

LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS. CASOS DEL PAIS VASCO

The karstic aquifers. Cases of the Basque Country

Iñaki Antigüedad, Tomás Morales, Jesus Angel Uriarte ()*

RESUMEN

Los acuíferos kársticos son un recurso estratégico en muchas regiones del mundo. Son acuíferos asociados, sobre todo, a formaciones carbonatadas afectadas por fisuración y disolución (karstificación). La karstificación origina toda una jerarquización del drenaje subterráneo desde la superficie hasta la surgencia; es precisamente esta heterogeneidad organizada la que caracteriza el acuífero kárstico y lo diferencia del resto de acuíferos. En el acuífero kárstico la función capacitiva reside en la propia matriz rocosa, más o menos permeable, mientras que la red de conductos es la que asegura la función transmisiva del flujo. Esta especial configuración del drenaje en el karst condiciona de manera importante las formas de su investigación. Entre las técnicas más habituales están el análisis de hidrogramas, los ensayos con trazadores, los quimiogramas en surgencias, las diagráfias en sondeos. En este artículo se muestra su aplicación concreta en acuíferos kársticos del País Vasco. Finalmente, se comenta la necesidad de puesta en valor del medio kárstico, más allá de su interés como medio acuífero.

ABSTRACT

Karstic aquifers are of a great strategic importance in many regions along the world. These aquifers belong to carbonate formations which have been affected by fissuration and dissolution (karstification) processes. The karstification originates the internal drainage to be hierarchyzed, from the land surface until the flows reach the spring; in fact, this organized heterogeneity is the most important characteristic of the karstic aquifers, marking the difference with the other types of aquifers. In the karstic aquifer the capacity function is located in the rock matrix, which can be more or less permeable, whereas the transmissivity function is assured by the drain network (the conduits). The specific organization of the flows in this type of aquifer determines the methodologies to be used in its exploration. Among these methods are: the analysis of the hydrograph, the tracing tests, the spring chemiographs or the well logs (diagraphies). In this paper some specific applications of these techniques are presented as they have been applied in karstic aquifers of the Basque Country. Finally we want to attract attention on the necessity to value the karstic regions, beyond their interest as water resources reserves.

Palabras clave: *acuíferos kársticos, investigación, País Vasco*

Keywords: *karstic aquifers, investigation, Basque Country*

INTRODUCCIÓN

Para los hidrogeólogos es natural distinguir los recursos de agua, es decir, la cantidad que fluye a lo largo del año hidrológico a través del sistema acuífero, y las reservas, que son el volumen de agua almacenada en ese sistema. Con frecuencia, los recursos que atraen la atención de los gestores suelen ser las aguas superficiales; sin embargo, éstas no suelen ofrecer reservas, de manera que se hace necesaria la construcción de embalses que regulen los recursos y ofrezcan reservas. Los acuíferos, por su parte, a pesar de ofrecer reservas que pueden ser considerables, suelen ser marginados en muchas ocasiones.

Entre los diferentes tipos de acuíferos, los llamados kársticos adquieren un interés notable, ya que en amplias regiones del planeta las rocas carbo-

natadas ocupan extensas superficies. Así, la figura 1 presenta, a grandes rasgos, los afloramientos carbonatados de Europa, que cubren un 35 % del territorio; buena parte de estas formaciones carbonatadas presentan un cierto grado de karstificación, por efecto de la disolución, lo que les confiere el carácter de acuífero kárstico. Es más, en algunos países europeos el peso de las aguas kársticas en el total del agua suministrada para los diferentes usos es importante: Austria, Eslovenia (50 %); Bélgica, Croacia, Eslovaquia, Francia (25-35 %); Reino Unido, Suiza (15-20 %); Estado Español (12 %), según datos recogidos en el informe COST 65 (1995).

Los acuíferos kársticos muestran singularidades que les diferencian del resto de acuíferos en su exploración, explotación y gestión. Presentan, por una parte, características comunes a las redes hidrográficas (drenaje organizado en conductos) y, por otra,

(*) Grupo de Hidrogeología. Geodinamika Saila. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea. 48940 Leioa (Bizkaia). País Vasco. inaki.antiguedad@ehu.es, tomas.morales@ehu.es, jesusangel.uriarte@ehu.es



Fig. 1: Afloramientos carbonatados en Europa (COST 65, 1995).

características propias de los acuíferos porosos (matriz rocosa que puede tener una cierta porosidad primaria, o secundaria por fracturación o incipiente karstificación). Es decir, presentan a la vez una *función transmisiva* (capacidad para el paso del agua) en los conductos, que gobierna el flujo de los *recursos*, y una *función capacitiva* (capacidad para contener agua) en los bloques, que gobierna el almacenamiento de las *reservas*.

Lo que caracteriza al acuífero kárstico es su *heterogeneidad organizada*, es decir, los huecos que la disolución de la roca va originando, y el propio flujo que condiciona la disolución, se van jerarquizando desde arriba, la superficie del terreno, donde se produce la recarga, hacia abajo, la surgencia (manantial), donde se produce la descarga, dando una estructura de drenaje 3D. Esta heterogeneidad explica las dificultades que habitualmente aparecen en la exploración de estos acuíferos: pozos muy próximos entre sí pueden presentar rendimientos totalmente diferentes, según la posición que cada pozo tenga respecto a la estructura interna de drenaje. Cualquier método de exploración que no tenga en cuenta esta heterogeneidad está condenado al fracaso en el medio kárstico, o, al menos, dejado en manos de la casualidad.

Lo ahora dicho vale igual para la protección de la calidad de las aguas del medio kárstico, ya que la velocidad de propagación de un contaminante varía mucho de un punto a otro: uno introducido directamente en la red de drenaje se transmitirá rápidamente y sin apenas modificación, mientras que un

contaminante introducido de forma difusa en zonas alejadas de la red jerarquizada de drenaje puede residir en el medio un tiempo prolongado con diferentes consecuencias, según los casos, para la calidad de las aguas subterráneas.

EL MEDIO KÁRSTICO: SU ESPECIFICIDAD

Se conocen como terrenos kársticos (karst, en general) aquellas regiones constituidas por rocas compactas y solubles, carbonatadas fundamentalmente, en las que como consecuencia de los procesos de disolución (karstificación) aparecen formas superficiales y subterráneas características que las diferencian de otro tipo de regiones. El origen y evolución espacio-temporal de estas formas depende de factores geológicos, tectónicos, hidráulicos, físico-químicos y biológicos. El resultado de la actuación de estos factores, cambiantes en el tiempo, es una amplia variedad de tipos de terrenos kársticos.

Las regiones kársticas tienen unas características específicas (Fig. 2), tanto en lo relativo a la organización de los flujos hídricos superficiales y subterráneos como a la relación entre ambos, y que diferencian claramente esas regiones de cualquier otra, y los acuíferos kársticos de cualquier otro tipo de acuífero.

Características hidrológicas:

– Ausencia general de flujo superficial permanente. La red de drenaje superficial suele ser *discontinua* en el espacio, condicionada por la presen-

cia de surgencias y sumideros, y en el tiempo, mostrando un carácter intermitente en el aporte de agua. Usualmente los caudales presentan grandes fluctuaciones.

- Hay una estrecha interrelación entre las aguas superficiales y las subterráneas. Esta relación puede ser cambiante en el espacio y en el tiempo.

Características hidrogeológicas

La investigación en el karst implica tener un esquema conceptual previo de lo que es el sistema acuífero kárstico. El karst es un medio con una gran heterogeneidad espacial, y temporal, pero una heterogeneidad organizada. Si bien no es posible extrapolar a un acuífero kárstico desconocido el funcionamiento de otro conocido, aunque esté próximo y sea aparentemente idéntico, sí que existe un esquema conceptual general del karst, que presenta aspectos como:

- Diferentes modalidades de infiltración, lenta y rápida, con distinta influencia en la respuesta energética (hidrograma, cantidad de agua) y química (calidad) de las surgencias. La porosidad eficaz de la zona de infiltración está limitada, en general, a 1% ó 2%.
- Eventual existencia de un acuífero superficial, epikarst (Fig. 2), con un desigual filtraje temporal de la infiltración, y con una fuerte porosidad eficaz (entre 5% y 15%).

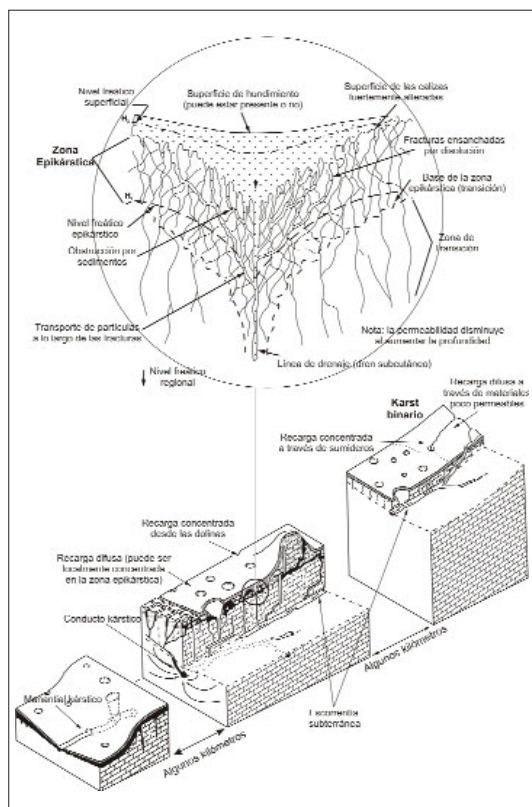


Fig. 2: Modelo conceptual del acuífero kárstico (varios autores, tomado de Fernández de Valderrama, 2004).

- Presencia de bloques de baja permeabilidad (sistemas anexos), con función capacitiva, y presencia de conductos de muy alta permeabilidad (red de drenaje kárstico), con función conductora; estos últimos actúan a modo de colectores del drenaje de los bloques, que pueden ser independientes entre sí. La relación hidráulica bloques - conductos puede ser de doble sentido (inversión de gradiente). La porosidad eficaz del conjunto de la zona saturada puede alcanzar hasta el 20 %, en los casos más favorables, mientras que la red kárstica (los conductos) no llega a representar más que el 0.5 %.

- Frecuentemente el acuífero kárstico está alimentado por aportes superficiales procedentes de terrenos no kársticos que terminan infiltrándose de forma concentrada (sumideros) en las rocas carbonatadas. En estos casos hablamos de karst binario (Fig. 2).

- No necesaria relación entre karstificación superficial y profunda. El desarrollo de la disolución dependerá de factores hidráulicos y físico-químicos.

- La disolución (karstificación) origina una red organizada de drenaje hacia la cual convergen los flujos subterráneos. Esta red finaliza en surgencias que, normalmente, presentan notables caudales. Esta jerarquización del drenaje es el motivo por el cual en los terrenos kársticos hay pocas, pero importantes, zonas de descarga (surgencias).

- La variabilidad de caudales en las surgencias es consecuencia de la diferente importancia relativa que en el funcionamiento hidrogeológico del acuífero kárstico tienen la red de conductos y los bloques capacitivos.

- Los acuíferos kársticos son, por lo general, muy vulnerables a la contaminación. Esta va a depender de la organización del flujo y de las relaciones entre los bloques y los conductos.

TIPOLOGÍA DE ACUÍFEROS KÁRSTICOS

Al ser la karstificación un proceso sometido a cambios en función de los factores (climáticos, morfológicos, geológicos) que lo limitan, el resultado es la existencia de una gran variedad de acuíferos "kársticos", comprendidos entre los de flujo difuso (el flujo se produce de una manera más o menos homogénea a través del medio) y los kársticos "sensu stricto" (el flujo se organiza espacialmente a través de la red de conductos). Los de flujo difuso tienen un comportamiento próximo al de los medios porosos; en estos casos no hablamos de karst, desde un punto de vista hidrogeológico.

En consecuencia, es evidente la ambigüedad que supone hablar de acuífero "kárstico" en general, y la necesidad de la concreción. El karst, en su sentido hidrogeológico más estricto, corresponde al acuífero en el cual el flujo se realiza fundamentalmente a través de la red de conductos; aquí, debido a la gran velocidad que puede tener el flujo (régimen turbulento), la ley de Darcy, de aplicación habitual en los otros acuíferos, puede no ser aplicable.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN DEL MEDIO KÁRSTICO: CASOS DEL PAÍS VASCO

En el informe final de la Acción Europea COST 65 (1995) se recogen los métodos para esta investigación, informando unos (geología, geomorfología, geofísica) sobre el medio kárstico *per se*, y otros (hidrodinámica, balance hídrico, hidroquímica, ensayos con trazadores, simulación matemática) sobre la organización de los flujos y sobre los procesos de transporte de solutos. En lo que sigue se presenta la aplicación práctica de algunos de estos últimos métodos en acuíferos del País Vasco, con diferente grado de karstificación, en los que nuestro Grupo ha venido trabajando en los últimos años.

Los acuíferos carbonatados en el País Vasco

Estos acuíferos tienen una importancia estratégica en el País Vasco, por su regular distribución territorial y por el interés de sus recursos hídricos, en cantidad y calidad. En los territorios de Bizkaia, Gipuzkoa y Araba-Alava (Fig. 3) los recursos hídricos anuales medios asociados a las formaciones carbonatadas (jurásicas, cretácicas y terciarias) han sido evaluados en 710 hm³ (EVE, 1996), valor que representa el 85 % del total de los recursos hídricos subterráneos. Una buena parte de esos acuíferos presenta un notable desarrollo de la karstificación, por lo que los podemos considerar como acuíferos kársticos.

Análisis de hidrogramas

El hidrograma de manantiales kársticos ha sido ampliamente utilizado, ya que permite estimar la importancia relativa que en el comportamiento del acuífero tienen los conductos transmisivos y los bloques capacitivos. Lo fundamental para la correcta investigación del hidrograma reside en establecer la diferencia entre tránsito de agua y transferencia de energía. Dos hidrogramas parecidos relativos, por ejemplo, a un episodio de crecida, pueden tener explicaciones muy distintas según se trate de un tránsito del propio agua que genera la crecida, o de una transferencia de energía en la que el agua expulsada llevaba un cierto tiempo de residencia en el acuífero, o bien de una situación intermedia, con mezcla de aguas jóvenes y aguas mas "viejas".

Es cierto que el hidrograma permite cuantificar volúmenes de agua drenados en diferentes situaciones, pero poco dice sobre la procedencia de esos volúmenes de agua. Para ello, se hace imprescindible la caracterización físico-química y/o isotópica de las aguas. En el apartado de los quimiogramas hay un ejemplo de lo dicho (Fig. 6).

Ensayos con trazadores

Los ensayos con trazadores, cuando son adecuadamente diseñados e interpretados, pueden proporcionar, a partir de observaciones directas, una visión única del modo en que se organiza el flujo y el

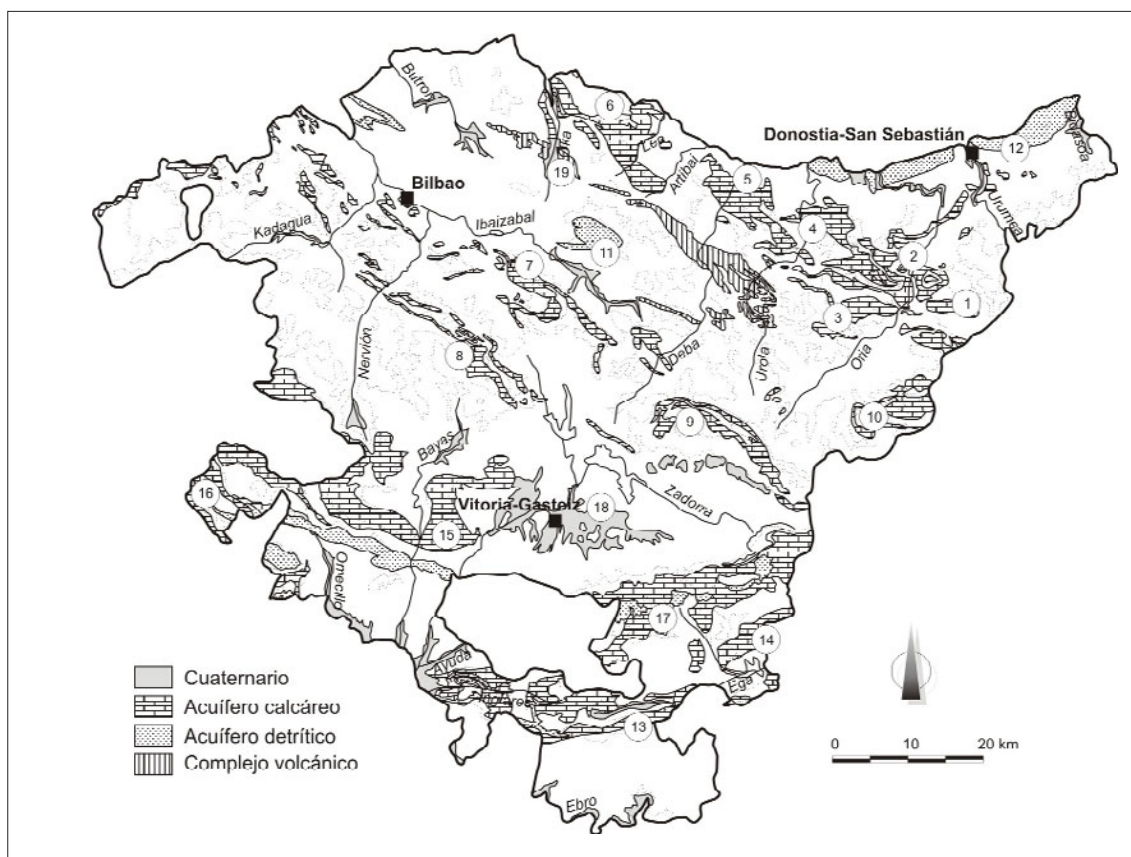


Fig. 3: Unidades Hidrogeológicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco (Fernández deValderrama, 2004, a partir de EVE, 1996).

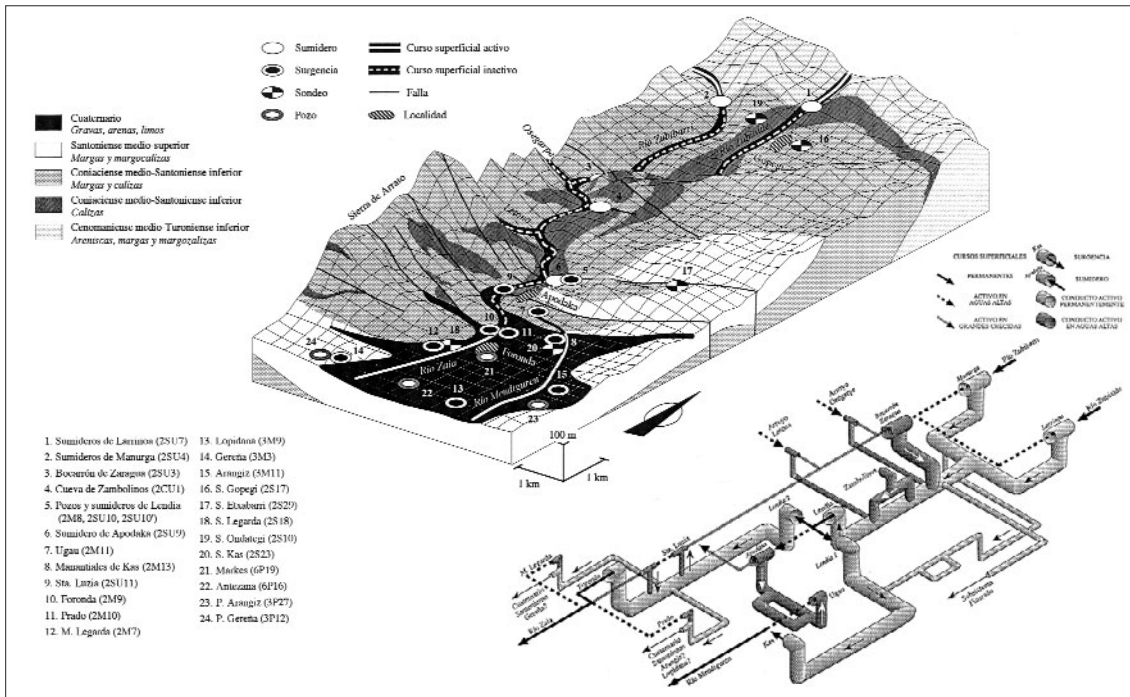


Fig. 4: Esquema geológico y red 3D de conductos activos en el Karst de Apodaka (Araba-Alava) a partir de la interpretación de varios multi-trazados (Arrate, 1994).

transporte en el medio kárstico, mostrando la complejidad espacial y temporal del karst. En esencia, un trazado consiste en la introducción planificada de un elemento (normalmente químico, no, o poco, presente de forma natural en el acuífero; en nuestro caso **CILi**, **IK** y **CISr** - en negrita el elemento realmente trazador -, y fluoresceína, ésta como sustancia colorante), en puntos del medio (sumideros activos, pozos). Se trata de hacer un seguimiento cuantitativo, sistemático, de la nube de paso del trazador por los diferentes puntos de descarga.

La figura 4 recoge la estructura espacial (3D) de la organización del flujo rápido, por conductos, en las calizas (Cretácico Superior) del Karst de Apodaka (Araba-Alava), terminación oriental de la Unidad Hidrogeológica Calizas de Subijana (número 15 en la figura 3). La estructura se ha deducido a partir de la interpretación (Arrate, 1994) de varios multi-trazados con diferentes trazadores y puntos de inyección, realizados en diferentes situaciones hidrológicas (aguas altas y bajas), y es bien representativa de la complejidad del esquema de flujos en un medio kárstico "sensu stricto". Resulta innegable la validez de este conocimiento para su consideración en las medidas de protección de los recursos (mapas de vulnerabilidad, perímetros de protección de captaciones).

La figura 5 muestra la repartición subterránea del flujo en un sector de la Unidad Hidrogeológica Santa Eufemia-Ereñozar (número 6 en la figura 3), en Bizkaia, a partir de la interpretación de varios trazados. En este sector, geológicamente complejo (calizas urgonianas, Cretácico Inferior), son numerosos los sumideros y las surgencias, buena parte

captadas. Los trazados han permitido establecer las conexiones sumidero-surgencia, además de las características del flujo y del transporte de solutos.

Quimiogramas

El agua es un *vector de información*, y la hidroquímica una herramienta esencial, y accesible, para la comprensión de la dinámica del medio acuífero,



Fig. 5: Conexiones sumidero-surgencia en la Unidad Santa Eufemia-Ereñozar (Bizkaia) a partir de la interpretación de ensayos con trazadores (Fernández de Valderrama, 2004).

más allá de la “simple” caracterización química de las aguas. En la investigación hidrogeológica el interés se centra en el seguimiento temporal, a paso adecuado, del quimismo de las aguas en los puntos de control. Es lo que llamamos el *quimiograma* (chemiograph).

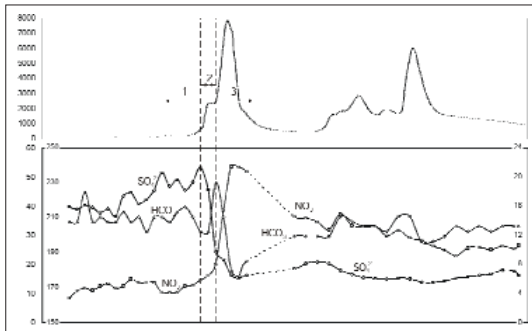


Fig. 6: Hidrograma (arriba) y quimiograma (abajo) en la surgencia de Salubita, en Gipuzkoa (Muguerza, 2001).

El control hidroquímico en una surgencia kárstica sirve para identificar la presencia en ella de aguas de diferente procedencia, aunque todas sean, habitualmente, de facies bicarbonatada cálcica. Este seguimiento temporal es referencia obligada para la adecuada interpretación del hidrograma (Fig. 6), permitiendo diferenciar tránsito (materia) de transferencia de aguas (energía).

Un ejemplo de quimiograma en la surgencia de Salubita (Unidad Hidrogeológica Albiztur, Gipuzkoa; número 3 en la figura 3) se muestra en la figura 6, con el hidrograma de la surgencia como referencia (650 l/s caudal medio anual). Es importante observar el diferente comportamiento de los elementos considerados. El nitrato procede de un sumidero en una depresión kárstica, es, por tanto, un marcador de origen *externo* de las aguas. El sulfato procede de un arroyo influente que drena calizas jurásicas, y el bicarbonato es propio de las calizas, tanto jurásicas como cretácicas (en este contacto se sitúa Salubita); estos elementos son marcadores *internos* de las aguas. La diferente respuesta temporal en la surgencia de los distintos marcadores permite clarificar la organización espacial de los flujos en el acuífero.

Diagrafías en pozos

Lo dicho para los manantiales es aplicable en los sondeos. Se trata de realizar registros verticales (diagrafías) de parámetros físico-químicos. Los más habituales son los perfiles de conductividad eléctrica (indicadora de la mineralización) y temperatura del agua. La figura 7 recoge cuatro diagrafías realizadas en un periodo de quince días, inmediatamente posterior a un episodio de precipitaciones importantes, en un pozo de 250 m de profundidad en la Unidad Hidrogeológica alavesa Calizas de Subijana (número 15 en la figura 3).

El pozo atravesó 125 m de margas (tubo ciego) antes de penetrar en las calizas acuíferas (sin entubación), tratándose de un acuífero confinado. Las dia-

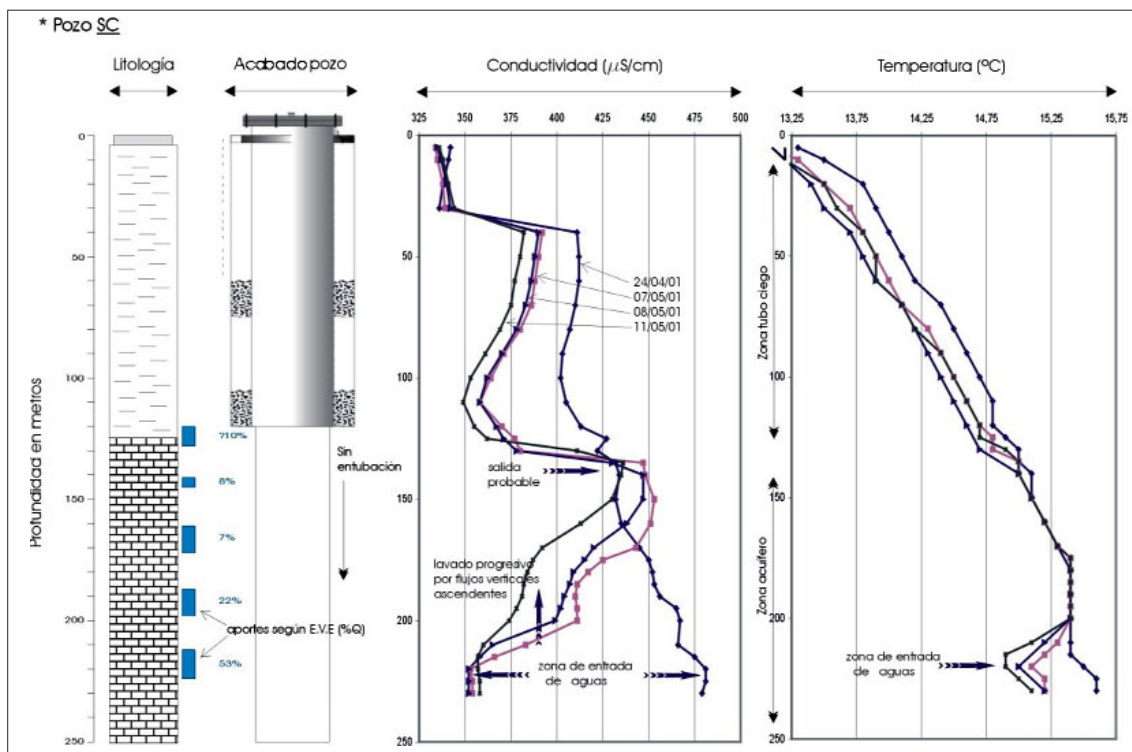


Fig. 7: Registros verticales en un sondeo de las Calizas de Subijana, en Araba-Alava (Fernández de Ortega, 2007).

grafías muestran la zona de entrada de las aguas al pozo, en la parte baja (más frías y menos mineralizadas), así como la zona probable de salida, evidenciándose un flujo de agua ascendente a través del pozo. Las zonas de entrada y salida deducidas coinciden con las zonas de aporte observadas durante la perforación del sondeo, también señaladas. La mayor parte de esta Unidad (calizas del Cretácico Superior) se considera acuífero de tipo fisurado, ya que la karstificación sólo está muy desarrollada en determinados sectores (Karst de Apodaka, figura 4).

VULNERABILIDAD DEL MEDIO KÁRSTICO A LA CONTAMINACIÓN

El medio kárstico es altamente vulnerable a la contaminación debido a su particular estructura del drenaje. El riesgo se hace real cuando sobre la superficie del terreno se llevan a cabo actividades potencialmente contaminantes, máxime cuando éstas, como es el caso de la agricultura, originan contaminación de tipo difusa. El riesgo es también real al comprobar que, con frecuencia, las depresiones kársticas, como dolinas, o los huecos dejados por la actividad extractiva de las canteras han venido siendo utilizados como lugar de depósito incontrolado de diferentes tipos de residuos.

Un acuífero kárstico presenta, en general:

– zonas de drenaje (*red de conductos*), que transmiten rápidamente el contaminante, sin apenas modificación.

– zonas de almacenamiento (*bloques capacitivos*), más o menos aisladas de las zonas de drenaje, que mantienen el contaminante durante un tiempo, más o menos largo, junto con el agua allí almacenada, lo que origina dilución.

En consecuencia, el devenir de una contaminación será bien diferente según el lugar y modo por donde el contaminante entre al acuífero kárstico. Si es en el eje del drenaje el contaminante se va a transmitir directa y masivamente hacia la surgencia, sufriendo una cierta dilución, pero sin depuración; el agua de la surgencia recupera rápidamente su calidad química inicial una vez que cesa la contaminación, si ésta ha sido puntual en el tiempo. De todas formas, en aguas altas puede ocurrir que el eje del drenaje, los conductos, tenga más carga hidráulica que los bloques capacitivos de manera que haya inversión de gradiente y el contaminante pueda pasar a los bloques, para ser de nuevo drenado al eje pero en una posterior situación de aguas bajas.

Si el contaminante se introduce en las zonas de almacenamiento, se va a transmitir mucho más lentamente; puede llegar a darse una cierta depuración, pero será sobre todo la dilución por mezcla con aguas limpias la que va a contribuir a reducir el límite de la contaminación en la surgencia. En estos casos, si los bloques capacitivos son independientes entre sí sólo alguno de ellos se verá afectado por la contaminación. Finalmente, el contaminante, diluido, será descargado, desfasado en el tiempo, bien a través de alguna surgencia conectada directamente

al bloque capacitivo, o bien por la surgencia principal a través del eje principal de drenaje.

Por tanto, para la protección de los recursos hídricos en el karst es necesario un estudio detallado, determinando la posición de las zonas más sensibles, vulnerables, a la contaminación (el eje del drenaje) y de las zonas mejor protegidas (los bloques capacitivos). Hay que señalar la gran importancia que tiene el suelo, si existe, para la efectiva protección de las aguas subterráneas, debido a los procesos bio-geoquímicos y de filtración que en él tienen lugar. Es esencial una buena ordenación del uso del suelo en las regiones kársticas como medida de protección de la calidad del agua.

El concepto de vulnerabilidad es muy utilizado en el contexto de la protección de los recursos hídricos subterráneos, pero, al mismo tiempo, es poco claro en cuanto a su significado concreto, los parámetros que la caracterizan y las formas de su representación cartográfica. Se han hecho esfuerzos para clarificar estas cuestiones y proponer una metodología específica para la elaboración de mapas de vulnerabilidad en terrenos kársticos (COST 620, 2003); siempre bajo la premisa de que ese mapa debe de ser coherente con un modelo conceptual de acuífero kárstico que describa adecuadamente el funcionamiento real del sistema que se quiere proteger.

PUESTA EN VALOR DE LOS PAISAJES KÁRSTICOS

Las características del medio kárstico condicionan la existencia de ecosistemas peculiares con especies de fauna y flora adaptadas de forma específica a las condiciones de las cavidades subterráneas. El valor cultural, en relación con yacimientos arqueológicos, y recreativo de estos paisajes es otro elemento a considerar en su puesta en valor. Estas razones hacen que el paisaje kárstico sea un medio cuya preservación resulta prioritaria. Desafortunadamente, y a pesar de su aspecto imperturbable, se trata de un ambiente cuya fragilidad lo hace especialmente sensible a la perturbación.

De hecho, en las últimas décadas, el desarrollo tecnológico ha permitido que la actividad humana (deforestación, actividades agropecuarias intensivas, instalaciones industriales, urbanizaciones y grandes infraestructuras) haya podido avanzar y, en su caso, amenazar un paisaje que hasta hace algunas decenas de años presentaba una notable autoprotección por las propias características de sus formas de relieve.

Mención aparte requiere el incremento de la actividad minera en este entorno, sobre todo las canteras para la producción de áridos. Esta actividad genera impactos directos, por la utilización de maquinaria que, además de generar ruido y polvo, hace desaparecer físicamente una parte del karst y puede producir la alteración de los flujos de agua, e impactos en cascada: la alteración de un sistema natural resulta en una cadena de eventos que pueden implicar notables consecuencias. Así, las voladuras

producen gran cantidad de polvo que se deposita en la vegetación adyacente, obstruyendo los estomas y, por tanto, la fijación de CO₂, lo que limita la fotosíntesis. La desaparición de la vegetación conlleva un aumento de la erosión del suelo con repercusión en la calidad de las aguas subterráneas. El descenso del nivel freático puede afectar al medio biótico y ocasionar colapsos del terreno.

En este contexto, en los últimos años se han hecho importantes esfuerzos en la evaluación y protección de estos paisajes, con el desarrollo de herramientas metodológicas y reguladoras. Se trabaja en la identificación de las cada vez mayores alteraciones del medio kárstico. El trabajo más completo en la alteración del karst procede de "The Internacional Union for the Conservation of Nature and Natural Resources. Guidelines for Cave and Karst Protection" (Watson et al., 1998). Ejemplos más recientes son una serie de evaluaciones regionales de ambientes kársticos en todo el mundo: Van Beynen y Townsend (2005). En Europa un importante esfuerzo se desarrolló a través de la Action COST 620 (2003).

En lo que se refiere a la regulación, se ha ido evolucionado hacia una visión más integral del karst. Así, los primeros pasos en la protección se centraban principalmente en sistemas de cuevas. En la actualidad se tiende a la consideración de los paisajes kársticos en su conjunto, dada la interdependencia de procesos. En todo caso, solo si la población comienza por reconocer que un paisaje kárstico es único, se podrá determinar los pasos a seguir para minimizar la alteración y tomar las medidas de protección necesarias. Estos ambientes y sus recursos adquieren, además, un valor añadido en el marco de los procesos relacionados con el cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores muestran su agradecimiento a los diferentes organismos (Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritza, Ministerio de Educación y Ciencia) que en los últimos años han posibilitado las investigaciones hidrogeológicas realizadas por nuestro Grupo en sistemas kársticos del País Vasco.

BIBLIOGRAFÍA

Arrate, I. (1994). *Estudio hidrogeológico del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (Araba, País Vasco)*. Tesis Doctoral. Dpto de Geodinámica. Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea. 251 p.

COST 65 (1995): *Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas*. COST Action 65. European Commission DG-XII. EUR 16526.

COST 620 (2003): *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. COST Action 620. European Commission DG-XII. Online: <http://capella.unine.ch/chyn/>.

EVE-Ente Vasco de la Energía (1996): *Mapa hidrogeológico del País Vasco*. 377 p.

Fernández de Ortega, I. (2007). *Hidrogeología de las Sierras de Badaia y Arkamo (U.H. Calizas de Subijana, País Vasco)*. Tesis Doctoral. Dpto de Geodinámica. Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea. 462 p.

Fernández de Valderrama, I. (2004). *Contribución al estudio hidrogeológico de la Unidad Kárstica de Santa Eufemia-Ereñozar (zona nororiental de Bizkaia)*. Aportación de los ensayos con trazadores al conocimiento del medio kárstico. Tesis Doctoral. Dpto de Geodinámica. Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea. 358 p.

Muguerza, I. (2001). *Estudio hidrogeológico de la Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur (Gipuzkoa)*. Establecimiento de una metodología para la evaluación y la cartografía de la vulnerabilidad intrínseca en acuíferos kársticos. Tesis Doctoral. Dpto de Geodinámica. Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea. 406 p.

Urich, P.B. (2002). Land Use in Karst Terrain: review of Impacts of Primary Activities on Temperate Karst Ecosystems. *Science for Conservation* 198. New Zealand Department of Conservation. 60 p.

Van Beynen, P., Townsend K. (2005). A disturbance index for karst Environments. *Environmental Management* 36: 101-116.

Watson, J., Hamilton-Smith, E., Gillieson, D., Kiernan, K. (1998). *Guidelines for Cave and karst protection*. IUCN World Commission on Protected Areas. 53 p. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 6 de noviembre de 2007 y aceptado definitivamente para su publicación el 6 de junio de 2008.