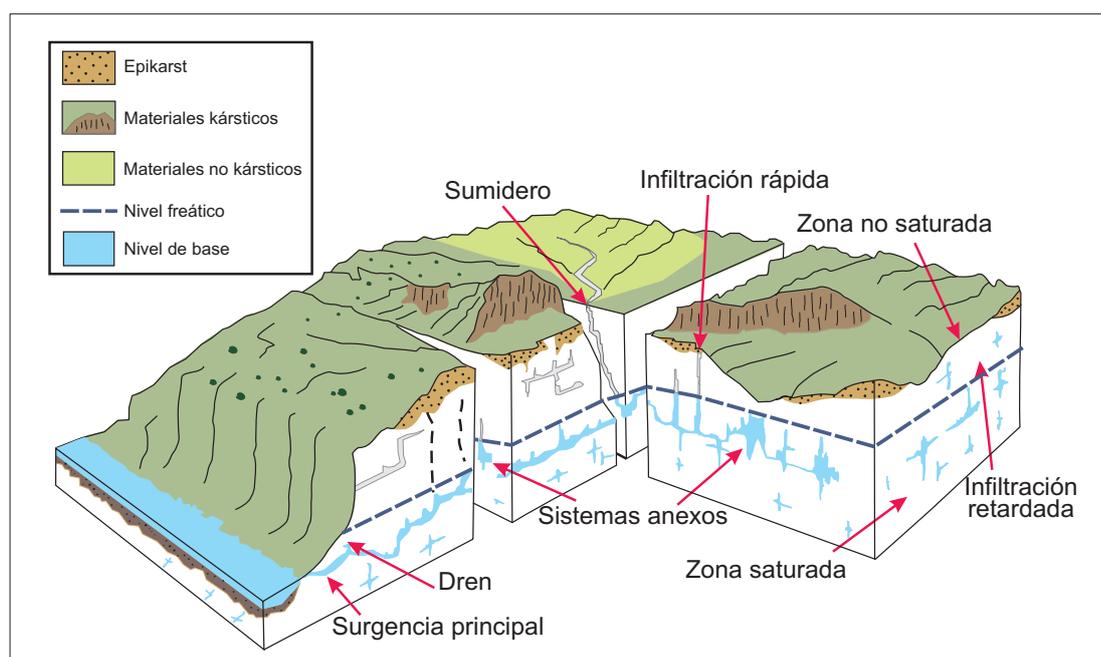


Fig. 2. Modelo del sistema kárstico y su relación con los sistemas anexos (adaptado de Mangin, 1975).

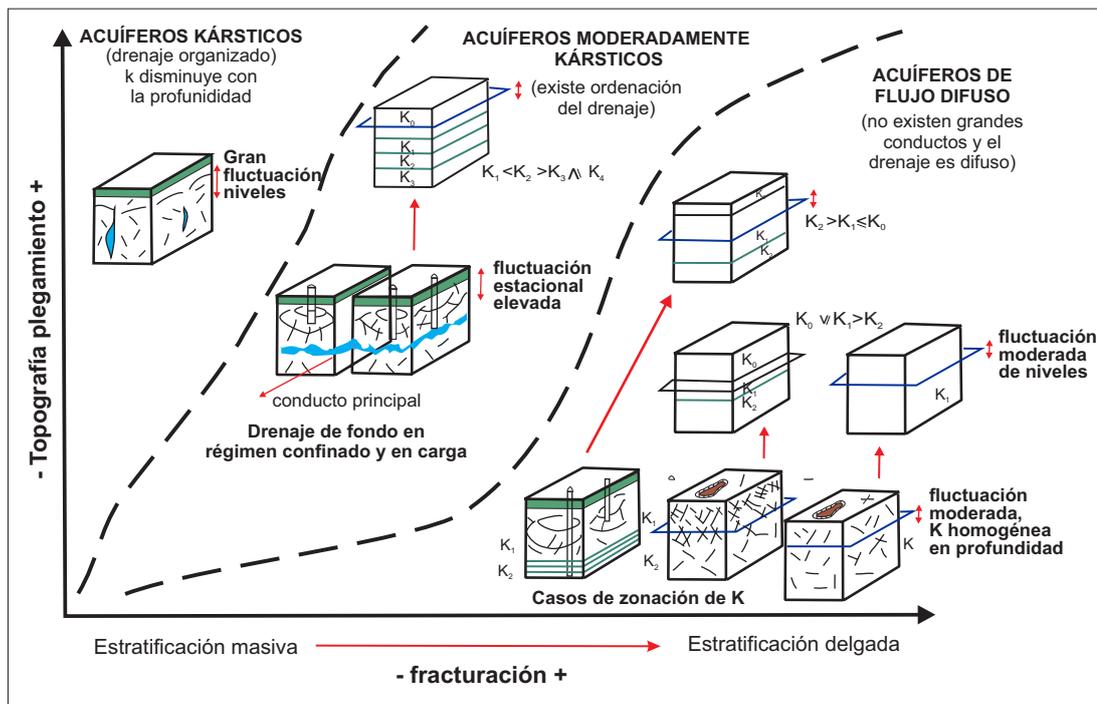


Fig. 4. Tipología de acuíferos en rocas carbonatadas propuesta por Bayó (1982), con indicación de sus características hidrodinámicas.

Los grandes volúmenes de agua almacenados en los sistemas kársticos estarían esencialmente en los bloques, que constituirían el *elemento capacitivo*, mientras que el *elemento transmisivo* sería la red de conductos. Esto explicaría por qué en el medio kárstico se tienen sondeos de elevado rendimiento junto a otros muy poco productivos.

A partir del primer modelo de Drogue (1980) se pueden hacer conjeturas sobre muchos otros, incluyendo el tipo "intermedio" (Fig. 4) que conjuga el modelo de bloques y conductos con el "jerarquizado" (Mangin, 1975), que tiene como consecuencia la existencia de un mayor valor de permeabilidad en las proximidades de las áreas de descarga que en las de recarga. Otros autores, como Bayó (1982), establecieron tipologías de acuíferos en materiales carbonatados al entender que estos sistemas están en continua evolución, ya que los procesos de karstificación están siempre activos. Consecuentemente con ello, en la naturaleza podemos encontrar macizos con redes kársticas muy evolucionadas y otros sin prácticamente desarrollo de conductos.

Los grupos de investigación europeos más relevantes

Los principales grupos europeos que hacen avanzar la hidrogeología kárstica en la década de los 70 del siglo pasado son el Laboratorio Subterráneo de Moulis, con Mangin a la cabeza en la aproximación sistémica, Rouch en la bioespeleología y su contribución al conocimiento de la hidrodinámica del karst, y Bakalowicz en la hidrogeoquímica del karst. La aplicación de los análisis de series temporales a los datos diarios de caudales de surgencias kársticas y de precipitaciones hizo avanzar notablemente el conocimiento de las descargas de los acuíferos kársticos carentes de otros puntos de observación. Los análisis de correlación y espectrales, tanto simples como cruzados, continúan aplicándose en muchas partes del mundo.

El equipo del profesor Drogue, de la Universidad de Montpellier, muestra avances significativos en el planteamiento de modelos conceptuales, como el de bloques y conductos, teniendo en cuenta el estudio y la importancia del análisis de la fracturación (Grillot, Razack, etc.); en la Universidad de Neuchâtel, destacan las investigaciones de los profesores Burger y Kiraly, éste último gran experto en simulación matemática de acuíferos kársticos; Zwahlen tomó el relevo de Burger. La Universidad de Besançon (Chauve y Mudry) ha sido también muy activa en los últimos 30 años, al igual que la de Bari (Italia), con Cotecchia y Tulipano, desarrollando los aspectos fisicoquímicos de acuíferos kársticos costeros y la relación karst-obras civiles.

En la Universidad de Granada tomó cuerpo un activo grupo que profundizó notablemente en las ideas de Mangin, pero con muchos más datos de sondeos de explotación, consiguiendo superar las restricciones impuestas por el karst de alta montaña del pirineo francés y los Alpes suizos, con notables contribuciones a la simulación matemática de acuíferos kársticos (Pulido Bosch, Padilla, Calvache, López Chicano); se profundizó notablemente en el karst en evaporitas (Calaforra) y en los procesos de sobreexplotación en acuíferos kársticos para llegar a matizar los modelos conceptuales que limitaban el almacenamiento al mal llamado nivel de base (Andreu, Vallejos, Molina, Sánchez Martos...); el equipo siguió investigando desde la Universidad de Almería, con especial énfasis en los aspectos hidrogeoquímicos y en la incorporación de los GIS como técnica auxiliar de gran potencialidad y versatilidad (Daniele, España, ...).

La Universidad del País Vasco ha sido un pilar básico en la contribución al conocimiento del karst en muy diversas facetas. Antigüedad fue el pionero, al que han seguido Morales y numerosos doctores posteriores, con avances tanto en la hidrodinámica del karst como en los aspectos morfológicos (Antigüedad *et al.*, 2007).

Posteriormente, la Universidad de Málaga se incorporó con gran fuerza (Carrasco), y es posiblemente en la actualidad el grupo más potente, con más medios y el más activo, liderado por Andreo. Junto con investigadores de Neuchâtel y Besançon organizan la reunión europea sobre karst de mayor impacto internacional. Además de las técnicas convencionales, han profundizado en trazadores, hidrogeoquímica e isótopos en las aguas del karst.

Las Acciones COST

Las Acciones COST (*European Cooperation in Science and Technology*), promovidas por la Unión Europea, han constituido posiblemente la iniciativa que más ha hecho colaborar a los grupos de investigación europeos en el conocimiento del karst. La primera gran acción (1991-1994) fue la *Action 65* denominada *Hydrogeological aspects of the protection of groundwaters in karstic areas*. En ella participaron 16 países europeos (Alemania, Austria, Bélgica, Croacia, Eslovenia, España, Francia, Hungría, Irlanda, Italia, Portugal, República Checa, Reino Unido, Serbia, Suiza y Turquía), que estrechó lazos, creó redes de colaboración, generó numerosas publicaciones e incluso propuso Normas de Protección de las aguas del karst (EU, 1995).

Dicha Acción sirvió de base para la realización de otras dos grandes acciones: 620 y 621. La primera de ellas, COST *Action 620* (1996-2000), *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*, con más países integrantes que la anterior, generó numerosas propuestas de normas y de herramientas de elaboración que han sido parcialmente incorporadas por las administraciones. La COST *Action 621* (1997-2001), *Groundwater management of coastal karstic aquifers* (Tulipano *et al.*, 2005; Calaforra, 2004) hizo igualmente avanzar el conocimiento de los acuíferos kársticos costeros, con notables ejemplos de muchos de los 12 países integrantes del proyecto: Austria, Croacia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Italia, Eslovenia, España, Malta, Portugal y Turquía.

Numerosos proyectos fueron también financiados por otras entidades u organizaciones. Nuestro Grupo colaboró en los proyectos CSIC-Academia Búlgara de las Ciencias: *Análisis y modelación de los elementos de los manantiales kársticos para su caracterización y previsión de evolución temporal* (1991) y *Análisis comparativo de las estructuras de acuíferos kársticos* (1992); UE-Programa COPERNICUS con Bulgaria: *Ecological problems of karst waters caused by overexploitation and contamination (on the example of North East Bulgaria)* (1994-1997); ICI: *Simulación matemática de los acuíferos costeros kársticos de Pinar del Río, La Habana y Matanzas, Cuba* (1994). *Simulación matemática del acuífero costero de Zapata, provincia de Matanzas, Cuba* (1995); *Les Rencontres Méditerranéennes du Karst*, EU, DG XI Francia, Portugal y España, 1995 y el proyecto con Bulgaria *Groundwater karst systems: conceptual modelling and evaluation of their vulnerability* (1999-2001) financiado por la OTAN.

Las técnicas de investigación

Como cualquier dominio científico, los métodos y técnicas utilizadas para investigar el karst cubren

una amplia gama, especialmente después de la incorporación de especialistas de dominios muy diversos a estos estudios (Andreo *et al.*, 2015). Los *métodos geológicos* que incluyen los estratigráficos, tectónicos, con especial relevancia de los relativos a la fracturación, estructurales e incluso sedimentológicos.

La observación directa del medio kárstico requiere de las técnicas y *métodos espeleológicos* (Klimchouk *et al.*, 2000; <http://www.speleogenesis.info/>) para reconocer, las cavidades, conductos y redes kársticas (<http://nckri.org/>). En dichas redes kársticas accesibles se aplican todas las *técnicas hidrológicas*, que incluyen los aforos, la instalación de *sensores* cada vez más sofisticados y precisos de parámetros físicos y químicos en esas redes y puntos de observación. Un espectacular avance se ha realizado en las *técnicas isotópicas* que incluyen isótopos estables y radioactivos que matizan tiempos de tránsito, mezclas y posibles orígenes del agua (<http://www.iah.org/karst/>).

Los avances han sido igualmente muy significativos en todo lo relacionado con los *trazadores* que se han convertido en una herramienta clave en el establecimiento de áreas de protección. La mayor parte de los *métodos geofísicos de prospección* tiene también cabida en las técnicas de estudio, con notables avances en el radar, sísmicos y las variantes más modernas de los métodos de resistividades. Las técnicas basadas en los *análisis de imágenes* de satélite de muy alta resolución abren un campo en el que queda mucho por hacer. Pero posiblemente el campo en que más se ha avanzado es en la *simulación matemática* del medio kárstico (Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2014), desde un conducto hasta la totalidad de un macizo y bajo condiciones de flujo muy variables, desde el punto de vista físico, hidrogeoquímico y espeleogenético.

CONSIDERACIONES FINALES

Los materiales kársticos conforman paisajes únicos con gran variedad de formas superficiales (exokarst) tales como diferentes tipos de lapiaz, kársticas, dolinas, uvalas, poljes, sumideros, simas, valles ciegos, valles muertos, gargantas encajadas, marmitas de gigante, mogotes, cenotes o casimbas,... y subterráneas (endokarst), como abrigos, cuevas, estalactitas, estalagmitas, columnas, gours, gateras... Además, estos terrenos suministran multitud de servicios ecosistémicos y son probablemente el principal abastecimiento de agua potable a cerca del 25 % de la población mundial (Ford y Williams, 2007).

Por todo ello, la profundización y avance en su conocimiento reviste el máximo interés. La densa investigación llevada a cabo por numerosos expertos en diversos dominios permite afirmar hoy que el conocimiento adquirido es muy amplio; para llegar ahí ha habido muchos pioneros, algunos de los cuales han sido citados en este artículo.

Por la naturaleza misma de los acuíferos kársticos, se suele admitir que son especialmente vulnerables a la contaminación, como se ha probado a lo largo del tiempo y en los cinco continentes. En consecuencia, estos entornos requieren unas medidas protectoras especiales y hay que avanzar en esa línea.

Otro aspecto de gran interés, que no ha sido abordado, es el relacionado con los riesgos y peligros de colapsos y subsidencias con graves consecuencias para el medio y para los intereses económicos. Las obras civiles pueden generar serios impactos debido al drenaje inducido y por acelerar procesos de disolución que pueden reducir la estabilidad de las actuaciones. Los embalses constituyen buenos ejemplos de afección, así como los túneles bajo el nivel saturado. El karst sigue siendo un mundo muy apasionante que tiene que ser protegido.

BIBLIOGRAFÍA

- Andreo, B. Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P., LaMoreaux, J.W. (Eds.) (2015). *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. Springer, 638 p.
- Antigüedad, I., Morales, T., Uriarte, J.A. (2007). Los acuíferos kársticos. Casos del País Vasco. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15-3, 325-332.
- Bayó, A. (1982). La exploración hidrogeológica de acuíferos en rocas carbonatadas desde la óptica de la exploración de recursos y utilización del almacenamiento. *Reun. Mon. Karst Larra*, 177-215
- Burdon, D.J. y Papakis, N. (1963). *Handbook of karst hydrology*. Athens, Greece, United Nations Special Fund, Institute for Geology and Subsurface Research, 276 p.
- Burger, A. y Dubertret, L. (Eds.) (1975). *Hydrogeology of karstic terrains*. IAH, Paris, 190 p.
- Burger, A. y Dubertret, L. (Eds.) (1984). *Hydrogeology of karstic terrains: West Germany*. Hannover; Verlag Heinz Heise GmbH. IAH, I, 264 p.
- Calaforra, J. M. Ed. (2004). *The main coastal aquifers of southern Europe*. COST Action 621. EU, 123 p.
- Cvijic, J. (1893). Das Karstphaenomen. Versuch einer geographischen Morphologie. *Geogr. Abhandlungen von A. Penck*, Vienna, 3, 217-230.
- Cvijic, J. (1918). Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst. *Recueil des Travaux de l'Institut de Gographie Alpine*, Grenoble, 6, 375-429.
- Cvijic, J. (1960). *La Géographie des Terrains Calcaires*: Monographies of the Serbian Academy of Sciences and Arts, 341.26, 212 p.
- Drew D. y Hötzl H. (Eds.) (1999). *Karst Hydrogeology and Human Activities*. Balkema, Rotterdam, 322 p.
- Drogue, C. (1980). Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonatés fisurés. Application à l'interprétation de certains aspects du fonctionnement hydrogéologique. *Mem. Soc. Géol. France*. II, 101108.
- European Commission. (1995). *Karst groundwater protection*. COST Action-65. Report EUR 16547 EN, 446 p.
- Ford, D. y Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, 576 p
- Forti, P. (2009). *Introduction to Speleology*. Teaching Resources in Speleology and karst. Soc. Speleo. Ital.
- Goldscheider, N. y Drew, D. (Eds.) (2007). *Methods in Karst Hydrogeology*. Taylor & Francis, London, 264 p.
- Grund, A. (1903). *Die Karsthydrographie*. Studien aus Westbosnien: Penck's Geographische Abhandlungen, 9, 1-200.
- IASH (1965). *Hydrology of fractured rocks*. Proceedings of the Dubrovnik Symposium, Gentbrugge, Belgium, 689 p.
- Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. y Dreybott, W. (Eds.) (2000). *Speleogenesis: evolution of Karst Aquifers*. Huntsville, Ala. National Speleological Society, 527 p.
- LaMoreaux, P.E. y LaMoreaux, J. (2007). Karst: the foundation for concepts in hydrogeology. *Environmental Geology*, 51, 685-688.
- Llopis, N. (1970). *Fundamentos de hidrogeología cársica*. Ed. Blume, Madrid, 269 p.
- Maillet, E. (1905). *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*. Hermann, Paris, 218 p.
- Mangin, A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doct. Dijon. En : *Ann. Spéléol.*, 29-3, 283332; 29-4, 495601; 30-1, 21124.
- Martel, E.A. (1894). *Les abîmes*. Ch. Delagrave. Paris, 578 p.
- Martel, E.A. (1921). *Nouveau traité des eaux souterraines*. Doin, Paris, 838 p.
- Mijatovic, B.F. (Ed.) (1984). *Hydrogeology of the Dinaric karst*. IAH, serie azul, Heise, 4, 255 p.
- Pulido Bosch, A. (2014). *Principios de Hidrogeología Kárstica*. Ed. Univ. Almería, 409 p.
- Sokolov, D.S. (1965). *Hydrodynamic zoning of karst water*. AIHS/UNESCO, Paris, I, 204-207.
- Tulipano, L., Fidelibus, M.D., Panagopoulos, A. (Eds.) (2005). *Groundwater Management of Coastal Aquifers*. Final Report COST 621, 366 p.
- White, W.B. (1988). *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Oxford University Press, New York, NY, 464 p. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 1 de octubre de 2015 y aceptado definitivamente para su publicación el 20 de enero de 2016