

APORTE METODOLOGICO DE TRAZADOS EN SISTEMAS KARSTICOS DEL PAIS VASCO

Iñaki Arrate,
Iñaki Antigüedad,
Hilario Llanos,
Maria Felisa Laresgoiti,
Rosa Alonso,
Blanca Gallo.

Lan honetan Euskal Herriko sistema karstikoei dagozkien hainbat trazatutan erabilitako metodologia deskribatzen da. Trazatzaileek emaniko informazioak, saioetan bilduriko datu hidrodinamiko eta hidrokimikoak, bai eta aurretik aztertutako alorrei buruzko informazio hidrogeologikoak batera interpretatzeak ikertu ditugun akuiferoen funtzionamenduaren ezagupen zehatza eman digu.

En el presente estudio se describe la metodología empleada en diversos trazados en sistemas kársticos del País Vasco. La interpretación conjunta de las informaciones proporcionadas por los trazadores, de datos hidrodinámicos e hidroquímicos adicionales recogidos durante los ensayos y de la previa información hidrogeológica de las áreas de estudio, ha permitido un detallado conocimiento del funcionamiento de los acuíferos estudiados.

Dans le présent article nous décrivons la méthodologie utilisée pour réaliser plusieurs levés dans des systèmes karstiques du Pays Basque. Interpréter les renseignements fournis par les appareils de levé, conjointement avec les informations hydrodynamiques et hydrochimiques supplémentaires recueillies lors des essais et avec les renseignements hydrogéologiques préalables concernant les zones à étudier nous a permis de connaître de façon précise le fonctionnement des aquifères étudiés.

INTRODUCCION

Los información proporcionada por los ensayos mediante trazadores no está únicamente relacionada con la posibilidad de evidenciar una conexión entre dos o más puntos (aspecto cualitativo). Los trazados pueden además informar sobre las modalidades de tránsito a través de las diferentes zonas recorridas en el acuífero (aspecto cuantitativo) y contribuir de una manera importante al conocimiento del funcionamiento del sistema.

De esta manera, la interpretación conjunta de los datos proporcionados por los trazadores, de datos adicionales recogidos durante los ensayos (precipitación, evolución de caudales/niveles, quimismo, etc.) y de diversa información geológica e hidrogeológica de las áreas de estudio pueden permitir un detallado conocimiento del funcionamiento de los sistemas kársticos.

En el presente estudio se describe la aplicación de esta metodología y los resultados obtenidos en el Karst de Apodaka (País Vasco).

MARCO GEOLOGICO. HIDROGEOLOGIA

El Karst de Apodaka se encuentra situado a escasos kilómetros al norte de la ciudad de Vitoria-Gasteiz (figura 1). Se desarrolla sobre una unidad de edad Coniaciense medio-Santonense medio, constituida por calizas arcillosas y margas. El conjunto posee una potencia aproximada de 700 m y constituye una unidad acuífera permeable por fisuración y karstificación, altamente heterogénea y de complicada geometría, que se puede considerar en general de funcionamiento libre. A muro la unidad queda limitada por formaciones margosas impermeables, mientras que el techo lo constituyen bien margas santonenses (de permeabilidad baja-media), bien los materiales cuaternarios asociados a los ríos Zubialde-Zaia y Mendiguren (de permeabilidad media-alta).

La recarga más importante proviene de los caudales influentes proporcionados por el Zubialde y sus afluentes. Una segunda entrada se produce por la infiltración eficaz de la precipitación. Es necesario suponer además la existencia de recargas laterales procedentes de los materiales carbonatados de la Sierra de Arrato, que constituyen el límite occidental del Karst de Apodaka.

Las principales salidas visibles (surgencias de Lendia, Foronda y Kas) se sitúan en el sector meridional, en las proximidades del cuaternario. El caudal de base de este conjunto de manantiales es de aproximadamente 100 l/s, con un espectro muy irregular, sujeto siempre al régimen de precipitaciones, y con puntas que superan en ocasiones los 3000 l/s (Lendia). Así mismo, debe considerarse la probable descarga directa al acuífero cuaternario y a las margas suprayacentes del Santonense.

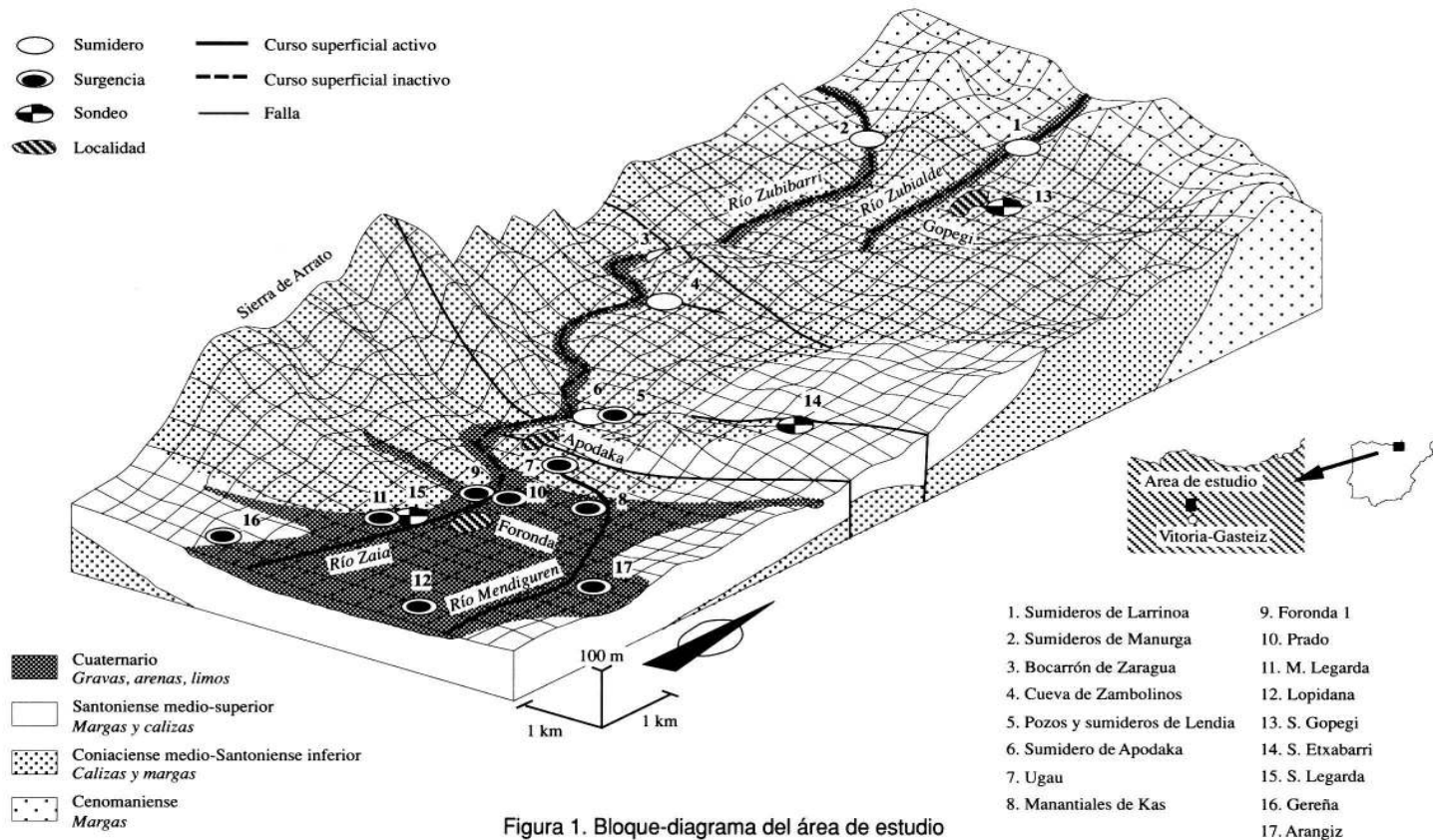


Figura 1. Bloque-diagrama del área de estudio

TRAZADO MARZO-ABRIL 1990

Los objetivos de este primer trazado fueron comprobar las conexiones hidráulicas entre el punto de inyección y las citadas surgencias, efectuar una primera caracterización de la respuesta del sistema kárstico, y comparar el comportamiento del LiCl (trazador empleado usualmente en ensayos de tipo cuantitativo) y la fluoresceína (relegada con frecuencia a la verificación cualitativa de conexiones hidráulicas entre pérdidas y surgencias).

Se inyectaron simultánea e instantáneamente en la cueva de Zambolinos el día 28 de Marzo (figura 1) 3.00 kg de fluoresceína y 23 kg de LiCl (3.77 kg de litio). La toma de muestras se efectuó en las surgencias de Lendia, Ugau, Foronda y en el río Mendiguren, que recoge el conjunto de las aguas procedentes de los manantiales de Kas y Ugau. En todos los puntos se efectuaron medidas "in situ" de conductividad eléctrica, y en los casos en que fue posible, también de caudales. En cuanto al régimen hídrico en el que se realizó el trazado, éste se inició en condiciones de acusado estiaje. Sin embargo, las intensas precipitaciones ocurridas durante su realización dieron lugar a sucesivas e importantes crecidas,

Las concentraciones de fluoresceína fueron determinadas mediante un método fluorimétrico puesto a punto en el Departamento de Química Analítica de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (Laresgoiti et al., en prensa). Las medidas se realizaron con λ_{exc} de 489.4 nm, λ_{em} de 513.4 nm, pH 8.5, medio iónico 10^{-2} M en KCl y T° de 25°C. Las muestras se preservaron de la luz solar. Las concentraciones de litio fueron determinadas mediante espectroscopía de emisión bajo las siguientes condiciones: λ_{em} de 670.8 nm, rendija de 0.7 nm, llama de aire-acetileno, relación fuel-oxidante 20/50 y C_{λ} de 2000 ppm.

Información proporcionada por los trazadores

Ambos trazadores aparecieron en las surgencias controladas. Así mismo, lo hicieron también en otros pequeños manantiales existentes en el sector (Prado, Lopidana) (figura 1). La geometría de las curvas de concentración obtenidas para el litio y la fluoresceína fue prácticamente idéntica (figura 2) observándose únicamente ligeras diferencias en las alturas relativas de los picos y, lógicamente, en la magnitud de la concentración de fondo. Se comprueba, por tanto, que la fluoresceína y el litio fueron vehiculizados conjuntamente en el interior del acuífero en las condiciones en las que se realizó el ensayo de trazado.

Las nubes de paso se presentan, salvo en el caso de Ugau (cuya geometría difiere notablemente de las del resto), estilizadas y casi simétricas, finalizando con una ligera cola. Ello indica que el tránsito del volumen trazado se desarrolla fundamentalmente en un medio con escasa dispersión longitudinal, y que corresponde a conductos kársticos bien desarrollados, probablemente en zona no saturada, permitiendo un tránsito relativamente rápido de las aguas.

La explicación a la especial geometría de las curvas de concentración de trazador en Ugau hay que buscarla probablemente en la existencia de una ramificación momentánea del volumen trazado en dos o más conductos caracterizados por diferentes velocidades de flujo, desde el sumidero de Apodaka hasta la surgencia (figura 3). De esta manera, en Ugau se obtendría la superposición de las diversas curvas de concentración correspondientes a cada uno de dichos conductos.

La distribución espacial de los puntos en los que se evidenció conexión hidráulica con el punto de inyección puso de manifiesto la existencia de un alto grado de dispersión lateral en el sistema acuífero. La circulación en él se encuentra condicionada de una manera fundamental por la geometría de las formaciones permeables, y en especial por la orientación y distribución de las directrices de fracturación y karstificación (N30E, N10E y N170E).

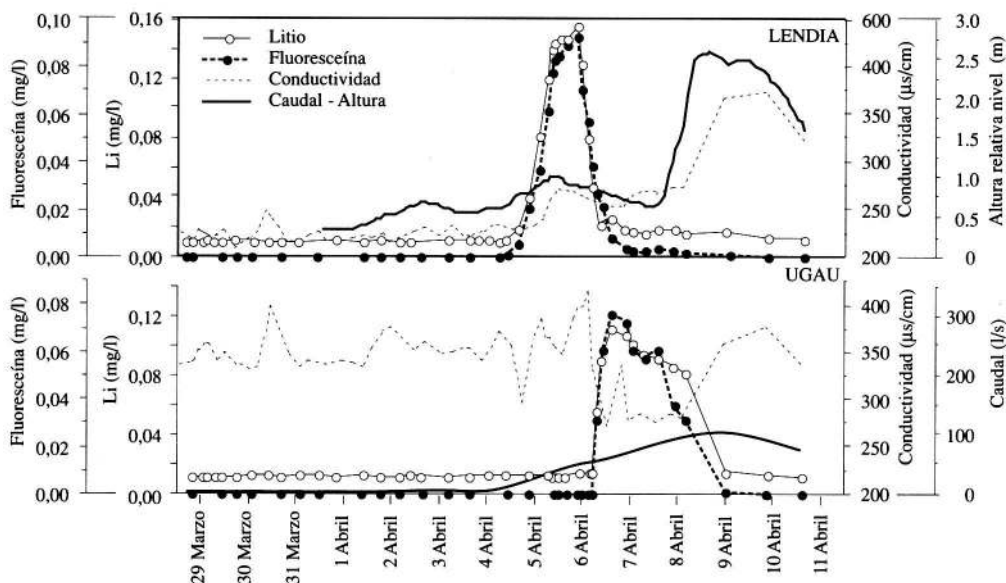


Figura 2. Curvas de concentración de litio y fluoresceína y evolución de caudales y conductividad en las surgencias de Lendia y Ugau. Trazado de 1990.

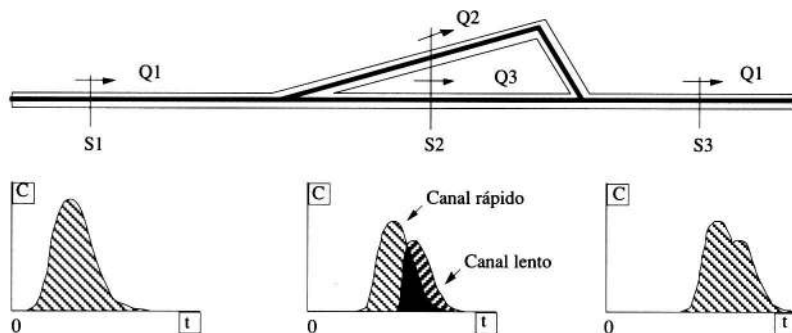


Figura 3. Modelo de flujo propuesto para el trayecto desde el Sumidero de Apodaka hasta la surgencia de Ugau (modificado de Gaspar, 1987)

Información proporcionada por caudales y conductividades

El análisis global de las curvas de concentración de trazador, caudales y conductividades en las surgencias controladas ha permitido una interpretación más completa del sistema de flujos que afectó a los trazadores. Así, gran parte de la dispersión lateral parece producirse a partir de la surgencia de Lendia, cuyo caudal desaparece de forma progresiva en diversos sumideros (denominados Lendia y Apodaka) existentes prácticamente en el mismo manantial (figura 1). De esta manera, el caudal que desaparece en los sumideros de Lendia alimentaría a las surgencias de Foronda, Kas y Prado, y el que desaparece en el sumidero de Apodaka (únicamente activo en épocas de crecida) recargaría al manantial de Ugau (Eraso et al., 1961), que en condiciones de estiaje drena aguas independientes del sistema de conductos Zambolinos-Lendia. Teniendo en cuenta que las concentraciones de trazador obtenidas en Lendia fueron muy superiores a las del resto de las surgencias, estas últimas tienen que drenar también aguas no trazadas no relacionadas con el sistema de circulación Zambolinos-Lendia (Arrate y Antigüedad, en prensa).

Las bajas velocidades de tránsito obtenidas en el trayecto Zambolinos-Lendia respecto a los trayectos Lendia-Foronda y Lendia-Kas (tabla 1) fueron atribuidas a una aceleración de los volúmenes trazados como consecuencia de unas intensas precipitaciones ocurridas a partir del día 2 de Abril.

La evolución de las conductividades mostró claramente que en los periodos de crecida se produce un incremento de la mineralización de las aguas drenadas por los manantiales (figura 2). Lamentablemente, este parámetro no fue controlado sistemáticamente en la Cueva de Zambolinos (punto de inyección) ni en el río Zubialde. Por esta razón, desconocemos si el incremento de la conductividad se produce en el propio acuífero, o por el contrario, se desarrolla con anterioridad, en la cuenca superficial del río Zubialde.

Si invocamos a un origen subterráneo de este fenómeno, éste podría deberse al empuje y movilización de aguas más mineralizadas almacenadas en el sistema acuífero. Sin embargo, la aparición de los trazadores coincidiendo con la crecida del 5 de Abril indica claramente que el tiempo máximo de residencia de la mayor parte del volumen evacuado en ese preciso momento no es superior a 8 días.

Esta evolución de las conductividades podría ser debida a un proceso de lavado de los conductos kársticos. Así, se produciría durante la crecida un aumento de la carga transportada en solución y suspensión, con el consiguiente incremento de conductividad. Al disminuir los caudales y la turbulencia del régimen, la mineralización disminuye progresivamente hasta alcanzar su rango de magnitud habitual. Sin embargo, la magnitud del incremento parece excesiva para deberse exclusivamente a este fenómeno.

Otra explicación al aumento de conductividad sería la presencia en las surgencias durante periodos de crecida de aportes no relacionados con los conductos responsables de la circulación Zambolinos-Lendia, y caracterizados por una mayor mineralización.

Restituciones

En cuanto a las tasas de restitución obtenidas (70 % y 44 % para el litio y fluoresceína respectivamente), éstas se pueden considerar relativamente bajas. Si bien la fluoresceína podría fijarse en niveles arcillosos o en los depósitos detríticos de grano fino presentes ocasionalmente en las cavidades, descomponerse por la presencia de materia orgánica, etc., el LiCl ha ofrecido excelentes restituciones (80-90 %) en numerosos sistemas acuíferos kársticos del País Vasco (Antigüedad et al., 1990).

La explicación a las bajas recuperaciones hay que buscarla probablemente en la existencia de salidas no controladas. Así, en el cálculo de las tasas no se ha considerado la surgencia Prado al no disponer de suficientes datos de concentración de trazador y caudal. Así mismo, no fue controlado el manantial de Legarda, que como se verá posteriormente, constituye una de las salidas del sistema.

Por otra parte, la presencia de fluoresceína en el manantial de Lopidana, situado a 6 km al sur del punto de inyección sugirió que una parte de los caudales relacionados con el sistema de conductos Zambolinos-Lendia-Foronda-Kas podría recargar directamente a los materiales que constituyen el techo del sistema kárstico, es decir, el acuífero cuaternario y las margas del Santoniense.

Con el objetivo de comprobar las hipótesis relativas al funcionamiento hidráulico del sistema kárstico, y solucionar las diversas interrogantes que tras el estudio de los resultados se plantearon, se efectuó un nuevo ensayo en Junio-Julio de 1991.

TRAZADO JUNIO-JULIO 1991

El día 19 de Junio se inyectó 1.1 kg de fluoresceína en los sumideros de Larrinoa. Así mismo, el día 25 de Junio se inyectó en los sumideros de Lendia 17 kg de LiCl.H₂O (2 kg de litio) coincidiendo con la llegada de la fluoresceína. Además de realizar toma de muestras en los puntos investigados en el ensayo previo (surgencias de Lendia, Ugau, Foronda, y río Mendigurren), se procedió también a controlar otros diversos puntos de agua existentes en las calizas del Coniaciense-Santoniense y en las margas del Santoniense: Cueva de Zambolinos, manantiales estacionales de Prado, M. Legarda y Lopidana, y sondeos de Gopegi, Etxabarri y S. Legarda (figura 1). En todos los puntos (incluyendo el río Zubialde en el punto de inyección) se efectuaron medidas sistemáticas "in situ" de conductividad eléctrica, y de caudales (en los casos en que fue posible). Los muestreos se prolongaron hasta el día 22 de Julio. El trazado se desarrolló en condiciones de estiaje y en ausencia de precipitaciones en el área de estudio.

Información proporcionada por los trazadores

La fluoresceína apareció en la cueva de Zambolinos, en las surgencias de Lendia, Foronda, Prado, Kas, M. Legarda, y en el sondeo S. Legarda. El litio, por su parte, lo hizo en las surgencias de Foronda, Prado, Kas, M. Legarda y en el sondeo S. Legarda. En la figura 4 se representa la evolución de la concentración de fluoresceína, conductividad y caudal/nivel en los puntos más representativos.

La curva de concentración de trazador en el primer punto de aparición de la fluoresceína (Zambolinos) presenta una geometría netamente diferente a las obtenidas en el trazado de 1990. Se trata de una curva bimodal que presenta una primer llegada ligeramente asimétrica, con muy escasa dispersión longitudinal, similar a las obtenidas en trazados de cursos superficiales (Jamier, 1976). A esta llegada le sucede una segunda, con una concentración modal muy inferior, y caracterizada por una dispersión longitudinal notablemente superior a la primera. Dado que el ensayo transcurrió en ausencia de precipitaciones, la bimodalidad de la curva ha sido atribuida a la existencia de un conducto que se ramifica momentáneamente, tal y como se indica en la figura 3.

Con la aparición de la fluoresceína en Lendia se constata una ralentización del flujo entre Zambolinos y esta surgencia. Así, la velocidad de tránsito para las partículas más rápidas entre Larrinoa y Zambolinos fue de 2.34 km/día (tabla 1). Sin embargo para el trayecto Zambolinos-Lendia, fue sólo de 0.42 km/día. Esta ralentización es debida probablemente a un embalsamiento natural de las aguas, que se produce inmediatamente después de la surgencia de Lendia, y unos metros antes de los sumideros de Lendia y Apodaka.

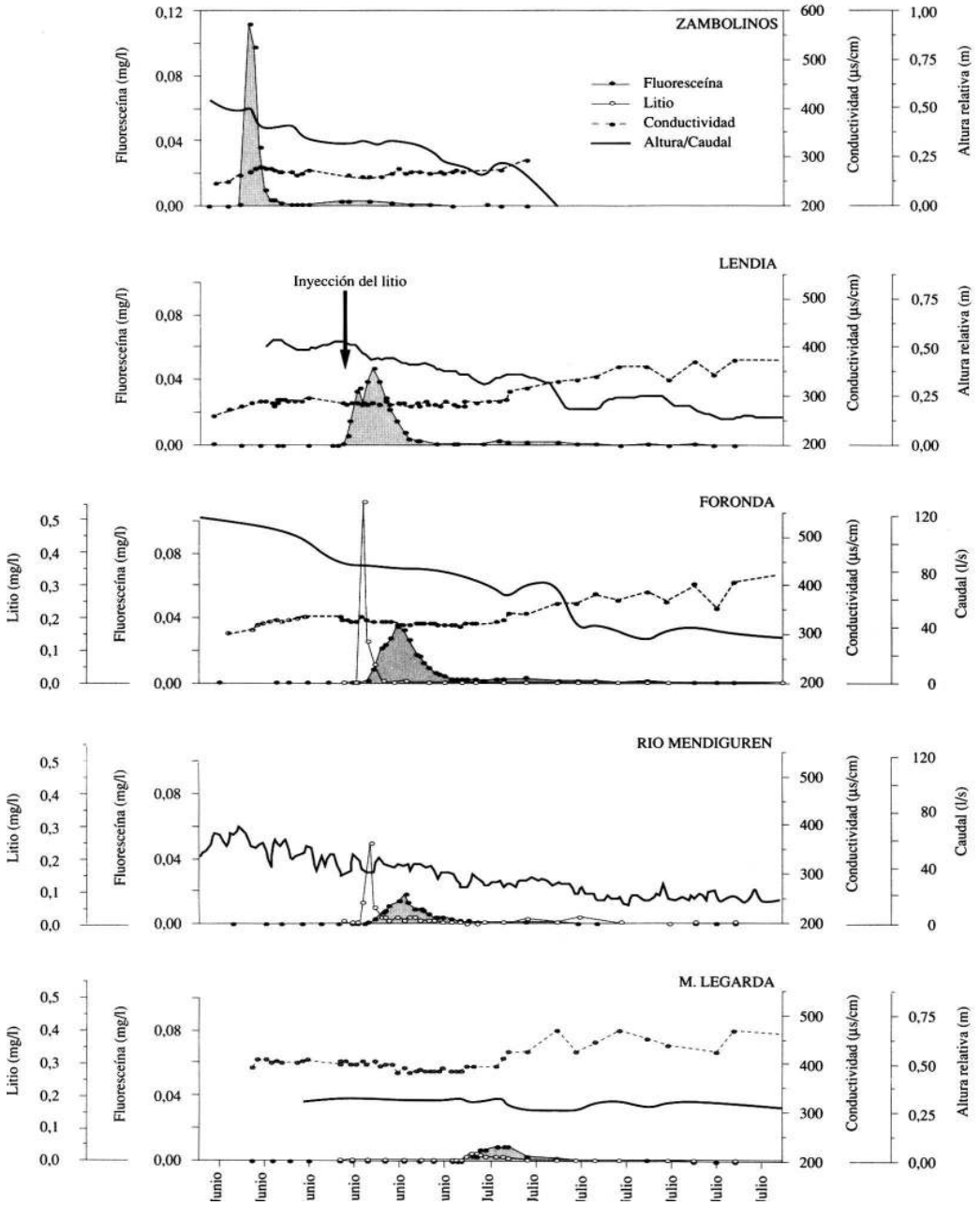


Figura 4. Curvas de concentración de fluoresceína y litio y evolución de caudales y conductividad en Zambolinos, Lendia, Foronda, Mendiguren y M. Legarda. Trazado de 1991.

En la geometría de la curva de concentración de trazador, similar a la de Zambolinos pero con una dispersión longitudinal sensiblemente superior (como consecuencia probable de dicho embalsamiento), se aprecia una nueva bimodalidad en la primera llegada. Ello indica una nueva bifurcación del flujo. Mientras el río Zubialde y Lendia continúan aportando caudal durante todo el estiaje, el día 4 de Julio se seca la cueva de Zambolinos. Es lógico suponer, por tanto, que no todo el caudal que fluye hacia Lendia procedente del río Zubialde pasa por Zambolinos, sino que existe un conducto "directo". De esta manera, queda explicada la nueva bimodalidad en la curva de concentración y la particular geometría de los limnigramas en Lendia, cuyas puntas de crecida constan por lo general de dos picos separados por un lapso de varias horas.

A partir de Lendia, tal y como indica la aparición en diversas surgencias del litio inyectado en los sumideros de Lendia, se produce una amplia dispersión lateral del flujo. Las velocidades de tránsito obtenidas desde este punto hasta los manantiales de Foronda, Kas, Prado, Ugau, M. Legarda y S. Legarda son 2.21, 1.86, 0.90, 0.87, 0.60 y 0.56 m/día respectivamente. Ello indica una aceleración del flujo, aunque de muy variable magnitud en cada caso.

Las geometrías de las curvas de concentración de fluoresceína son similares a las de Lendia, apreciándose en todas ellas, aunque de forma atenuada, las tres modas anteriormente descritas. No obstante, la dispersión longitudinal del trazador aumenta ligeramente, y de manera especial en aquellos tránsitos caracterizados por una menor velocidad de flujo (M. Legarda y S. Legarda).

Así mismo, las concentraciones obtenidas son progresivamente inferiores a medida que se incrementa la distancia entre las diversas surgencias y Lendia, hecho observable también para el litio y fluoresceína en el ensayo de 1990. Si consideramos que en los trayectos Lendia-Foronda y Lendia-Kas la retención de trazador es probablemente muy baja, estas inferiores concentraciones al menos en estos dos casos, serían debidas a la existencia de aportes no trazados en dichos recorridos. La imposibilidad de medir fiablemente los caudales infiltrados en los sumideros de Lendia impide la realización de un balance hídrico directo que cuantifique dichos aportes. No obstante, la gran similitud existente entre las curvas de concentración de fluoresceína en Lendia, Foronda y Kas, ha permitido la realización de un balance de masa tal y como se muestra en la figura 5 que indica para cada caso, y de una manera aproximada, la magnitud de dichos aportes no trazados (tabla 1).

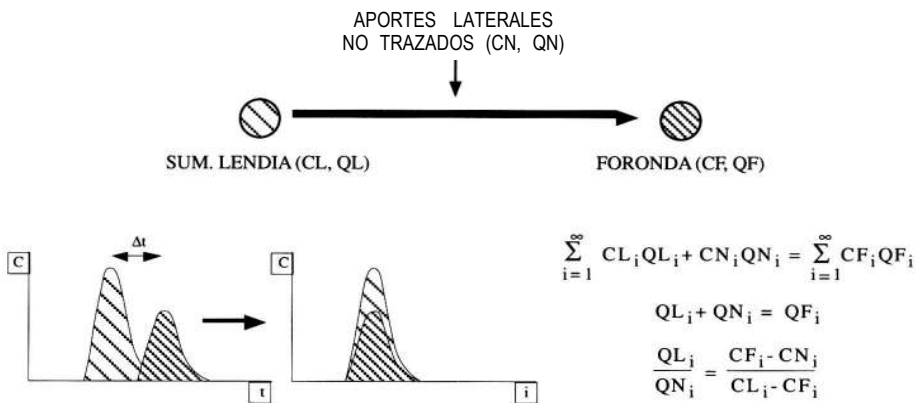


Figura 5. Descripción del balance de masa realizado en las surgencias de Foronda y Kas con el fin de cuantificar el volumen de los aportes no-trazados.

Las curvas de concentración de litio obtenidas en los casos de Foronda y Kas son de carácter unimodal, y muy similares a la primera curva parcial de fluoresceína en Zambolinos. Como se observa en el caso de la fluoresceína, también para el litio la dispersión longitudinal es superior en aquellos tránsitos caracterizados por menor velocidad de flujo.

Todo ello indica que la circulación se verifica a favor de conductos kársticos bien desarrollados en los trayectos Larrinoa-Zambolinos-Lendia, Lendia-Foronda, Lendia-Ugau y Lendia-Kas. La circulación entre Lendia-Prado y Lendia-Zona de Legarda, en cambio, se realizaría a favor de conductos poco desarrollados y/o fracturas.

Hay que señalar que ninguno de los trazadores apareció (en el periodo de control) en el manantial de Lopidana, tal y como sucedió en 1990. Este hecho parece indicar que la conexión entre los conductos responsables de la circulación Zubialde-Zambolinos-Lendia y la citada surgencia únicamente se verifica en periodos de crecida.

Información proporcionada por caudales y conductividades

La desfavorable situación de las estaciones de aforo de la Comisaría de Aguas del Ebro en los ríos Zubialde y Zubibarra a la entrada de la unidad kárstica (ambas se sitúan aguas abajo de las primeras pérdidas), y la dificultad de estimar fiablemente los caudales en Lendia y Zambolinos, limita notablemente la información proporcionada por los caudales, ya que ello imposibilita la realización de un balance hídrico global y/o parcial del sistema acuífero durante el trazado. No obstante, es interesante observar que los hidrogramas y limnigramas son prácticamente idénticos en los diversos puntos de control, pero desfasados en el tiempo. En el caso del río Mendiguren, que recoge las aguas procedentes de las surgencias de Kas, se aprecia el efecto de los bombeos efectuados con fines agrícolas.

En cuanto a la evolución de conductividades, es similar en todos los puntos de agua controlados, produciéndose un continuo aumento de este parámetro a lo largo del tiempo.

En los puntos de probada conexión hidráulica con los lugares de inyección se observa un incremento progresivo de la conductividad en el sentido de flujo, oscilando entre 200-250 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Zubialde) y 400-500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (M. Legarda). Esto es debido, por una parte, al lógico proceso de mineralización de las aguas y, por otra, a la incorporación a los conductos de aportes no trazados caracterizados por una mayor conductividad. En aquellos puntos de agua en los que no se evidenció la presencia de trazador, la mineralización de las aguas es notablemente superior, con valores que oscilan entre 500 y 800 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Restituciones

Las tasas de restitución obtenidas en este trazado (95 % y 62 % para el litio y fluoresceína respectivamente) son sensiblemente superiores a las de 1990 e indican que probablemente en estadios de flujo bajos la práctica totalidad del caudal infiltrado en Larrinoa resurge en los manantiales controlados durante el ensayo. No obstante, la presencia de ambos trazadores en el sondeo S. Legarda sugiere que una pequeña parte de dicho caudal alimenta de manera difusa, al menos en ese sector, a las margas del Santoniense y/o al acuífero cuaternario suprayacente.

Si bien el flujo relacionado con los conductos Larrinoa-Zambolinos-Lendia, no realiza una recarga volumétrica importante (al menos en estiaje) al manto asociado a las margas santonienses y al acuífero cuaternario, la geometría de las líneas isopiezas correspondientes a estos sistemas indican que el Karst de Apodaka constituye un borde claramente positivo, especialmente en el sector oeste. Las concentraciones de nitratos anormalmente

bajas que existen en los puntos de agua del cuaternario en la zona Foronda-Legarda-Lopidana (0-20 mg/l) en relación a los contenidos que se obtienen en los sectores situados más al sur (70-150 mg/l) corroboran la hipótesis de una recarga subsuperficial por parte del acuífero kárstico de Apodaka (Arrate et al., en prensa).

INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

La distribución espacial de los puntos en los que se ha evidenciado conexión hidráulica con los puntos de inyección, la interpretación conjunta de las curvas de concentración de trazador, caudal y conductividad, y la obtención de las correspondientes tasas de restitución han permitido establecer un detallado esquema conceptual del funcionamiento hidráulico de la unidad (figura 6) basado en el organigrama de Mangin (1975).

El Karst de Apodaka correspondería a un acuífero calcáreo permeable básicamente por fisuración y de transmisividad baja (3-15 m²/día), con aguas caracterizadas por una conductividad superior a 500 µs/cm, que es atravesado en zona no saturada por un conjunto de conductos de circulación rápida responsables del flujo desde los sumideros de Larrinoa-Manurga hasta las surgencias existentes en el borde sur de la unidad, y con conductividades comprendidas entre 200 y 500 µs/cm.

El subsistema fisurado es recargado por la precipitación y, quizá, por la unidad kárstica adyacente de la Sierra de Arrato. Las salidas se verifican mediante aportes al subsistema de circulación rápida, al acuífero cuaternario y a las margas santonienses.

El subsistema de circulación rápida es recargado fundamentalmente por el río Zubialde y sus afluentes, y en menor proporción por el subsistema fisurado. Su principal salida se realiza mediante las surgencias de Lendia, Ugau, Foronda, Prado, Kas y Legarda. Así mismo, existe una descarga más o menos difusa hacia las margas santonienses y el acuífero cuaternario, especialmente en estadios de flujo intermedios y altos, aunque de escasa importancia volumétrica.

APLICACION DE UN MODELO UNIDIMENSIONAL

El modelo unidimensional convencional para una inyección instantánea y sus condiciones iniciales son:

$$\frac{\delta C(x,t)}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C(x,t)}{\delta x^2} - V \frac{\delta C(x,t)}{\delta x}$$

$$C(x,0) = \frac{M}{PS} \delta(x-0) \quad (1)$$

$$C(\infty,t) = 0$$

C(x,t): Concentración de trazador a la distancia x y tiempo t desde la inyección.

D: Coeficiente de dispersión longitudinal.

V: Velocidad lineal media de flujo.

M: Masa inyectada de trazador.

P: Porosidad del acuífero.

S: Area de la sección de flujo.

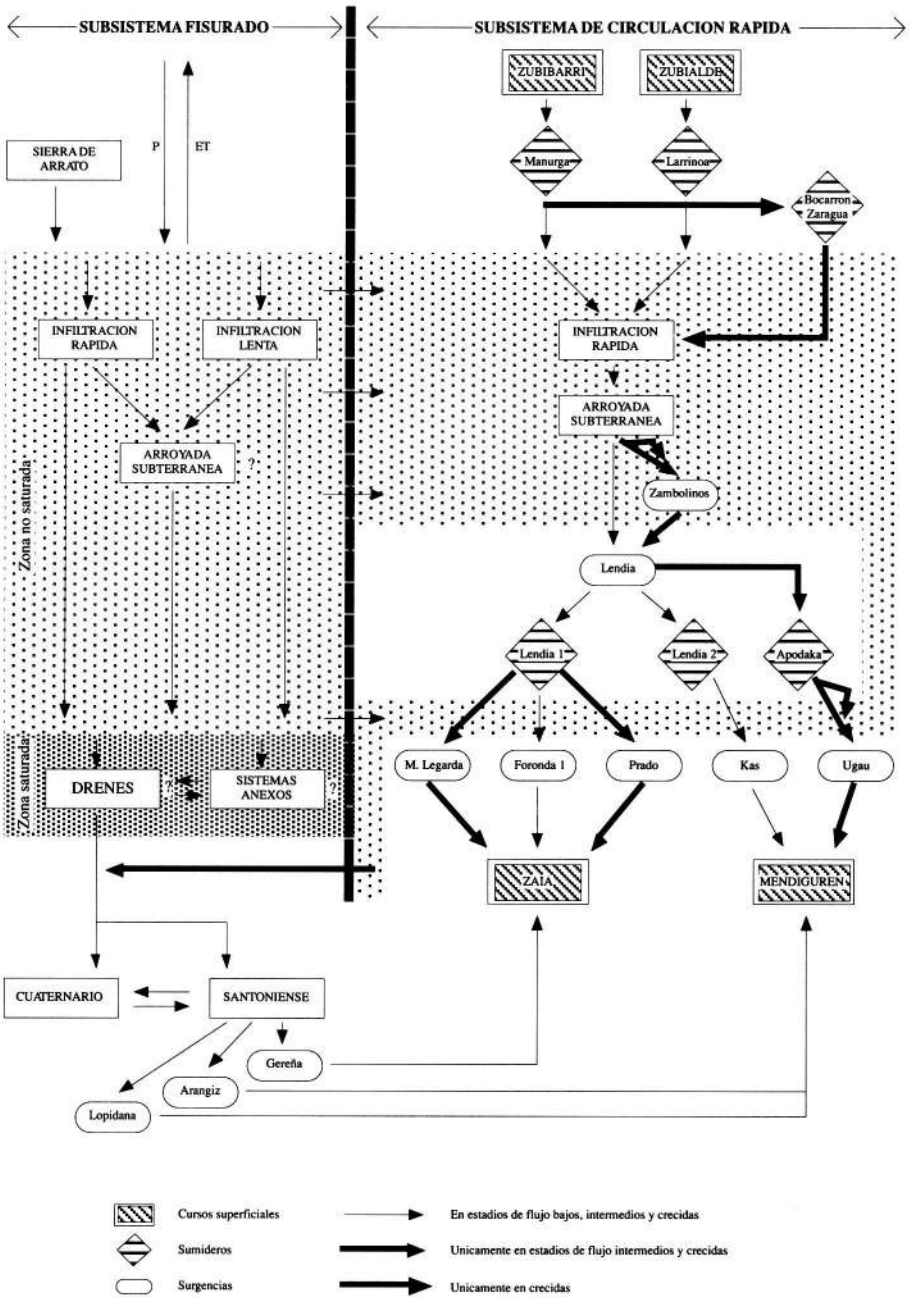


Figura 6. Esquema conceptual del funcionamiento del Karst de Apodaka (explicación en el texto)

La solución analítica del modelo es (Evans, 1983):

$$C(x,t) = \frac{M}{PS} \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left[-\frac{(x-Vt)^2}{4Dt}\right] \quad (2)$$

Cuando el modelo utilizado, la concentración inicial de trazador (M/PS) se supone conocida. Sin embargo, esta simplificación puede crear problemas. Así, una parte de la masa inyectada puede perderse por descomposición, adsorción y/o almacenamiento en el sistema. Por otra parte, tanto P como S, son difíciles de evaluar. Por esta razón, parece más apropiado sustituir la concentración inicial convencional (M/PS) por la concentración inicial efectiva (E) (Huang, 1991). De esta manera, la solución analítica teniendo en cuenta la concentración de fondo del trazador (C0), es:

$$C(x,t) = E \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left[-\frac{(x-Vt)^2}{4Dt}\right] + C0 \quad (3)$$

Las incógnitas existentes en (3) son determinadas mediante (5), (6) y (7)

$$U2 = \frac{t1 t2}{t1 - t2} \ln \frac{(C1 - C0) \sqrt{t1}}{(C2 - C0) \sqrt{t2}} \quad (4)$$

$$U3 = \frac{t1 t3}{t1 - t3} \ln \frac{(C1 - C0) \sqrt{t1}}{(C3 - C0) \sqrt{t3}}$$

$$V = \sqrt{\frac{U2 - U3}{t1 (U2 t3 - U3 t2)}} x \quad (5)$$

$$D = \frac{x^2 - t1 t2 V^2}{4 U2} \quad (6)$$

$$E = 2 (C1 - C0) \sqrt{\pi D t1} \exp\left[\frac{(x - V t1)^2}{4 D t1}\right] \quad (7)$$

Donde C1, t1; C2, t2 y C3, t3 (C1, C2, C3 ≠ C0) son puntos arbitrarios de la curva de concentración de trazador.

Dado que el modelo requiere flujo y dispersión unidimensional, y coeficiente de dispersión longitudinal y velocidad de flujo constantes (condiciones que no existen en el sistema de conductos del Karst de Apodaka tal y como se ha visto anteriormente), no es posible una única solución de E, V y D válida para todos los puntos de agua controlados. Por esta razón, se ha aplicado el modelo por separado en cada una de las surgencias.

En la figura 7 se muestran algunas de las curvas resultantes. El grado de ajuste entre las curvas experimentales y teóricas es notable en los puntos de agua relacionados con conduc-

tos kársticos muy desarrollados (Zambolinos, Lendia, Foronda y Kas). Sin embargo, la calidad del ajuste es más baja en aquellas zonas caracterizadas por un flujo que se desarrolla a favor de conductos poco desarrollados y/o fracturas (sector de Legarda), ya que en este tipo de medio, son más frecuentes los procesos de adsorción/desorción y la existencia de diversas trayectorias de flujo hacia las surgencias.

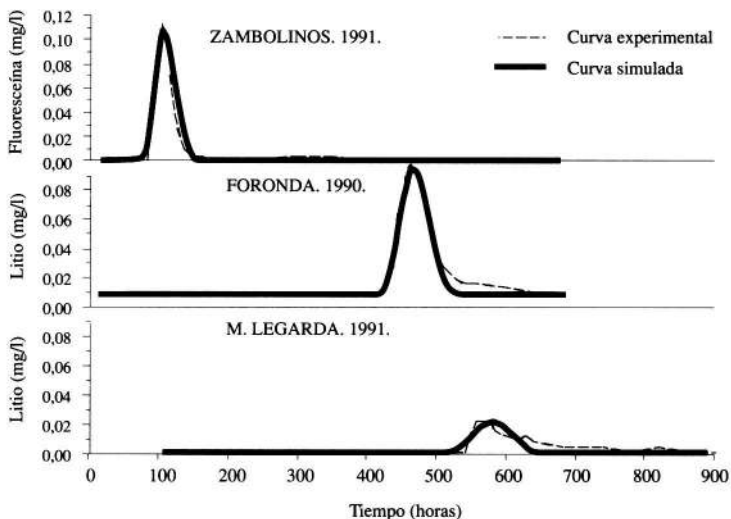


Figura 7. Ejemplos de curvas procedentes de la aplicación del modelo unidimensional.

Es interesante señalar que en general se produce una disminución progresiva de E y un lógico incremento de la dispersión longitudinal (decremento de D) a medida que aumenta la distancia al punto de inyección (tabla 1). La disminución de la concentración inicial efectiva es debida probablemente a la combinación de tres procesos:

- Fenómenos de difluencia.
- Descomposición y/o retención de los trazadores.
- Incorporación de aportes no trazados.

La aplicación de técnicas de deconvolución, que permite obtener las curvas de concentración en caso de inyección no instantánea, posibilitaría el conocimiento de las características del flujo para cada uno de los trayectos marcados por la aparición de los trazadores, la simulación de inyecciones instantáneas en los diversos puntos de control, y una adecuada modelización del transporte para unas condiciones hidráulicas similares a las existentes durante los trazados.

Si bien en el Karst de Apodaka los modelos unidimensionales se perfilan como una herramienta muy válida para la simulación del transporte, su aplicación en sistemas en los que existen numerosos trayectos intercomunicados entre sí y en medios que posibilitan fenómenos de absorción-desorción puede resultar problemática.

Así, en diversos ensayos realizados por los autores en otros acuíferos kársticos del País Vasco las curvas de concentración de trazador obtenidas presentan geometrías plurimodales, incluso en ausencia de precipitaciones. Tal es el caso de los resultados obtenidos en varios trazados en la Sierra de Entzia (figura 8), un sistema caracterizado por una intensa fracturación y karstificación (figura 9).

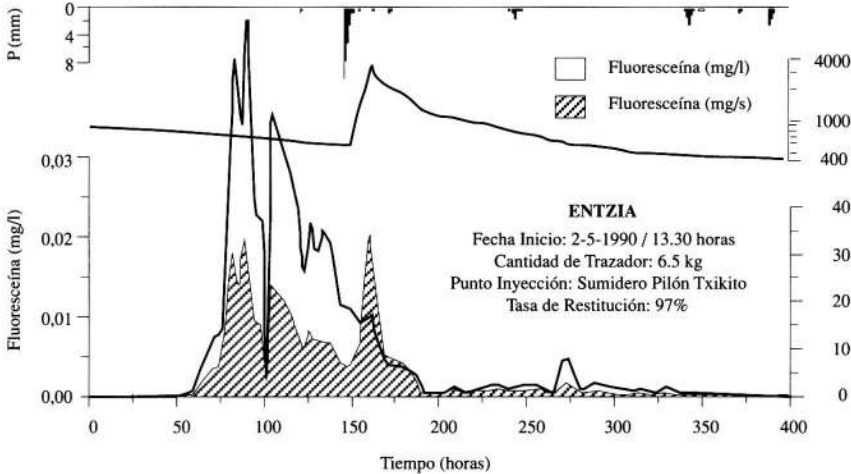


Figura 8. Curvas de concentración de trazador y flujo másico en el trazado de Entzia correspondiente a 1990, en relación al caudal y la precipitación.

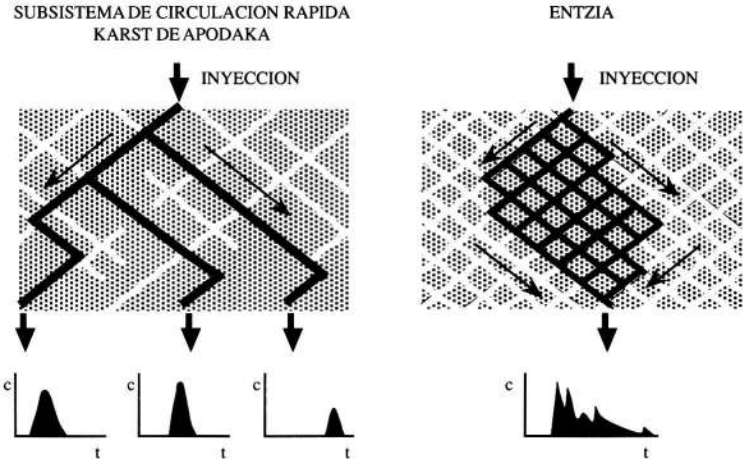


Figura 9. Representación del modelo de flujo propuesto para el Subsistema de circulación rápida del Karst de Apodaka y el sistema de Entzia.

	Zambolinos	Lendia	Ugau	Foronda	Prado	Mendiguren	M. Legarda	S. Legarda
Cota (m)	545	524	522	514	515	517	511	512
Trazado 90. T. Rest. Fluoresc.: 44 %. T. Rest. Litio: 70 %.								
X (km)	1,95	3,15	3,95			3,80		
T. min. (días)	6,70	8,70	7,90			8,10		
T. moda (días)	8,30	9,10	8,80			9,10		
T. max (días)	12,20	12,70	12,70			12,80		
V. max (km/día)	0,160	0,250	0,310			0,295		
V. moda (km/día)	0,265	0,375	0,450			0,425		
V. min (km/día)	0,330	0,405	0,505			0,470		
DI fluoresc. (m ² /s)	0,007	0,027	0,020			0,029		
DI Litio (m ² /s)	0,007	0,029	0,024			0,030		
E fluoresc (g/m ²)	22,1		27,0					
E Litio (g/m ²)	36,4		49,8					
Q med. extra máx. (l/s)			40			60		
Fluoresceína 1991. T. Restitución: 62 %								
X (km)	3,40	5,25		7,35	7,25	6,80	8,60	8,50
T. min. (días)	1,45	6,04		7,00	8,12	6,89	11,37	11,77
T. moda (días)	2,08	7,41		8,45	-	8,77	13,22	13,20
T. max (días)	-	29,58		-	-		30,20	25,00
V. max (km/día)	2,340	0,870		1,050	0,890	0,980	0,750	0,720
V. moda (km/día)	1,630	0,700		0,870	-	0,770	0,650	0,640
V. min (km/día)	-	0,170		-	-		0,280	0,340
DI 1 (m ² /s)	0,486	0,152		0,243		0,190	0,126	0,100
DI 2 (m ² /s)	0,660	0,120		0,490		0,470	0,130	0,360
E1 (g/m ²)	119,5	51,8		52,5		25,3	11,0	
Q med. extra máx. (l/s)				15		27		
Litio 1991. T. Restitución: 95 %								
X (km)				2,10	2,00	1,90	3,30	3,20
T. min. (días)				0,95	2,22	1,02	5,47	5,87
T. moda (días)				0,97	-	1,35	5,83	5,80
T. max (días)				3,22	-	11,66	11,33	18,60
V. max (km/día)				2,210	0,900	1,860	0,600	0,545
V. moda (km/día)				2,160	-	1,400	0,560	0,552
V. min (km/día)				0,650	-	0,160	0,290	0,172
DI (m ² /s)				0,350		0,166	0,111	0,490
E (g/m ²)				340,8		120,7	19,6	

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos en los diversos trazados realizados en el Karst de Apodaka.

CONCLUSIONES

La metodología utilizada en los trazados realizados en el Karst de Apodaka, basada en la interpretación conjunta de la información proporcionada por los trazadores (verificación de conexiones hidráulicas mediante un exhaustivo muestreo de los diversos puntos, geometría de las curvas de concentración, tasas de restitución, etc.), de datos adicionales recogidos durante la realización de los ensayos (evoluciones de caudales/niveles y conductividades) y

de la diversa información, tanto geológica como hidrogeológica (geometría, litología, permeabilidades, características hidroquímicas, etc.) del sector, ha permitido un detallado conocimiento del funcionamiento del acuífero.

Así, se ha puesto de manifiesto la existencia de dos subsistemas (subsistema fisurado y subsistema de circulación rápida) claramente diferenciados, tanto en lo que se refiere a sus modalidades de recarga/descarga y de flujo, como en lo referente a las características hidroquímicas.

Por otra parte, y siempre teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por las condiciones de partida, la aplicación de modelos unidimensionales en el subsistema de circulación rápida se perfila como una técnica muy válida para la simulación de eventuales agentes contaminantes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a INGEMISA, en especial a Ramón Floristán, en cuya colaboración se realizó el trazado de 1991; a los hidrogeólogos Carlos Luen-go, Zorione Aurrekoetxea, Luis Egiluz, Ana Artetxe (U.P.V./E.H.U.), Martin Breton, Nathalie Brochu, Josée Létourneau, Andrée-Lise Methot (Universidad Laval, Quebec-Canadá) y Yolanda Carro (INGEMISA, Bilbao) por su inestimable ayuda en los muestreos; y a Manuel Jesús Casas (Dpto. de Química Analítica, U.P.V./E.H.U.), quien ha realizado gran parte de los análisis en los que se basa el estudio.

Así mismo, agradecen a la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea la financiación de la presente investigación mediante el Proyecto 121.310-0010/89.

BIBLIOGRAFIA

- ANTIGUEDAD, I.; IBARRA, V. y MORALES, T. (1990).- "Expériences de traçages des systèmes karstiques en Biscaye (Pays Basque)". *Memoires of the 22nd Congress of IAH*, Vol. XXII, pp. 212-215. Lausanne.
- ARRATE, I. y ANTIGUEDAD, I. (en prensa).- "Estudio hidrodinámico del Karst de Apodaka (Araba, País Vasco) mediante ensayos con trazadores". Geolis. Lisboa, Portugal.
- ARRATE, I.; MORELL, I. y ANTIGUEDAD, I. (en prensa).- "Contaminación por nitratos en el acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz. Distribución espacial y evolución temporal". *V Simposio de Hidrogeología*. A.E.H.S. Alicante.
- ERASO, A.; AGORRETA, A.; FARIÑA, J. y LLANOS, J. A. (1961).- "El karst subyacente de Apodaka y otras zonas próximas". Bol. "Sancho el Sabio". Vol. 1-2. pp. 1-60. Vitoria-Gasteiz.
- EVANS, A. V. (1983).- "Tracer techniques in hydrology". *Int. J. A. Rad. V.* 34, pp. 451-475.
- GASPAR, E. (1987).- "Modern trends in tracer hydrology". Vol II. CRC Press. Florida.
- HUANG, H. (1991): "On a one-dimensional tracer model". *Groundwater*. Vol 29, N. 1, pp. 18-20.
- JAMIER, D. (1976): "Interpretation des essais de traçage des eaux karstiques". *Deuxième Colloque d'Hidrogeologie en Pays Calcaire*. Fasc. 25, 3ème série, pp. 229-240.
- LARESGOITI, F.; GALLO, B.; ALONSO, R.; ARRATE, I. y ANTIGUEDAD, I. (en prensa).- "Determination of the tracers fluorescein and lithium. Application to hydrogeological systems". *Analisis*. Paris, Francia.
- MANGIN, A. (1975).- "Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques". Thèse Doct. Sci. Nat., in: *Ann. Spéleol.*, 29, 3, pp. 283-332; 4, pp. 495-601; 30, 1, pp. 21-124.