

# Ensayos de trazadores en medios fracturados de baja permeabilidad Ejemplos del Proyecto El Berrocal

*Tracer tests in low permeability-fractured media. Examples from El Berrocal Project*

J. Guimerá (\*), M. García (\*\*), M.W. Saaltink (\*), A. Yllera (\*\*), J. Carrera (\*) y J. Bueno (\*\*\*)

(\*) Dpto. Ingeniería del Terreno.ETSICCPB. UPC, C/Gran Capitán, s/n D2 08034- Barcelona

(\*\*) Instituto de Medio Ambiente, CIEMAT, Madrid

(\*\*\*) Centro de Estudios y Técnicas Aplicadas, CEDEX

## ABSTRACT

Tracer tests are of main importance to understand the behaviour of solutes at hydrological systems. In low permeability fractured media, performance of such tests becomes difficult due to the low flowrates achievable, to ensuring that solutes are effectively injected and to the complex characterization of the geometry of these systems, among others. Limitations set constraints to the data thus obtained, which in turn, are difficult to interpret. Therefore, tests have to be performed under extremely controlled conditions. In this article we present the applied methodology in a granitic rock mass in the frame of El Berrocal project (planning, development, performance and interpretation).

**Key words:** Tracer tests, fracture flow, low permeability media.

Geogaceta, 20 (7) (1996), 1634-1637

ISSN: 0213683X

## Introducción

Los trazadores reflejan el flujo de agua y el transporte de masa dentro de un sistema hidrológico, independientemente de la escala de trabajo. Se utilizan, por tanto, para caracterizar los procesos de transporte y transferencia de masa en acuíferos y para cuantificar procesos hidrológicos tales como la recarga a los acuíferos, descargas, afloros de manantiales y ríos, etc.

Existen multitud de trazadores (solutos estables, partículas en suspensión, isótopos, etc). Lo importante es que sean fáciles de analizar en concentraciones bajas, que apenas estén presentes en el agua natural, que no alteren las propiedades del agua, etc.

Los trazadores pueden ser estudiados desde su presencia natural en el medio, como contaminantes añadidos o como parte de un ensayo planificado (Custodio y Llamas, 1983; Domenico y Schwartz, 1991; Davis *et al.*, 1985). En todos los casos se estudia la geometría y la evolución temporal de su presencia en el medio.

El interés particular de la realización de un ensayo de trazadores reside en que permite identificar los parámetros que rigen el transporte de solutos y aumentar el conocimiento de la geometría del medio a través de la interpretación bajo diferentes hipótesis. Por ello, la realización de ensayos de

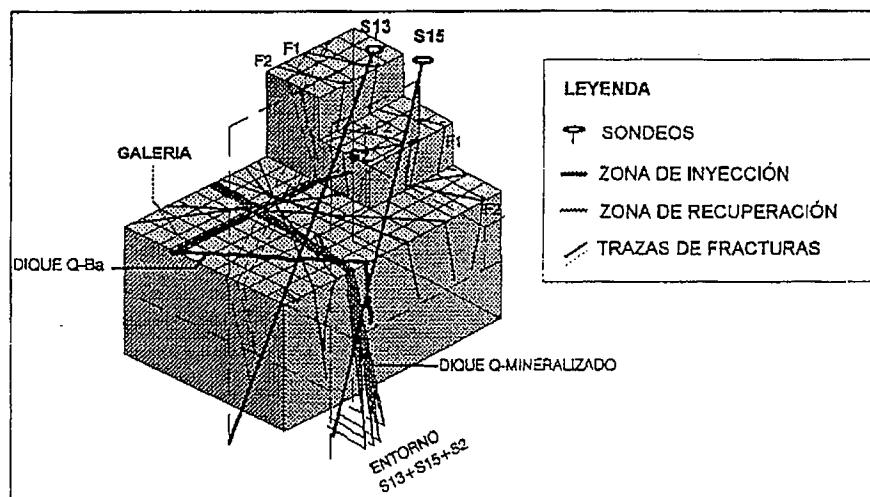


Fig. 1.- Esquema de situación de los sondeos 2, 13 y 15 en la estación experimental del Berrocal.

Fig. 1.-Boreholes 2, 13 y 15 location at the El Berrocal experimental site.

trazadores es de suma importancia en las tareas de caracterización de un emplazamiento, tanto si es experimental como si se trata de un potencial almacenamiento de residuos. En medios fracturados de baja permeabilidad, el transporte se realiza en su mayoría a través de vías preferenciales (fracturas, diques, zonas de cizalla...) que suelen estar identificados y caracterizados puntualmente mediante testigos de sondeos. Debido a que el conocimien-

to rara vez es absoluto, la interpretación puede no ser única ni los resultados ser comparables.

En resumen, puede decirse que de la realización de un ensayo de trazador se obtiene una mejor caracterización del medio. Con esta filosofía se realizaron los ensayos de trazadores en el Berrocal. A continuación se resumen la metodología que se siguió, la instrumentación que se desarrolló, los resultados

que se alcanzaron y la interpretación de uno los ensayos.

**Metodología aplicada al proyecto berrocal**

La metodología seguida parte de unas premisas muy genéricas, que se deben seguir en cualquier campaña de ensayos de trazadores, aunque con algunas particularidades señaladas entre otros por Abelin *et al.*, (1991), Andersson *et al.*, (1993), y Birgersson *et al.*, (1993). Parte de esta metodología se describe en d'Alessandro *et al.* (1995) y en Guimerá *et al.*, (1996). Básicamente, en el proceso se pueden distinguir:

**1. Caracterización previa:**

- Control de la perforación de los sondeos
- Identificación de fracturas conectando sondeos

**Caracterización hidráulica en tramos aislados**

Ensayos de bombeo entre sondeos en tramos aislados

- 2. Selección de la instrumentación**
- 3. Ensayos de dilución:**  
con flujo natural y con bombeo
- 4. Ensayos de flujo convergente**

En aras de la brevedad, nos centraremos en los tres últimos. En la Figura 1 se resume gráficamente la posición de los sondeos y de las fracturas intersectadas.

Se consiguieron identificar 2 fracturas o sistemas de fracturas con una orientación aproximada de 160/80 y 225/60. La primera de ellas conectaba el fondo del sondeo 2 (30 m) con a parte superior del sondeo 3 (24 m) y el sondeo 15 a 40 m. La segunda, conectaba el sondeo 2 con la parte inferior del sondeo 13 a 72 m de profundidad. Las distancias entre los tramos de los sondeos 13y15 y el sondeo 2 oscilaban entre 19 y 25 m.

**Selección de instrumentación**

Una de las dificultades principales en los ensayos de trazadores consiste en controlar adecuadamente la entrada y salida de masa del sistema. Para ello, y a diferencia de otros autores como Frost *et al.*, (1992), Cullen *et al.*, (1985), Ivanovich y Smith (1978) o Karazaki *et al.*, (1994), se diseñó un sistema que permitía tomar muestras y realizar mediciones de concentración en continuo, tanto en la inyección como en la extracción. Además de controlar la concentración, el sistema era capaz de controlar automáticamente la presión y temperatura de los 11 tramos de sondeos obturados, las caudales de inyección de trazador y de recirculación por homogeneización, los caudales de recirculación y de extracción en la salida y las presiones en los sistemas de recirculación.

ENSAYO DE TRAZADORES: PANELES DE RECUPERACIÓN

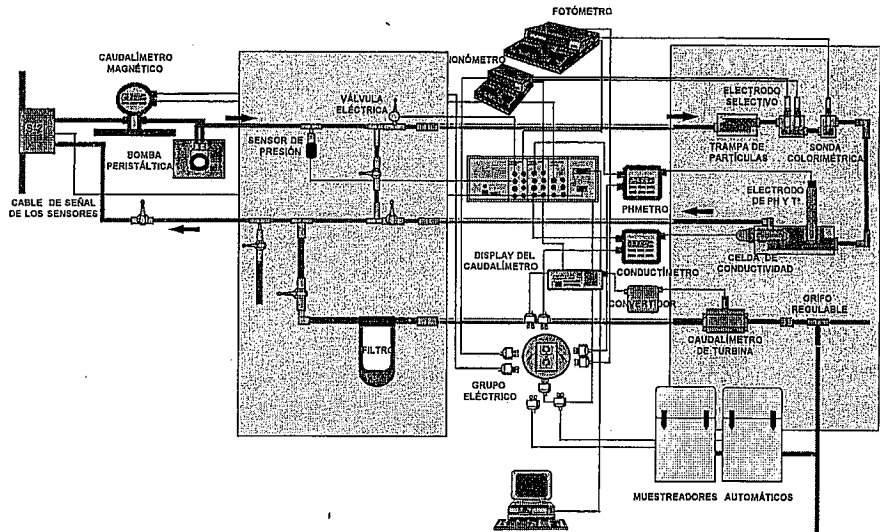


Fig. 2.- Esquema de instrumentacion en superficie para controlar el sondeo de extraccion.

Fig. 2.- Surface instrumentation at the extraction well.

Los muestreos se hacían de forma automática a intervalos variables y se comprobaban también de forma manual. Esta instrumentación se muestra en las Figuras 2 y 3 y ha permitido controlar ininterrumpidamente durante varios meses los ensayos.

**Ensayos de dilución**

Los ensayos de dilución son ampliamente conocidos y consisten en introducir un trazador conservativo a escala del experimento en un sondeo y observar su dilución en función del flujo del agua que lo afecte. La variación de la concentración en el tiempo sigue una función exponencial decreciente del tipo (Freeze y Cherry, 1979):

$$C(t) = C_0 e^{-\alpha t}$$

siendo C(t) la concentración, C<sub>0</sub> la concentración inicial, t el tiempo de medida y α la constante de renovación (α=ν/q, siendo ν el volumen del tramo de dilución y q el caudal de agua que fluye a su través)

Los ensayos de dilución en los sondeos permitieron determinar cual era el flujo natural a través de ellos, siendo en promedio del orden de mililitros por hora. Después de los ensayos para cuantificar el flujo natural, se repitieron con un caudal de bombeo en el sondeo 2, de 0,16 l/min.

La diferencia entre los ensayos de dilución con y sin bombeo permitió decidir, junto con los parámetros hidráulicos, cuales eran los tramos idóneos para realizar la inyección (Gustafsson y Andersson, 1991).

**Ensayos de flujo convergente**

Los ensayos de flujo convergente consisten en la creación de un campo de velocidades del agua convergente hacia un pozo de bombeo y en la inyección de uno o varios trazadores dentro del ámbito de ese campo. En nuestro caso se bombeaba desde el sondeo 2. Las inyecciones se realizaron de forma escalonada en tres fases:

- 1. Inyección simultanea de tres trazadores conservativos en el tramo superior del S-13.

Ensayo	Tramo de Inyección	Trazador	Masa Inyectada	Recuperación %
Inyección forzada	13-sup	Uranina	15.0006 g	40,84
		Gd-DTPA	1.1490 g	43.51
		Deuterio	15 l	56.28
Inyección Natural	3-sup	Phloxina B Re	12.3943 g 0.7310 g	30.06 34.55
	13-inf	Brillant S. IK	12.1260 g 14.8916 g	0.0 0.0
	15	Eosina Y	13.4691 g	0.0

Tabla 1.- Masa de trazadores inyectada y porcentaje recuperado

Table 1.- Tracer masses injected and recoveries achieved

2. Inyección simultanea de 5 trazadores conservativos en los tres tramos de inyección

3. Inyección simultanea de 2 trazadores conservativos, y otro potencialmente no conservativo en el tramo superior del S-13 (no se obtuvo recuperacion).

A continuación se describen la primera, de la cual se presenta también una interpretación

Los trazadores inyectados fueron Uranina, Gd-DTPA y deuterio. En la Tabla 1 se resumen las masas inyectadas y recuperadas. Se procedió a establecer un caudal de recirculación en la inyección y en el bombeo del orden de 4 a 10 veces el caudal de bombeo. Una vez establecida la recirculación, se inyectaron los tres trazadores sucesivamente. Cuando se homogeneizó la concentración en el tramo de inyección, se forzó la entrada del trazador hacia la formación inyectando un volumen de agua conocido sin trazador. Esta inyección perturbó durante unas pocas horas el sistema de flujo, pero el tiempo que duró es pequeño a escala de la totalidad del experimento (menos de 1 día frente a los 30 que duró el ensayo). Es posible que, debido a esta inyección, parte del trazador se perdiera fuera del ámbito del bombeo del sondeo 2, lo que explicaría que las recuperaciones no sean totales. La ventaja de realizar esta inyección es que mas del 90 % del trazador entra en la formación antes de la finalización del primer día, con lo que se puede considerar una inyección prácticamente puntual. En la Figura 4 se muestran las curvas de llegada de los tres trazadores. Se observa que el tiempo de la primera llegada es muy rápido, menor a 1 día para los tres trazadores, si bien el pico se alcanza en distintos tiempos para los tres.

**Interpretación numérica de uno de los ensayos**

La llegada al sondeo 2 de Uranina inyectada en el tramo superior del sondeo 13, se ha interpretado mediante el programa TRAN-SIN III (Galarza *et al.*, 1994), que permite estimar los parámetros de flujo y transporte a partir de valores medidos de niveles y concentraciones. La solución de las ecuaciones de flujo y transporte se realiza por el método de los elementos finitos y la estimación de los parámetros se hace maximizando la verosimilitud.

La ecuación de transporte resuelta por TRAN-SIN III sigue la formulación clásica. Los procesos físico-químicos considerados por el programa son: dispersión, difusión molecular, reacciones químicas de primer orden, adsorción lineal y difusión en la matriz. El régimen puede ser estacionario o transitorio y en este ultimo caso puede acoplarse con flujo estacionario o transitorio. En

**ENSAYO DE TRAZADORES:  
SONDEO 13**

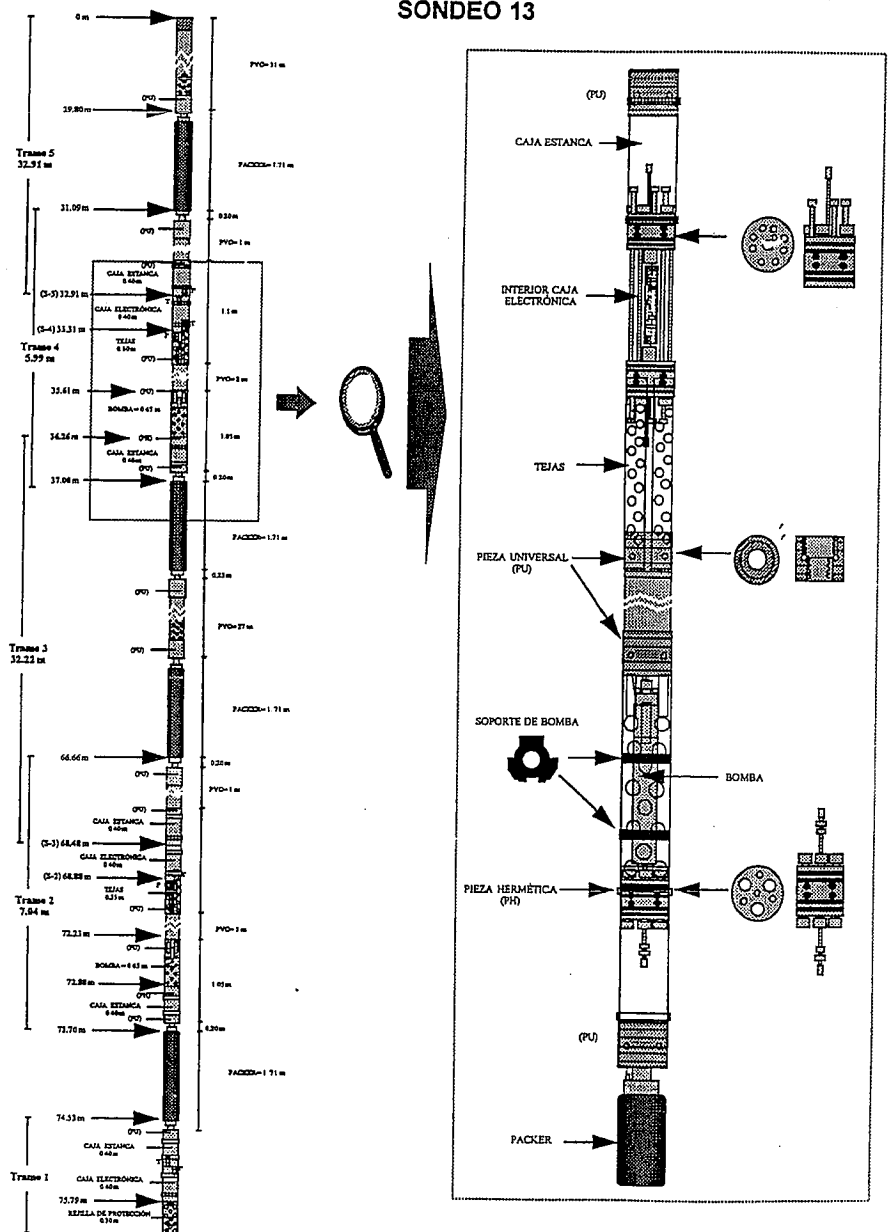


Fig. 3.- Esquema de instrumentación del sondeo 13. Los sondeos 15 y 2 utilizaron el mismo sistema, con menos tramos obturados (4 y 2 respectivamente).

Fig. 3.- Downhole instrumentation at borehole 13. Boreholes 15 and 2 used the same system with less packed-off intervals (4 and 2 respectively).

los contornos se puede fijar la concentración o el flujo masico; también se puede especificar el flujo masico como producto de una concentración por el flujo de agua. Tanto las concentraciones como los flujos masicos pueden variar de forma impuesta.

Se llevo a cabo la interpretación en dos pasos: Primero se estimaron parámetros de flujo estacionario con bombeo en el tramo del sondeo S2 mediante niveles medidos al cabo de diez días de bombeo. Así se obtuvo un campo de velocidades con las cuales posteriormente se estimaron parámetros de transporte de los trazadores mediante las concentraciones medidas. La estimación de los pará-

metros de flujo y de transporte se hace pues, por separado. Vives *et al.*, (1995) explican el proceso de implementación numérica de los modelos conceptuales y la calibración de los parámetros de flujo.

En la Figura 5 se puede ver el ajuste de las concentraciones del trazador en el sondeo de extracción de tres modelos conceptuales considerados: porosidad simple y doble con o sin inyección de agua después del trazador.

Los parámetros estimados fueron dispersividad longitudinal y transversal tanto de la formación como de las fracturas y porosidad de ambas.

El ajuste es aceptable, pero las formas de la curva medida y calculada se diferencian un poco. Probablemente, se pueda mejorar estimando conjuntamente los parámetros de flujo y transporte en lugar de estimarlos por separado, además de simular un proceso de retardo, como difusión en la matriz, tal como se ha comentado anteriormente.

Los ajustes de los modelos son parecidos para la porosidad simple sin tener en cuenta la inyección de agua y el de doble porosidad con inyección. Sin embargo, el modelo de porosidad sencilla con inyección resulta en un ajuste pobre. Para los modelos de inyección, las dispersividades son parecidas (1-2 m) frente a los 13-15 m del que no la tiene en cuenta. Para los mejores ajustes, el modelo de porosidad simple con inyección, presenta unos valores de porosidad de la fractura 10 veces menor (0.0002 m frente a 0.001 m). La porosidad de la roca es 100 veces mayor, lo que sugiere que casi todo el transporte tiene lugar a través de la fractura.

## Conclusiones

La instrumentación desarrollada ha sido capaz de soportar condiciones de campo durante varios meses sin verse afectada de forma dramática. La posibilidad de instrumentar sondeos con herramientas electrónicas sumergidas a precio moderado abre grandes posibilidades en la instrumentación permanente. En el futuro se piensa trabajar con sensores de parámetros físico-químicos como la conductividad eléctrica, pH y Eh.

La metodología seguida de ensayos ha permitido identificar correctamente no solo las principales vías de flujo, sino como se verían afectadas posteriormente por el ensayo de flujo convergente. Así, los ensayos de dilución han sido un complemento muy eficaz dentro del programa de ensayos de trazadores.

Dada la duración de los ensayos (varias semanas hasta meses), estos pueden verse afectados por cambios en las condiciones de contorno del sistema, bien sea por causas naturales (lluvia y recarga con el consiguiente cambio en los niveles piezométricos) o por fallo en la instrumentación (interrupción o variación del caudal de bombeo es la más frecuente). Por ese motivo, en el caso que se ha presentado, la inyección tipo pulso es más conveniente al acortar notablemente la duración total del ensayo.

La interpretación numérica, corrobora las diferencias que se observan entre los distintos trazadores, pudiendo estar afectados por procesos de difusión en la matriz (Uranina) o por exclusión debida al tamaño de la molécula (Gd-DTPA). La presencia de elementos singulares de flujo (fracturas, diques, zona fréatica) y la necesidad de representar las condicio-

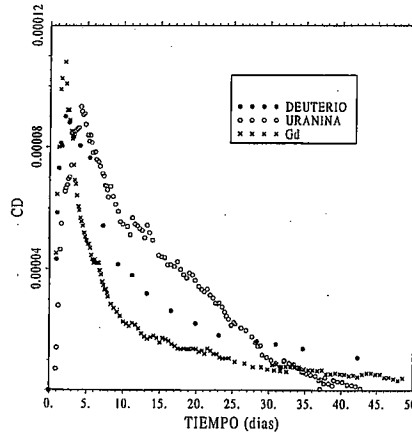


Fig. 4.- Curvas llegada al sondeo 2 de los trazadores de la primera inyección (Concentración normalizada respecto a la porosidad obtenida para el tiempo del pico).

Fig. 4.- First tracer experiment breakthrough curves at borehole 2 (Normalized concentration to porosity derived from peak time).

nes de flujo natural en un medio tan heterogéneo, complica notablemente la tarea de calibración.

## Agradecimientos

El proyecto Berrocal fue financiado por ENRESA y parcialmente por la UE (proyecto RADWAS F12-CT91-0080). Parte de este trabajo se presentó en las II Jornadas de I+D de ENRESA, en junio de 1995 y en el VI Simposio Nacional de Hidrogeología en octubre de 1995. Los autores expresan su agradecimiento al personal técnico del CIEMAT y del CEDEX, particularmente a B. Ruíz, A. Hernández, J.G. Bachiller, J. Almendrote, J. Aleixandre, O. González, L. Pintado, F. Sanchidrian, F. Ortuño y E. Floría. Merecen especial reconocimiento Pedro Rivas y Jaime Tamarit por su coraje y entusiasmo durante todo el proyecto.

## Referencias

- Abelin, H.; L. Birgersson; J. Gidlund and I. Neretnieks (1991a) *Water Resour. Res.* 27(12) 3107-3117.
- d'Alessandro, M.; J. Guimerá; F. Mousty y A. Yllera (1995) *El Berrocal Project, Topical Report 15.*
- Andersson, P.; R. Nordqvist; T. Persson; C.O. Eriksson; E. Gustafsson and T. Itner (1993) *The Fracture Zone Project-Phase 3. SKB Tech. Rep. 93-2644 pp+Appendices.*
- Birgersson, L.; L. Moreno; I. Neretnieks; H. Widen and T. Agren (1993) *Water Resour. Res.* 29(12) 3867-3878.
- Cullen, J.J.; K.J. Stetzenbach and E.S. Simpson (1985) *IAH Memoire vol XVII part 1*

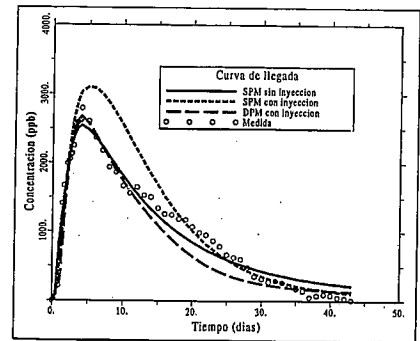


Fig. 5.- Modelación de la llegada de uranina en el primer ensayo (inyección forzada) SPM = modelo de porosidad sencilla; DPM = modelo de porosidad doble.

Fig. 5.- Modeling of uranine breakthrough (flushing) SPM = Single porosity model; DPM = double porosity model.

Hidrogeology of rocks of low permeability, Tucson, Arizona pp. 332-344.

Custodio, E. y M.R. Llamas (1983) «Hidrología subterránea» Sección 12, Ed. Omega, Barcelona.

Davis, S.N.; D.J. Campbell; H.W. Bentley y T.J. Flinn (1985) «An introduction to groundwater tracers». Report EPA-600/15

Domenico, P. y F. Schwartz (1990) «Physical and chemical hydrogeology» John. Wiley and Sons, Signapur, 824 pp.

Freeze, A. y J. Cherry (1979) «Groundwater». Prentice Hall. New Jersey.

Frick, V.; W.R. Alexander; B. Breyens; P. Bossart; M.H. Bradbury; Ch. Buhler; J. Eikenberg; Th. Fierz; W. Heer; E. Hoehn; I.G. McKinley and P.A. Smith (1992) *NAGRA Tech. Rep. 91-04.*

Frost, L.H.; N.W. Scheier; E.T. Kozak and C.C. Davison (1992) *Tracer Hydrology, Hv'otzland Werner (Eds) 313-320.*

Galarza, G. Medina, A. y Carrera, J. (1994) «Manual del código TRANSIN III» Dept. Ingeniería del Terreno, ETSECCPB, UPC, Barcelona

Guimerá, J. *et al.* (1996) *El Berrocal project. TGR-6, ENRESA-CEC*

Guimerá, J.; Saltink, M.; Martínez, L.; Gomez, P. y Carrera, J. (1995) *VI Simp. Nac. Hidrog., Sevilla (vol. XIX, 251-262)*

Gustafsson, E. and P. Andersson (1991) *J. Hydrol., (126) 79-111.*

Ivanovich, M. and D.B. Smith (1978) *J. of Hydrol., (36) 33-45.*

Karasaki, K.; B. Freifeld and C. Davison (1994) *Proc. Fifth Ann. Intern. Conf. on Rod Waste Disp. Las Vegas, May 22-26.*

Vives, L.; Saaltink, M.; Tume, P.; Guimerá, J. y Carrera, J. (1995) *VI Simp. Nac. Hidrog., Sevilla, (vol. XIX, 261-272)*