

# Investigación y exploración de acuíferos kársticos

A. Pulido Bosch

Departamento de Hidrogeología, Edificio Cite II-B. Universidad de Almería, 04120 Almería.  
E-mail: apulido@ual.es

## RESUMEN

Los acuíferos kársticos presentan una serie de singularidades que los diferencian notablemente de los acuíferos de porosidad intergranular, aunque en realidad la tipología de los primeros puede ser bastante variada, en función de la importancia relativa de las discontinuidades, porosidad de la matriz, grado e intensidad de la karstificación, entre otros factores. Se comentan los principales métodos de investigación y exploración de los acuíferos kársticos, tales como los análisis morfoestructural, y geomorfológico, los geofísicos, los hidrodinámicos, los balances, las herramientas hidrogeoquímicas, los trazadores, y la simulación numérica. De acuerdo con los resultados de esta caracterización con los métodos reseñados se estará en condiciones de decidir la mejor técnica de captación y, eventualmente, la ubicación más idónea de la misma.

Palabras clave: acuíferos kársticos, captación, exploración, tipología

## *Investigation and exploration of karstic aquifers*

### ABSTRACT

*Karstic aquifers have many peculiarities that make them remarkably different from the ones with intergranular porosity. However, the typology of the first ones can be fairly varied, depending, amongst other factors, on the relative importance of the discontinuities, the matrix porosity and the karstification degree and its intensity. The main methods of research and exploration of the karstic aquifers are commented, such as the morpho-structural and geomorphological analysis, the water budgets, the hydrogeochemical and tracer tools, and the numerical simulation. According to the results of this characterization obtained with the methods mentioned, we will be able to decide the best exploitation system and eventually the best location for this one.*

*Key words: exploitation system, exploration methods, karstic aquifers, typology*

## Introducción

Los métodos potencialmente aplicables en la investigación de acuíferos kársticos son muy diversos, aunque en cada caso puede existir el más adecuado y óptimo en función de unos factores que no siempre son bien conocidos. Además, los acuíferos kársticos incluyen tipos muy diferentes, en función de su comportamiento, desde auténticos ríos subterráneos, cuyo almacenamiento se ciñe a unos grandes conductos, con velocidades de tránsito muy elevadas, escaso tiempo de residencia, hasta el acuífero muy inercial, de grandes reservas, karstificación homogénea y, eventualmente, matriz porosa y microporosa (Király *et al.*, 1995; Motyka, 1998).

La caracterización del funcionamiento del sistema y de su grado de karstificación -cuando su recarga procede únicamente de la infiltración de la precipitación caída sobre la superficie aflorante- se puede deducir de la simple visualización del hidrograma al que se superponen las precipitaciones, de manera que cuan-

do la respuesta de las surgencias a las lluvias es inmediata, con disminución brusca del caudal al cesar la precipitación, se tiene un sistema altamente karstificado de bajo poder regulador y, posiblemente, de reservas escasas. Un parámetro sencillo que permitiría comparar un sistema con otro es la relación  $Q_{max}/Q_{min}$ , de manera que cuanto mayor sea más karstificado está el sistema. Para ello se requiere un registro adecuado de precipitaciones en el macizo -de estructura y geometría aceptablemente conocida- y de caudales en la surgencia principal.

Como las dimensiones del macizo carbonatado juegan un papel en la respuesta de las surgencias, siempre es necesario emplear tratamientos más avanzados tales como el *análisis de las curvas de recesión* (Mangin, 1975; Bonacci, 1987) o, mejor aún, el hidrograma correspondiente a varios ciclos mediante el *análisis de correlación y espectral simple y cruzado* (Mangin, 1984; Antigüedad, 1994; Padilla *et al.*, 1994), los *modelos AR, MA, ARMA, ARIMA y ARMAX* (Hipel y McLeod, 1994; Padilla *et al.*,

1996), o la *deconvolución* (de Marsily, 1978; Pulido Bosch *et al.*, 1987; Labat *et al.*, 1999 a). Las *redes neurales* (Carasone *et al.*, 1996), y el *método del análisis de "ondelettes"* (Labat *et al.*, 1999 b) pueden igualmente contribuir a la caracterización de los sistemas mediante datos de caudales de surgencias representativas. Los datos hidrogeoquímicos también contribuyen a la caracterización de la karstificación y funcionamiento del sistema mediante muy pocos parámetros, caso del procedimiento de Bakalowicz (1979) que sólo requiere un registro continuado de conductividad de las aguas de la surgencia, o mediante tratamientos más complejos y sofisticados tales como los quimiogramas junto con las lluvias y el caudal (Pinault *et al.*, 2001; Muguerza, 2001).

El objetivo esencial de este artículo es hacer un somero repaso a los principales métodos de investigación y exploración de los acuíferos kársticos, indicando una serie de referencias bibliográficas en las que el lector puede profundizar en las técnicas o métodos que más le interesen. El conjunto se completa con unas ideas sobre las aplicaciones prácticas más inmediatas de tales técnicas, desde el punto de vista del método de captación a utilizar y de la ubicación física de las captaciones.

## Los métodos de investigación y de exploración

### *Aspectos generales*

La investigación de los acuíferos kársticos, desde el punto de vista de la cuantificación del recurso, determinación del funcionamiento del sistema y/o de la ubicación de una captación, tiene muchos elementos comunes con los métodos empleados en la exploración en otros tipos de acuíferos, aunque también numerosas peculiaridades, tanto de la técnica de aplicación como de la interpretación propiamente dicha.

Unos métodos permiten caracterizar el medio kárstico, y otros el flujo y los fenómenos de transporte, y ambos, a su vez, serían la base de la gestión racional del agua del sistema (UE, 1995). Pueden utilizarse para el conocimiento general del sistema, o para la ubicación de captaciones -no todos-; pueden emplear desde superficie, o desde el interior del macizo -sondeos y cavidades- y frecuentemente como variantes específicas para este tipo de terrenos. En este último caso la incertidumbre es probablemente mayor, de acuerdo con las características generales del acuífero kárstico. Una conclusión general es la necesidad de complementar las observaciones; es recomendable recurrir a más de un método para reducir las ambigüedades que cada método

tiene por separado. Dentro de los que aportan información sobre el medio kárstico, se tienen el análisis morfoestructural, los métodos geofísicos, desde superficie y en sondeos, y las medidas y análisis hidrodinámicos. Este último es también típico -especialmente cuando se refiere al análisis de hidrogramas y las pruebas de bombeo- de la caracterización del flujo y transporte en el sistema.

Los más específicos del flujo son los basados en el balance, recarga y distribución de la infiltración, los hidrogeoquímicos y los trazadores naturales y artificiales, y la simulación numérica. La aplicación conjunta de estos métodos permite caracterizar al sistema, tanto en los aspectos geométricos como de funcionamiento, recursos disponibles y posibilidad de captación.

### *El análisis morfoestructural*

Estas técnicas permiten delimitar las áreas de recarga, los límites de los sistemas, las divisorias, posición de formas de disolución, paleodirecciones del flujo y direcciones actuales, zonas de descarga, emplazamientos favorables para ubicación de captaciones, delimitación de zonas de protección y mapas de vulnerabilidad, determinación de los esfuerzos, evolución tectónica, espeleogénesis y morfogénesis (Razack, 1984; López Chicano, 1992; Pistre *et al.*, 1999). El abanico de posibilidades es, pues, muy amplio.

Las herramientas para este tipo de análisis son muy variadas y van desde material muy sencillo hasta otro muy sofisticado. Mapas topográficos, fotografías a escalas diversas, fotografías infrarrojas -altamente sensibles a los cambios de temperatura-, y otras imágenes de satélite. El análisis estructural clásico, en afloramientos, carreteras, cavidades y otros puntos de acceso al endokarst, sirve de complemento a las observaciones generales (Greene y Rahn, 1995).

Los datos susceptibles de representación cartográfica y/o digitalización son distintos según que se haga a escala regional o a escala local. Dentro de la primera, se tienen: lineamientos, fracturas principales, contactos geológicos, recubrimientos, la red de drenaje, escarpes rocosos, valles ciegos y muertos, planos de karstificación, sumideros, simas, cuevas, poljes, dolinas, alineaciones de estas formas exokársticas, divisorias, puntos acuíferos, anomalías termales a lo largo de la costa, entre otros. A escala local, las observaciones abarcan formas de menor tamaño y otras no visibles a la escala regional. Entre otras, se pueden representar y/o medir fracturas de orden

menor, fisuras, estilolitos, venas, estrías en los planos de fractura, resaltes morfológicos, kaménicas, lapia- ces, y zonas de rezume.

Todos estos datos se pueden estudiar de forma estadística o teniendo en cuenta su posición espacial -geoestadística- o ser objeto de representaciones gráficas que atienden a su densidad espacial, para tratar de obtener información sobre rasgos del funciona- miento, o la historia tectónica del área, relación entre estos rasgos o el flujo pasado, actual (Eraso y Domínguez, 2000), a menudo comparado con los resultados obtenidos mediante otras técnicas, tales como los trazadores. Los Sistemas de Información Geográfica constituyen un buen complemento (Doerfliger y Zwahlen, 1996) y un campo de investi- gación abierto en el dominio de karst y más concre- tamente en los estudios de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación (Muguerza, 2001).

### *Los métodos geofísicos*

Los métodos geofísicos, aerotransportados, de superficie o en sondeos, constituyen una herramien- ta básica en la exploración (Olmo y López Geta, 2000), tanto en los aspectos relativos a la detección de dis- continuidades, límites de los sistemas, como para el seguimiento de trazadores y, muy frecuentemente, para la ubicación de sondeos u otras captaciones; en el interior de sondeos son de notable utilidad para determinar parámetros formacionales, fisicoquímicos de las aguas, conexión de acuíferos, parámetros hidráulicos y dimensionales, entre otros.

Los métodos más usualmente empleados (Casas, 2000) continúan siendo los clásicos eléctricos, espe- cialmente las modalidades de SEV -únicos, pluridirec- cionales, y cuadrados, en el caso de determinar ani- sotropías- y calicatas; las segundas permiten caracterizar bien las discontinuidades -fracturas ?- eventualmente productivas, aunque este extremo no es inequívocamente alcanzable. También son clásicos los métodos variantes del de las líneas equipotencia- les; el más usual es el del cuerpo cargado o "mise à la masse", utilizado con bastante éxito en numerosos casos.

Los SEV, para la escuela de la antigua Yugoslavia, son una herramienta útil al momento de definir la franja karstificada sobre la franja carbonatada no karstificada o poco; ambas franjas presentarían un contraste de resistividad notable (Arandjelovic, 1984). La aceptación indiscriminada de este tipo de interpre- tación puede tener consecuencias graves, al conside- rar prácticamente impermeables las calizas a partir de una profundidad dada. Otro problema de los SEV,

común a todos aquellos métodos que requieran cla- var electrodos en el terreno -frecuentemente insalva- ble en amplios sectores de borde mediterráneo- es la imposibilidad o gran dificultad de clavarlos, garanti- zando una adecuada conexión eléctrica, al haber sido erosionado el suelo. Posiblemente una de las aplica- ciones más seguras de los SEV se encuentre en la detección del material carbonatado bajo un recubri- miento de otra naturaleza hidrogeológica -arcillas, margas, y filitas-; el contraste geoelectrico suele ser suficientemente acusado como para permitir la iden- tificación. Igualmente resolutive se puede mostrar en la investigación del contacto agua dulce-agua salada, bajo recubrimientos (caso del Campo de Dalías, por ejemplo; Pulido Bosch *et al.*, 1989).

Los métodos electromagnéticos, aunque de apli- cación más costosa en general, pueden llegar a ser mucho más resolutivos que los eléctricos más convencionales (Granda *et al.*, 1987), permitiendo la localización de discontinuidades. Las diferentes modalidades de Sondeos Electromagnéticos, VLF, Slingram, Polarización Inducida en los dominios de tiempo y frecuencia, identifican bien los contactos litológicos y las grandes fracturas. Sirva como dato anecdótico el que en la investigación del conducto kárstico subterráneo de Port-Miou, en las cercanías de Marsella, fueron los métodos electromagnéticos los más resolutivos, permitiendo el seguimiento del conducto a 50 m de profundidad; tanto los métodos de resistividades como P.I., P.E. y "mise à la masse" no dieron resultados aceptables.

Las tomografías de resistividad en 2D y 3D pueden ser muy resolutivas en medios anisótropos como las calizas karstificadas y la creta (Ogilby *et al.*, 1999), especialmente cuando se complementan con datos suministrados por sondeos mecánicos. Frecuen- temente se utiliza para ello un dispositivo electrónico polo-dipolo de espaciado variable, función de la pro- fundidad de investigación deseada, con medidas muy cercanas y gran densidad de perfiles. La conversión de los datos en valores de resistividad del terreno requiere un soporte de cálculo sofisticado (modelo en diferencias finitas, por ejemplo).

Los métodos sísmicos, especialmente de refle- xión, son muy resolutivos, aunque su aplicación sería muy costosa. Los avances tecnológicos en la sísmica aplicada a la investigación petrolífera son muy gran- des, pudiendo trabajar en 2-D y 3-D, con resoluciones muy grandes. En fechas próximas se va a llevar a cabo una campaña de sísmica de reflexión en el Campo de Dalías, de la que se espera que dé res- puesta a las numerosas incógnitas que quedan aún sobre la geometría de un sistema tan complejo. Normalmente se trabaja con fuentes energéticas que

cubren una superficie relativamente grande (por ejemplo 7x7 sondeos), y cada traza tiene gran cantidad de geófonos con el fin de garantizar el registro adecuado de la energía ordenada, y eliminar los ruidos, tan abundantes en áreas habitadas.

La sísmica de refracción, mucho menos costosa, arroja anomalías muy llamativas (Müller, 1979) cuando existen grandes discontinuidades en el subsuelo -cavernas- aunque no es muy resolutive en la mayoría de los casos restantes, especialmente si la geometría de los contactos litológicos es muy irregular.

El radar -con principios de aplicación muy parecidos a los de los métodos sísmicos- constituye una técnica de gran potencialidad en la detección de fracturas, discontinuidades e incluso cavidades situadas a escasa profundidad (menos de 50 m). Tanto en la modalidad de calicatas como en la de sondeos de velocidad, los resultados que se pueden obtener son bastante satisfactorios.

La Resonancia Magnética Nuclear (RMN) o Protónica (RMP) como otros prefieren llamarla (Beauce *et al.*, 2000), parece emerger con gran fuerza, al asignarle la propiedad de permitir la detección de parámetros formacionales, aunque dentro de un orden. El método se basa en que los momentos de los núcleos de hidrógeno -cuya cantidad en el subsuelo dependerá normalmente del contenido en agua- se alinean con el campo magnético terrestre. Si se introduce otro campo magnético a una determinada frecuencia, se modifica el equilibrio. Cuando cesa el campo externo se produce una vuelta al equilibrio, para lo cual los protones generan un campo magnético de relajación susceptible de ser medido como señal de RMN, la cual será tanto mayor cuanto más alto sea el contenido en agua del subsuelo. Este método, como todos los métodos geofísicos, tiene unas condiciones óptimas de aplicación y una profundidad limitada de investigación. Las áreas de topografía suave y subsuelo lo más homogéneo posible son las más adecuadas. Se puede aplicar también desde sondeos.

La gravimetría y microgravimetría ha sido aplicada con éxito en la localización de zonas de fractura (Granda, 1986) y cavidades no muy profundas, aunque su aplicación, además de costosa, tiene numerosas incertidumbres que hacen que sea poco utilizada en la vida real. Ello se debe, entre otros motivos, a que las áreas kársticas, especialmente el "karst de montaña", presentan una topografía muy abrupta, por lo que las correcciones a realizar para obtener las anomalías de Bouguer y residual, pueden introducir errores superiores a la anomalía generada por el rasgo kárstico buscado.

Los registros en sondeos constituyen una herra-

mienta de exploración en el karst con grandes perspectivas, no sólo por la información que aportan sobre la obra en sí, sino por que permiten identificar flujos preferenciales, existencia de alimentación vertical, discontinuidades; posiblemente los registros termométricos -además de ser muy poco costosos y sencillos- sean los de mayor resolución, aplicados con mucho éxito en Italia (Tulipano, 1988; Tulipano y Fidelibus, 1995) y, más recientemente, en el Campo de Dalías (Molina, 1998) y el Medio Andarax (Sánchez Martos, 1997). En esencia, el método consiste en hacer registros de temperatura del agua en una serie de sondeos con una sonda de adecuada precisión (0.05 °C); las áreas de flujo preferencial presentarán una anomalía negativa en período de alimentación, cuando la temperatura ambiental es inferior a la media anual; los sectores con alimentación vertical ascendente presentarán anomalía térmica positiva. Aunque de muy fácil aplicación, es preciso contar con suficientes sondeos igualmente penetrantes y de características constructivas bien conocidas para poder llegar a establecer la distribución tridimensional del campo de las temperaturas; es por ello que la aplicabilidad real es muy restringida. En la figura 1 se recoge un ejemplo.

Los registros más clásicos y convencionales tanto eléctricos -localizados o no, micro o macro- como sónicos, radiactivos naturales y artificiales son también de gran utilidad. Pero posiblemente la herramienta más resolutive en sondeos sea la cámara de video sumergible; aunque han pasado muchos años desde las primeras aplicaciones en España (trasvase Tajo-Segura; Fernández-Rubio, 1968) los nuevos equipos en color, con cobertura en todas las direcciones, zoom, y capaces de resistir altas presiones, constituyen la mejor posibilidad de reconocimiento del karst en profundidad, con resolución solamente superable por la observación directa en afloramiento (Pulido Bosch *et al.*, 1999).

Los medidores de flujo en sondeos tuvieron una época de moda, aunque en la actualidad han pasado a un discreto segundo plano. No obstante, siguen constituyendo una herramienta cuya correcta utilización puede aportar una información muy importante sobre la karstificación y el flujo preferencial en los sondeos mecánicos y su entorno (Rouhiainen, 1993).

#### *Métodos hidrodinámicos*

Dentro de este apartado se incluirían técnicas hidrogeológicas tan convencionales como las pruebas de bombeo -en sondeos o surgencias (Bakalowicz *et al.*, 1994)- o inyección, evoluciones piezométricas,

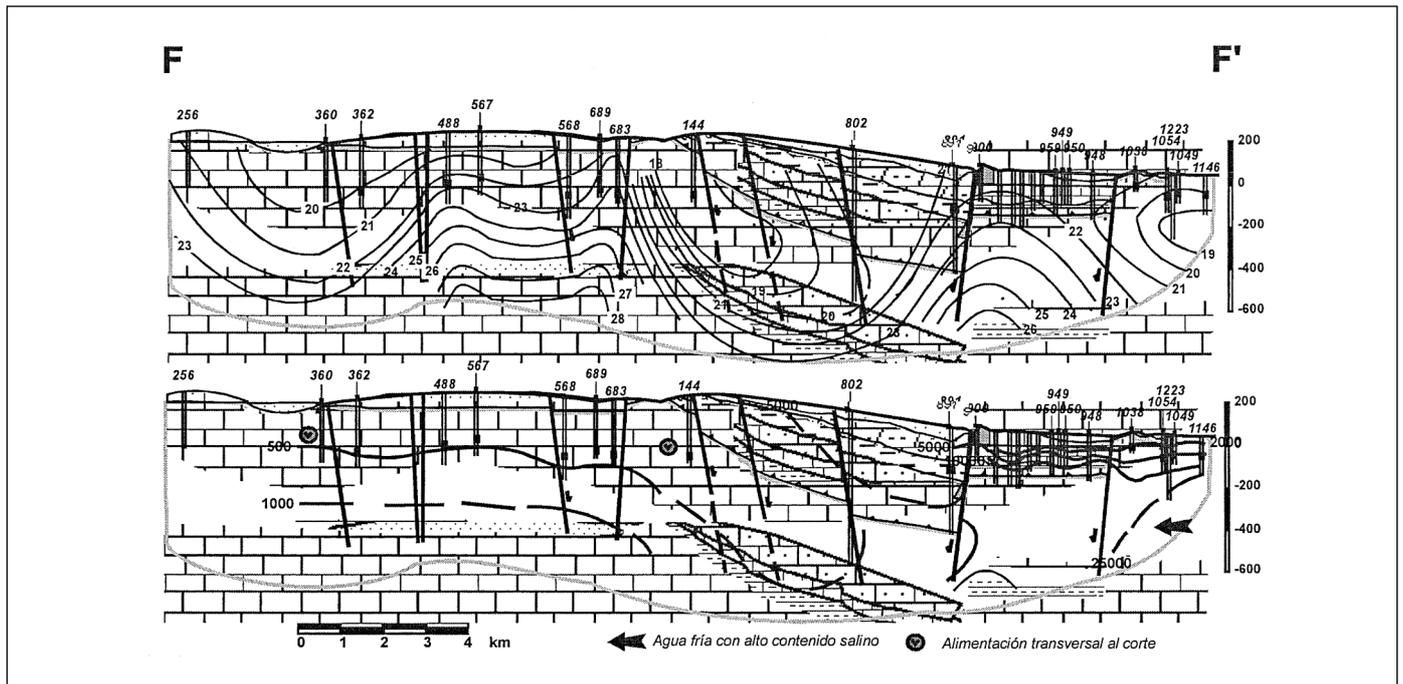


Fig. 1. Dos cortes de conductividad y temperatura, respectivamente, en un perfil del Campo de Dalías paralelo al borde de la Sierra de Gádor

Fig. 1. Two cross-sections of conductivity and temperature, respectively, in the southern edge of Sierra de Gador, in the Campo de Dalías

y caudales de surgencias (Mace y Hovorka, 2000). La heterogeneidad del medio y la complejidad de su funcionamiento hacen que los datos aislados, tomados sin una correcta periodicidad, aporten escasa información susceptible de ser interpretada de manera errónea (Bakalowicz *et al.*, 1996).

El trazado de curvas isopiezas puede resultar muy difícil si se tiene en cuenta la red de bloques y conductos; las frecuentes divisorias teóricas existentes pasarían totalmente desapercibidas o se terminaría dibujando una superficie piezométrica muy alejada de la realidad. Las medidas de potencial puntuales en una misma vertical y su evolución temporal pueden aportar mucha información sobre el funcionamiento local y/o regional del sistema (Király, *et al.*, 1995).

Los registros de caudales y/o de niveles con un paso de tiempo bajo permiten caracterizar procesos tales como la alimentación rápida y/o retardada, respuesta a precipitaciones, propagación de contaminantes, relaciones drenes-bloques, etc. En determinados casos las evoluciones piezométricas pueden permitir estimar los valores de los coeficientes de almacenamiento y de la transmisividad de los conductos, fracturas y matriz, asumiendo determinadas hipótesis de dudosa validez (Shevenell, 1996).

#### Recarga y distribución de la infiltración

La cuantificación de los recursos de un sistema kárstico suele ser un objetivo básico en todo estudio hidrogeológico, especialmente si se pretende explotarlo de forma racional. Los métodos de cálculo de la ETR chocan frecuentemente con gran dificultad de aplicación, al poder existir lugares de infiltración privilegiada y rápida -lo cual enlaza con la cartografía de las formas de absorción-; en sistemas bien individualizados con una única surgencia fácilmente controlable, los cálculos se simplifican y se reducen considerablemente las incertidumbres en la estimación de los elementos del balance. Las complicaciones surgen en áreas de gran complejidad geológica y abundante desarrollo de coberteras -suelo y vegetación- en los que siempre quedan dudas sobre los límites -pueden ser variables en el espacio y en el tiempo- y la cuantificación de los recursos susceptibles de regulación.

No obstante lo expuesto, se pueden enunciar unos aspectos de validez general, sometidos a las excepciones inevitables: a) la infiltración media suele ser superior o muy superior a la de los medios de porosidad intergranular y se suele aproximar al 50% de la

precipitación caída en los acuíferos kársticos en el área mediterránea (Soulis, 1984); b) las velocidades de tránsito son también superiores; y c) el almacenamiento medio suele ser mucho más reducido que en el medio de porosidad intergranular. De todo ello se puede concluir que la regulación de los sistemas kársticos es normalmente más compleja que la de los sistemas detríticos.

### *Hidrogeoquímica y trazadores*

La hidrogeoquímica y trazadores ambientales y artificiales constituyen herramientas de exploración e investigación de gran potencialidad, con mucho campo aún por descubrir. La diversidad de acuíferos kársticos impide encontrar la sencilla regla de general aplicación universal, so pena de cometer errores notorios. Las sales disueltas en las aguas kársticas y sus contenidos isotópicos nos informan sobre la historia, sistemas de flujo preferencial y toda una serie de procesos relacionables con la hidrodinámica, naturaleza litológica de los límites, etc. (Custodio, 1986). Es por ello que se tiene tendencia en la actualidad a considerarlos como trazadores ambientales o naturales, que aportan información global a medio y largo plazo (Fidelibus y Tulipano, 1990).

Los isótopos se utilizan para determinar la edad de las aguas o los tiempos medios de residencia (radiactivos), o las áreas de recarga preferente; a escala más local, se pueden utilizar en la delimitación de perímetros de protección. Las técnicas isotópicas pueden tener especial interés en la determinación de la descarga al mar de los acuíferos costeros kársticos, especialmente los isótopos del radón (Cable *et al.*, 1996 a y b; Moore, 1996).

Además de las concentraciones iónicas, sus variaciones espaciales y temporales, se consigue buena información genética de las relaciones cónicas y, sobre todo, de deltas, permitiendo delimitar áreas de comportamiento hidrogeoquímico diferente, procesos de mezcla (Pulido Leboeuf *et al.*, 2001), intercambios iónicos e incluso tiempos de residencia. Para ello es necesario disponer de unas determinaciones analíticas muy precisas y fiables (Pulido Bosch *et al.*, 1995). El estudio conjunto de caudales de una surgencia y los quimiogramas puede dar buenos resultados en la descomposición de hidrogramas y en la determinación del funcionamiento del sistema. Se han cuantificado componentes de base y rápidas aplicando el ión sulfato como discriminador (Muguerza, 2001), así como las relaciones lluvia-caudal mediante modelización inversa (Pinault *et al.*, 2001) teniendo en cuenta que el  $Mg^{2+}$  representaría la componente quí-

mica del agua existente en el sistema antes del evento lluvioso, y el  $Ca^{2+}$  la relacionada con el evento simulado.

En esta misma línea se ha aplicado el Carbono Inorgánico Total, cuantificado mediante C-13, y el Orgánico para caracterizar el funcionamiento de surgencias kársticas. En los eventos muy bruscos, como fue el caso de una precipitación de unos 120 mm en pocas horas en el manantial de Vacluse (Emblanch *et al.*, 1999), se registra un notable aumento de la concentración en Mg, acompañado también de una subida en Carbono inorgánico y aumento de la temperatura del agua, lo que es interpretado como que esta infiltración rápida moviliza un agua de elevado tiempo de residencia dentro de la zona saturada. Si se utiliza el COD, los valores que se miden son los más bajos (Emblanch *et al.*, 1998) para situaciones similares en acuíferos kársticos del SE de Francia.

Los trazadores artificiales son más clásicamente utilizados en la exploración kárstica, aunque frecuentemente el objetivo esencial fue determinar la posible conexión entre dos puntos. La potencialidad de los trazadores en el karst es muy grande y constituye una herramienta imprescindible en los estudios relacionados con la propagación de contaminantes (Lepiller y Mondain, 1986; Gaspar, 1989; Höztl y Werner, 1992; Maloszewski, 1994). Además de los trazadores colorantes y químicos tradicionales (fluoresceína y ClNa), el litio se muestra muy resolutivo, al existir concentraciones muy bajas en el medio natural (Pulido Bosch y Ben Sbih, 1995; Muguerza, 2001).

Conviene recordar que las velocidades aparentes de circulación que se obtienen con estas experiencias de trazado varían notablemente si se realiza sobre un dren (0.1 a 1 m/s), cercano al mismo ( $1 \times 10^{-2}$  a  $1 \times 10^{-1}$ ), o lejos de él ( $1 \times 10^{-3}$  m/s). También se observa que esta velocidad disminuye en estiaje, y que aumenta con la proximidad de la emergencia; por todo ello, una sola experiencia con trazadores es poco expresiva, y es necesario realizar varias. Se pueden determinar las zonas de drenaje preferencial cuando se efectúan muchas experiencias desde puntos distintos.

### *Los modelos de simulación*

Aunque no se pueden considerar una herramienta de exploración, su utilización puede resultar imprescindible en una adecuada política de explotación racional de los recursos de un acuífero kárstico al permitir determinar posibles respuestas, afecciones, volumen total susceptible de ser bombeado, y afección a las surgencias. (Padilla, 1990).

Las herramientas de simulación susceptibles de

ser utilizadas son muy diversas; los modelos convencionales aplicados al medio poroso a partir de concepto de Volumen Elemental Representativo (VER), con la técnica de diferencias finitas pueden dar buenos resultados si el acuífero es *tipo Torcal*. Esta misma idea, pero superponiendo el modelo conceptual de acuífero kárstico de bloques y conductos con jerarquización (modelo "intermedio"; Pulido Bosch y Castillo, 1984) ha permitido buenos resultados en la simulación de acuíferos kársticos mediterráneos (Pulido Bosch, 1989). Más complejos aunque más precisos en apariencia, serían los modelos en elementos finitos bi o tridimensionales que teóricamente permiten simular la red de conductos kársticos, los bloques y su permeabilidad (Kiraly, 1984; Kiraly *et al.*, 1995; Eisenlohr, 1995).

Los modelos tipo caja negra o caja gris pueden dar una adecuada aproximación, permitiendo algunos de ellos la simulación de los bombeos en las surgencias y conocer la respuesta de las mismas. En este sentido, modelos como CREC, BEMER o TRIDEP pueden dar buenos resultados para la caracterización de los sistemas y la cuantificación de los elementos del balance, mientras que los dos últimos permiten también simular los bombeos sobre los caudales de la surgencia (Padilla, 1990).

### Los sistemas de captación

El medio kárstico tiene gran heterogeneidad y anisotropía, y gran variación de caudales en el tiempo. De ello se deduce, por un lado, que se impone una regulación de las aportaciones para adaptarlas lo más posible a las demandas, que normalmente funcionan de forma opuesta; y por otro, que la heterogeneidad juega un papel importante, lo que puede llevar consigo un porcentaje elevado de fracasos en las captaciones que se realicen (mayor riesgo que en los acuíferos detríticos).

Para la regulación habría que acudir a las captaciones, derivación de manantiales, embalses en las surgencias, galerías y sondeos (Pulido Bosch, 1998). También se pueden hacer obras de laminación de avenidas, cumpliendo perfectamente su fin (Mijatovic, 1975 y 1984). Las obras de regulación y almacenamiento, sin embargo, pueden plantear problemas debido a que difícilmente se consigue la estanqueidad del vaso. Sería el caso de obras tales como los embalses de Montejaque (Málaga) e Isbert (Alicante), por citar algunos españoles.

La derivación de manantiales consiste simplemente en el acondicionamiento de la surgencia, y recomendación de instalación de un perímetro de protec-

ción. Es la mejor solución en el caso de que la demanda sea igual o superior al caudal del manantial, pues no requiere ningún gasto energético. Es preciso una limpieza del lugar, localización del punto o puntos precisos de surgencia, y una canalización, por lo que se debe aprovechar para la colocación de una escala limnimétrica. En el caso de captación para abastecimiento urbano, es preciso levantar una caseta y hacer una conducción cerrada con el fin de evitar contaminación durante el transporte.

Sin embargo, lo que sucede en la mayor parte de los casos es que la demanda permanece constante a lo largo del tiempo, o funciona al contrario que las surgencias, es decir, es mayor cuando los caudales son mínimos (estío), y mínima cuando los caudales son máximos. Es por ello que se impone una regulación, para lo cual es necesario conocer las características del embalse subterráneo, su funcionamiento, y la evolución y cuantía de la demanda.

Hay muchos ejemplos en el mundo de embalses en las surgencias, algunos de los cuales se remontan a la época del emperador Dioclesiano en la antigua Yugoslavia. Consisten en la realización de un auténtico embalse justo en la salida del manantial, con lo cual se consigue retener el agua en esta obra y, lo que es más importante, incrementar en una cierta cantidad el volumen embalsado; es decir el "vaso" es el propio acuífero. Presentan las ventajas siguientes: no existe peligro de inundación catastrófica en caso de ruptura accidental de la presa; no existe riesgo de colmatación del "vaso"; las pérdidas por evaporación son despreciables; los problemas geotécnicos son insignificantes, ya que las exigencias de resistencia y estabilidad son mínimas; y los costos son bajos.

Evidentemente, antes de realizar una obra de este tipo es preciso conocer lo mejor posible el funcionamiento del sistema y sus parámetros. También se tiene que tener la certidumbre de que al aumentar la cota de la emergencia no se va a producir una salida por otro punto que quedase a cota inferior y fuera de la cerrada. También se le señala como inconveniente el hecho de que el coeficiente de almacenamiento de los sistemas kársticos es del orden de 0.01 a 0.05, aunque si se tiene en cuenta que la franja de fluctuación estacional del nivel freático suele presentar la mayor karstificación, y que es la más afectada por la obra, es presumible que los valores del almacenamiento sean más elevados.

Las galerías han sido el procedimiento de captación durante muchos años, cuando no existía la tecnología actual en los equipos de elevación. La galería como elemento regulador de acuíferos es nefasta y muy cara, salvo en condiciones muy especiales, debido al hecho de que no se modifica el régimen del

acuífero, es decir que sigue saliendo más agua cuando menos se necesita, y se reduce en estiaje, al tiempo que se reduce el volumen de agua almacenada. Tienen la ventaja aparente de que, proyectada perpendicularmente al juego de fracturas de más actividad hidráulica, proporciona mayor número de discontinuidades acuíferas que una obra vertical.

Se justificarían en el caso de que se iniciaran en material impermeable, y que se dispusiera de unas compuertas que pueden accionarse a voluntad. De no hacerse así lo que producimos es una *sangría* en el acuífero, que se manifiesta por una disminución paulatina del caudal, e incluso un secado total. Es el caso de la galería de "los Suizos" en la Sierra de Crevillente de 2.360 m de longitud y unos 3 m de diámetro, que tras atravesar unas margas, se desarrolla en las calizas que constituyen esta sierra (Andreu, 1997). Recién realizada arrojaba un caudal superior a los 500 l/s. Al poco tiempo funcionaba sólo en la época de lluvias. En la actualidad son 12 los sondeos efectuados en el interior del túnel los que extraen un caudal de unos 400 l/s durante todo el año, con el nivel piezométrico situado a más de 100 m de profundidad.

Los sondeos constituyen la forma más usual de regulación. Pueden tener características muy variables, función del objetivo previsto. Como norma usual, en materiales carbonatados se recomienda la realización de la obra a percusión. También son utilizables la rotación inversa y la rotación normal, pero con agua. Hay que desechar la rotación con lodos normales (bentonita), debido a que un sondeo así realizado resulta muy difícil de desarrollar y muy costoso, si hay pérdida de circulación. Los sondeos a rotopercusión dan muy buenos resultados por su rapidez y limpieza de perforación, aunque no pueden resolver todas las eventualidades que se pueden presentar. Así, por ejemplo, cuando atraviesan un sector muy productivo la técnica se puede mostrar poco adecuada al avance, al no poder llegar a expulsar el detritus al exterior. También tienen una limitación en el diámetro de perforación.

Existen obras menos convencionales de captación en los acuíferos kársticos del mundo, siendo especialmente singulares las de los acuíferos costeros. Sería el caso de los manantiales Ras-el-Ain, a 5 km de Tiro y a 700 m del mar que, alimentadas por las calizas cenomanense-turonenses situadas a cota mucho más elevada, surgen en unas margas a lo largo de una fractura, por lo que son artesianas. Ya los fenicios (Mijatovic, 1975) construyeron unas torres por las que el agua sube de 6 a 8 m, lo cual permite su distribución en una gran banda litoral (800 l/s).

Otra obra de ingeniería, aunque sería necesario

estudiar si justificada o no, ha sido la captación de las surgencias submarinas de Port-Miou (Cassis, cerca de Marsella) con un largo período de investigación (Potié *et al.*, 1977), muchas horas de buceo para topografiar la red de conductos, métodos geofísicos, control de temperatura, velocidad, conductividad y participación de equipos pluridisciplinarios, para llegar finalmente a la captación que consiste en una presa subterránea en una de las salas sumergidas para impedir la entrada de agua de mar, limpiar el agua salada retenida, y extraer agua dulce mediante un sondeo excavado desde la superficie del terreno que bombea desde aguas arriba de la presa. En este caso, el esquema descrito fue complementado por un muro de protección en el punto de salida de la galería en el mar, de cota cercana a la del mar, cuya finalidad es evitar que el agua de mar penetre directamente en el gran conducto. Con esta nueva obra se consiguió reducir sensiblemente el contenido salino del agua bombeada (Potié, 1989).

Otra modalidad de explotación de surgencias submarinas es el puesto a punto a nivel experimental en el manantial del Galeso en el Mar Tirreno (Italia). El mecanismo consiste en colocar una campana en el punto de surgencia (Dauru *et al.*, 1990), previamente identificado por otros métodos, de manera a conseguir que el agua dulce salga directamente al exterior por el tubo situado en la extremidad superior de la campana, salvando así la carga de agua salada; en esas condiciones el agua alcanza una cota superior a la del mar, siendo así susceptible de captación.

### **Criterios de ubicación de sondeos en el karst**

En primer lugar es preciso tener una idea lo más precisa posible del funcionamiento y características del embalse (situación y cotas de las emergencias, profundidad del nivel piezométrico, rendimiento de captaciones cercanas, hidrogeoquímica y contaminación). Para la selección del punto preciso, puede ayudar la prospección geofísica eléctrica (caso de existencia de un recubrimiento) en su modalidad de SEV y calcatas que permiten la detección de áreas más fisuradas al producirse una disminución de los valores de la resistividad).

Puede ser necesario un estudio fotogeológico previo, con determinación de áreas más fracturadas, con comprobación sobre el terreno. Hay que tener en cuenta que normalmente interesa captar el agua a la menor profundidad posible, por lo que se seleccionarán áreas bajas. Los barrancos son los que cumplen mejor estas condiciones, que por otro lado suelen corresponder, en su gran mayoría, con zonas fractu-

radas. Siempre serán más favorables aquellos emplazamientos situados sobre fracturas de gran continuidad que intersecten grandes cuencas vertientes superficiales.

De acuerdo con el modelo conceptual de acuífero kárstico más extendido en el área mediterránea -bloques y conductos en tres dimensiones afectados por los procesos de karstificación que son jerarquizantes- los sondeos de investigación es conveniente que penetren unos 100 m en la franja saturada, para aumentar así la probabilidad de atravesar discontinuidades productivas.

### Consideraciones finales

Los acuíferos kársticos tienen un notable interés económico ya que pueden ocupar grandes extensiones. La infiltración en estos terrenos suele ser muy superior a la de los terrenos detríticos. Dado que en general dan relieves positivos, suelen contener aguas de muy buena calidad, aunque por sus propias características suelen ser más vulnerables a la contaminación que los de porosidad intergranular.

Las técnicas de exploración, específicas en muchos casos de estos terrenos, permiten conocer adecuadamente las características de este tipo de acuíferos, aunque predominan las técnicas basadas en el exclusivo análisis de los caudales de las surgencias, ya que las condiciones topográficas no suele permitir la realización de muchos otros puntos de observación. Existen muchos métodos geofísicos de prospección que dan muy buenos resultados en este tipo de terrenos, si bien son los métodos eléctricos los más usuales, aplicados tanto a localizar los terrenos bajo un recubrimiento de otra naturaleza, o a localizar los sectores más fracturados.

### Agradecimientos

Este artículo a sido elaborado a petición de A. Huerga. Se ha beneficiado de la financiación del PAI al Grupo RNM-189, así como de algunos de los aspectos objeto de estudio en el marco del proyecto HID99-0597-CO2 financiado por la CICYT.

### Referencias

Andreu, J. M. 1997. *Contribución de la sobreexplotación al conocimiento de los acuíferos kársticos de Crevillente, Cid y Cabeço d'Or (provincia de Alicante)*. Tesis Doct. Univ. Alicante.

- Antigüedad, I. 1994. Investigación hidrodinámica de los acuíferos kársticos: revisión de metodologías basadas en las respuestas naturales. In *"El karst y los acuíferos kársticos"*. Pulido Bosch, A., Fagundo, J., y Rodríguez, J. eds. pp: 99-118. Univ. Granada.
- Arandjelovic, D. 1984. Application of geophysical methods to hydrogeological problems in Dinaric Karst in Yugoslavia. In *"Hydrogeology of the Dinaric Karst"*, Mijatovic, B.F. ed. IAH, n.º 4: 143-159.
- Bakalowicz, M. 1979. *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification*. Thèse Doct. Univ. Paris VI. 269 p.
- Bakalowicz, M. et al. 1994. High discharge pumping in a vertical cave. Fundamental and applied results". In *"Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas"*. Crampon, N. y Bakalowicz, M. eds. pp: 93-110. E.C.D.G. Bruselas.
- Bakalowicz, M. 1996. impacts of pumping in karst aquifers: In *"Impacts of human activities on karstic hydrogeology"*. Hötzl, H. y Drew, D. eds. (p. IAH book, n.º 17; en prensa).
- Beauce, A., Legchenko, A. y Guillen, A. 2000. La resonancia magnética protónica: un nuevo método geofísico para los hidrogeólogos. In *Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas a la Hidrogeología*. Olmo, M. y López Geta, J.A. eds. ITGE-Diput. Granada. pp:197-202
- Bonacci, O. 1987. *Karst Hydrology. With special reference to the Dinaric Karst*. Springer-Verlag, 184 p. Berlín.
- Cable, J.E., Burnett, W.C., Chanton, J.P. y Weatherly, G. 1996a. Modeling groundwater flow into the ocean based on <sup>222</sup>Rn. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144, 591-604.
- Cable, J., Bugna, G. Burnett, W. y Chanton, J. 1996b. Application of <sup>222</sup>Rn and CH<sub>4</sub> for assessment of groundwater discharge to the coastal ocean. *Limnol. Oceanog.*, 41, 1347-1353.
- Carasone, F., Cenedese, A. y Viotti, P. 1996. Neural networks: a new approach in groundwater and karstic system análisis. *Contribuciones a la investigación y gestión del agua subterránea* pp: 131-142.
- Casas, A. 2000. Prospección geofísica aplicada a la Hidrogeología: metodologías y técnicas emergentes. In *Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas a la Hidrogeología*. Olmo, M. y López Geta, J.A. eds. ITGE-Diput. Granada. pp: 33-41.
- Custodio, E. 1986. Hidrogeoquímica del karst. *Jorn. Karst Euskadi*. 2: 131-179. San Sebastian.
- Daurú, M., Lollino, G. y Tadolini, T. 1990. Sistema per il monitoraggio automatico di parametri chimico-fisici delle acque all'opera di captazione della sorgente sottermarina galeso, Mar Piccolo di Taranto. *Geologia Applicata e Idrogeologia*. Vol. XXV; 265-277.
- Doerfliger, N. y Zwahlen, F. 1996. EPIK: a new method for the delineation of protection areas in karstic environment. In *"Karst water and human impacts"*, Johnson, I. y Gunay, G. Ed. Balkema. pp: 117-123.
- Eisenlohr, L. 1995. *Variabilité des réponses naturelles des aquifères karstiques*. Tesis Doct. Univ. Neuchâtel.
- Emblanch, C., Blavoux, B., Puig, J.M. y Mudry, J. 1998. Dissolved organic carbon of infiltration within the autogenic karst hydrosystem. *Geophysical Research Letters*, 25:1459-1462

- Emblanch, C., Puig, J.M., Zuppi, G.M., Mudry, J. y Blavoux, B. 1999. Comportement particulier lors des montées de crues dans les aquifères karstiques, mise en évidence d'une double fracturation et/ou de circulation profonde: Exemple de la Fontaine de Vaucluse. *Eclogae geol. Helv.*, 92: 251-257
- Eraso, A. y Domínguez, M.C. 2000. Métodos de predicción de las direcciones principales de drenaje subterráneo en macizos anisótropos "método Eraso". *Bol. SEDECK*, 1: 4-10.
- Fernández-Rubio, R. 1968. Equipos de televisión para estudio de sondeos, pozos y galerías. *III Jorn. Min. Met.*, 11: 741-747. Gijón.
- Fidelibus, M.D. and Tulipano, L. 1990. Major and minor ions as natural tracers in mixing phenomena in coastal carbonate aquifers of Apulia. *11th SWIM*, pp: 283-293. Gdansk.
- Gaspar, E. ed. 1987. *Modern Trends in Tracer Hydrology*. CRC Press, 2 vol. Boca Raton.
- Granda, A. 1986. La geofísica aplicada en hidrogeología. Algo más que el SEV. *Bol. Geol. Min. XCVII-I*: 65-76.
- Granda, A. et al., 1987. Los sondeos electromagnéticos en el dominio de tiempos (SED). Aspectos más significativos y primeras experiencias en España. *Bol. Geol. Min., XCVIII-III*: 392-403.
- Greene, E.A. y Rahn, P.H. 1995. Localized anisotropic transmissivity in a karst aquifer. *Ground Water*, 33(5): 806-816.
- Hipel, K.W. y McLeod, A.I. 1994. *Time series modelling of water resources and environmental systems*. Elsevier, 1013 p. Amsterdam.
- Höztel, H. y Werner, A. eds. 1992. *Tracer Hydrology*. Ed. Balkema, 464 p. Rotterdam.
- Kiraly, L. 1984. Régularisation de l'Areuse (Jura suisse) simulé par modèle mathématique. In *AIH serie azul*, n.º 1: 94-99.
- Kiraly, L. et al. 1995. Numerical simulation. In "*National Report from Switzerland*". Karst groundwater protection. Final Report EUR 16457 EN, pp: 279-304. Bruselas.
- Labat, D., Ababou, R. y Mangin, A. 1999a. Linear and nonlinear input/output models for karstic springflow and flood prediction at different time scales. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 13: 337-364.
- Labat, D., Ababou, R. y Mangin, A. 1999b. Analyse en ondes lentes en hydrologie karstique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 329: 873-877.
- Lepiller, M. y Mondain, P.H. 1988. Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. *Hydrogéologie*, 1: 33-52.
- López Chicano, M. 1992. *Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda y su entorno (Granada y Málaga)*. Tesis Doct. Univ. Granada. 429 p.
- Mace, R.E. y Hovorka, S.D. 2000. Estimating porosity in a karstic aquifer using core plugs, web tests, and outcrop measurements. In *Groundwater flow and contaminant transport in carbonate aquifers*, Sasowsky, I.D. y Wicks, C.M. Balkema, pp: 93-111. Rotterdam
- Maloszewski, P. 1994. *Mathematical modelling of tracer experiments in fissured aquifers*. Freib, Schriften Hydrol. 107 p. Freiburg.
- Mangin, A. 1975. *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Thèse Doct. Laboratoire Sout. du C.N.R.S. Moulis. (3 art. Ann. Spéléol. 1974-75).
- Mangin, A. 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses de corrélation et spectrale. *J. Hydrol.*, 67: 25-43.
- Marsily, G. de 1978. *De l'identification des systèmes hydrogéologiques*. Thèse Doct. Etat. Univ. P. et M. Curie-Paris VI, 215 p.
- Mijatovic, B.F. 1975. Exploitation rationnelle des eaux karstiques. In "*Hydrogéologie des terrains karstiques*", Avias, J. et Dubertret, L., eds. pp: 123-135.
- Mijatovic, B.F. ed. 1984. *Hydrogeology of the Dinaric karst*. IAH, serie azul, n.º 4, 255 p. Heise.
- Molina, L. 1998. *Hidroquímica e intrusión marina en el Campo de Dalías (Almería)*. Tesis Doct. Univ. Granada. 340 p.
- Moore, W. S. 1996. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by <sup>226</sup>Ra enrichments. *Nature* 380, 612-614.
- Motyka, J. 1998. A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks, illustrated by examples from Poland. *Hydrogeol. Journal*, 6: 469-482
- Muguerza, I. 2001. *Estudio hidrogeológico de la unidad hidrogeológica kárstica de Albistur (Guipúzcoa)*. Tesis Doct. Univ. País Vasco, 410 p. y planos.
- Müller, I. 1979. Premiers essais microsismiques appliqués à l'étude hydrogéologique du karst jurassien. *Bull. Centre d'Hydrogeol.*, 3: 41-53.
- Ogilvy, R.D., Meldrum, P.I. y Chambers, J.E. 1999. Imaging of industrial waste deposits and buried quarry geometry by 3-D resistivity tomography. *European Journal of Envir. Eng. Geoph.* 3: 103-113
- Olmo, M. y López Geta, J.A. eds. 2000. Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas a la Hidrogeología. ITGE-Diput. Granada. 375 pp.
- Padilla, A. 1990. *Los modelos matemáticos aplicados al estudio de acuíferos kársticos*. Tesis Doct. Univ. Granada. 267 p.
- Padilla, A., Pulido Bosch, A. y Mangin, A. 1994. Relative importance of Baseflow and Quickflow from Hydrographs of Karst Spring. *Ground Water*, 32: 267-277.
- Padilla, A., Pulido Bosch, A., Calvache, M.L. y Vallejos, A. 1996. The ARMA models applied to the flow of karstic springs. *Water Resources Bulletin*, 32 (5): 917-928.
- Pinault, J.L., Ladouche, B., Doerfliger, N. y Bakalowicz, M. 2001. Modélisation inverse des relations pluie-débits et des chimiogrammes. *7 Conf. On Limestone Hydrology and fissured media*. 4 pp. Besançon
- Pistre, S., López-Chicano, M., Pulido-Bosch, A. y Drogue, C. 1999. The role of Western Mediterranean tectonic evolution in the geometry of a karstic domain in the Betic Cordilleras (Sierra Gorda, Spain): importance of a tardy extensional regime. *Geodinamica Acta*, 12 (1): 11-24.
- Potié, L. 1989. La résurgence d'eau douce sous-marine de Port-Miou. *Chantiers de France*, 104.
- Potié, L. and Tardieu, B. 1977. Aménagement et captage sous-marins dans les formations calcaires. *Karst Hydrogeology* (Congreso de Alabama, 1975). pp: 39-56.

- Pulido Bosch, A. 1989. Simulación del acuífero de Sierra Grossa (Valencia). *Hidrogeol. y Rec. Hidrául.*, XIV: 301-313 (Libro Homenaje a Jorge Porras).
- Pulido Bosch, A. 1999. Karst water exploitation. In: *Karst Hydrogeology and Human Activities. Impacts, Consequences and Implications*. Eds: D. Drew y Heinz Hötzl. International Contributions to Hydrogeology, 20: 235-240. Balkema, Rotterdam.
- Pulido Bosch, A. y Castillo, E. 1984. Quelques considérations sur la structure des aquifères carbonatés du levant espagnol, d'après les données de captages d'eau. *Karstologia*, IV: 38-44.
- Pulido Bosch, A., Marsily, G. de, y Benavente, J. 1987. Análisis de la descarga de El Torcal de Antequera mediante deconvolución. *Hidrogeología*, 2: 17-28. (9)
- Pulido Bosch, A. et al. 1989. *Caracterización hidrogeoquímica del Campo de Dalías (Almería)*. Serv. Estudios IARA, 265 pp., Granada.
- Pulido Bosch, A. y Ben Sbih, Y. 1995. Centuries of artificial recharge on the southern edge of the Sierra Nevada (Granada, Spain). *Environ. Geol.*, 26: 57-63.
- Pulido Bosch, A., Morell, I. y Andreu, J.M. 1995. Hydrogeochemical effects of groundwater mining of the Sierra de Crevillente aquifer (Alicante, Spain). *Environ. Geol.* 26: 232-239.
- Pulido Bosch, A., Pulido Leboeuf, P., Vallejos, A., Calvache, M.L., Gisbert, J., Andreu, J.M., Sánchez Martos, F. y Molina, L. 1999. Sondeos de investigación en un acuífero kárstico costero (Castell de Ferro, Granada). *Geogaceta*, 25: 167-169.
- Pulido Leboeuf, P., Pulido Bosch, A. y Calvache, M.L. 2001. Intrusión marina y procesos hidrogeoquímicos asociados en un acuífero costero complejo (Castell de Ferro, Granada). *Hidrogeol. Y Rec. Hidrául.* XXIV: 741-751.
- Razack, M. 1984. *Application de méthodes numériques et statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie*. Tesis Doct. Univ. Montpellier, 257 p.
- Rouhiainen, P. 1993. A flowmeter for groundwater in fractured bedrock. *XXVI IAH Congress*, 2: 762-771. Oslo.
- Sánchez Martos, F. 1997. *Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería)*. Tesis Doct. Univ. Granada. 290 p.
- Shenevell, L. 1996. Analysis of well hydrographs in a karst aquifer: estimates of specific yields and continuous transmissivities. *J. Hydrol.*, 174: 331-355.
- Soulios, G. 1984. Infiltration efficace dans le karst hellénique. *J. Hydro.*, 75: 343-356
- Tulipano, L. 1988. Temperature logs interpretation for identification of preferential flow pathways in the coastal carbonate and karstic aquifer of the Salento Peninsula (Southern Italy). *XXI IAH Congress*, 2: 956-961. Guilin.
- Tulipano, L. and Fidelibus, M.D. 1995. National report from Italy. In "Karst groundwater protection" EUR 16547 EN:171-201.
- U.E. 1995. *Karst groundwater protection*. Final Report. Europ. Comm. EUR 16547 EN, 446 p. Bruselas.