

Estimación de parámetros hidrogeológicos en una formación de baja permeabilidad empleando datos de estación de aforos fluviales

R. Aliaga⁽¹⁾⁽²⁾, A. Sahuquillo⁽¹⁾ y E. Custodio⁽³⁾

(1) Departamento de Ingeniería Hidráulica y M.A., Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n, 46020 Valencia.
E-mails: raliaga@upv.es - asahuq@dihma.upv.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas 23, 28003 Madrid.

(3) Departamento de Ingeniería del Terreno, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña,
C/ Gran Capitán, s/n. Ed. D2. 08034 Barcelona (España).
E-mails: francisco.alcala@upc.es - emilio.custodio@upc.es

RESUMEN

Áreas extensas de basamento rocoso pueden tener, concentrada en las capas superiores, una conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento relativamente importantes, capaces de sostener el caudal de cauces fluviales durante meses. Se presenta un caso de estudio con la metodología que se ha empleado para obtener un conjunto posible de parámetros hidráulicos a partir del análisis de los datos de una estación de aforos. Con el objetivo de poder realizar estimaciones sobre el flujo subterráneo de agua en el entorno de la Corta de Aznalcóllar (Sevilla, Sur de España) se ha desarrollado un modelo en tres dimensiones que incluye además la Corta de Los Frailes. Se dispone sólo de unas pocas medidas de niveles piezométricos y prácticamente ninguna medida de conductividad hidráulica en la zona de estudio. Tanto la distribución de la conductividad hidráulica como del coeficiente de almacenamiento en las formaciones geológicas o sus valores medios son desconocidos. Para incrementar el conocimiento sobre la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento de las pizarras se han analizado los registros existentes de la estación de aforos de Gerena, emplazada en el río Guadiamar, adyacente a la zona. De su análisis se desprende que el aporte subterráneo es sorprendentemente elevado durante los años húmedos. Se ha empleado un modelo lluvia-escorrentía al que se le han suministrado datos de los caudales en el río y datos meteorológicos de la zona, obteniendo una estimación de la recarga diaria. Estos valores de recarga se han empleado como entrada para un modelo de flujo subterráneo realizado en un corte vertical de la cuenca. Como resultado de este último modelo se obtienen unos caudales drenados desde el acuífero al río que son función de la conductividad hidráulica y del coeficiente de almacenamiento. Tras un proceso de calibración en el que se aproximan los caudales estimados con un modelo "corte vertical" a los caudales reales medidos en la estación de aforos, se observa la necesidad de que la capa superficial del terreno tenga una conductividad hidráulica considerablemente superior a la de las capas subyacentes. Esto se corresponde con la franja alterada y meteorizada.

Palabras clave: Aznalcóllar, baja permeabilidad, caudal base, conductividad hidráulica, impacto minero, recarga, Sur de España

Hydrogeological analysis of a low permeability formation using stream flow gauging data

ABSTRACT

Extense areas of hard rock may have a rather important groundwater storage that maintain river flow for months. In some cases most of the permeability is in the upper layers. A case study is presented with the methodology applied to obtain a possible set of hydraulic parameters from the analysis of mean daily flows in a gauging station. In order to estimate future groundwater flow in an area around the Aznalcóllar open pit mine (Seville, Southern Spain) a 3D model has been developed including the close-by Los Frailes open pit mine. Hydraulic conductivity and storativity and their distribution in the geologic formations (mainly Palaeozoic slates) are unknown. There are only few water head measurements and no hydraulic conductivity information available in the study area. In order to increase the knowledge of the system the Gerena River gauging station data have been analyzed. It is in the Guadiamar River, adjoining the zone. Groundwater contribution to the hydrograph is surprisingly high in rainy years. A rainfall-runoff model using river flow and meteorological data of this zone has been run and the daily recharge has been obtained. Computed daily aquifer recharge has been used as input to a vertical section groundwater flow model of the basin. The vertical flow model gives the estimated flow values draining to the river as a function of hydraulic conductivity and storativity values. Calibration results indicate that to achieve a good match between measured data in the Gerena gauging station and the model a shallow aquifer layer with considerably higher hydraulic conductivity values than in the deeper layers is needed. This corresponds to the weathered and altered fringe.

Key words: Aznalcóllar, baseflow separation, hydraulic conductivity, low permeability, mining impact, recharge, Southern Spain

Introducción

No es raro encontrar que en áreas extensas de rocas duras de basamento, tales como granitos y rocas metamórficas, el grado de alteración sea lo suficiente como para crear un almacenamiento subterráneo recargado por la lluvia que luego es capaz de mantener un flujo permanente en los cauces locales durante semanas o meses. Sin embargo el conocimiento del comportamiento hidrogeológico en muchos lugares es muy pequeño y se carece de datos, salvo los aforos en alguna estación fluvial ocasional. Combinando una función de recarga obtenida por métodos de balance con una modelación numérica es posible encontrar una distribución de parámetros hidráulicos que explique los caudales observados. Aquí se expone lo que se ha realizado en un área concreta para caracterizarlo. Es un trabajo que aún está en curso.

El caso de estudio

En las proximidades del municipio de Aznalcóllar, provincia de Sevilla (España), se han efectuado excavaciones mineras que han venido explotando los minerales que se encuentran en la Faja Pirítica Ibérica (vease Gómez de las Heras *et al.*, 2001). La fase más reciente de la explotación comenzó con la excavación de una mina a cielo abierto denominada Corta Aznalcóllar, que terminó de excavarse en 1996. Casi

simultáneamente comenzó la excavación de una segunda corta denominada Corta de Los Frailes (ver la situación en las figuras 1 y 2).

La excavación de la Corta minera de Aznalcóllar había producido un hueco con planta ovalada, de unos 1400 m de eje mayor, 700 m de eje menor y una profundidad del orden de 250 m, con un volumen de aproximadamente 70 hm³. En el plan de restauración de la mina se contemplaba su relleno posterior con los estériles procedentes de la excavación de la Corta de Los Frailes, situada en las proximidades. El 24 de abril de 1998 se produjo un deslizamiento de una parte del dique lateral de contención de la gran balsa que se empleaba para la decantación y almacenamiento de los lodos de estériles procedentes de las labores mineras, situada aguas abajo de las cortas. Como consecuencia de la rotura, se produjo un vertido de unos 6 hm³ de aguas ácidas y lodos con elevadas concentraciones de metales pesados que se extendieron y depositaron aguas abajo siguiendo el trazado del río Guadiamar. Esto dio lugar a la paralización de la explotación minera y que la Corta de Los Frailes quedara inactiva.

La Corta de Aznalcóllar ofrecía hueco suficiente para el almacenamiento de la totalidad de las tierras y lodos procedentes de las labores de limpieza de los terrenos afectados, además de encontrarse en las proximidades. De la decisión de emplear la Corta de Aznalcóllar como depósito para dichos materiales, con elevadas concentraciones en contaminantes, principalmente metales pesados, surgió la necesidad

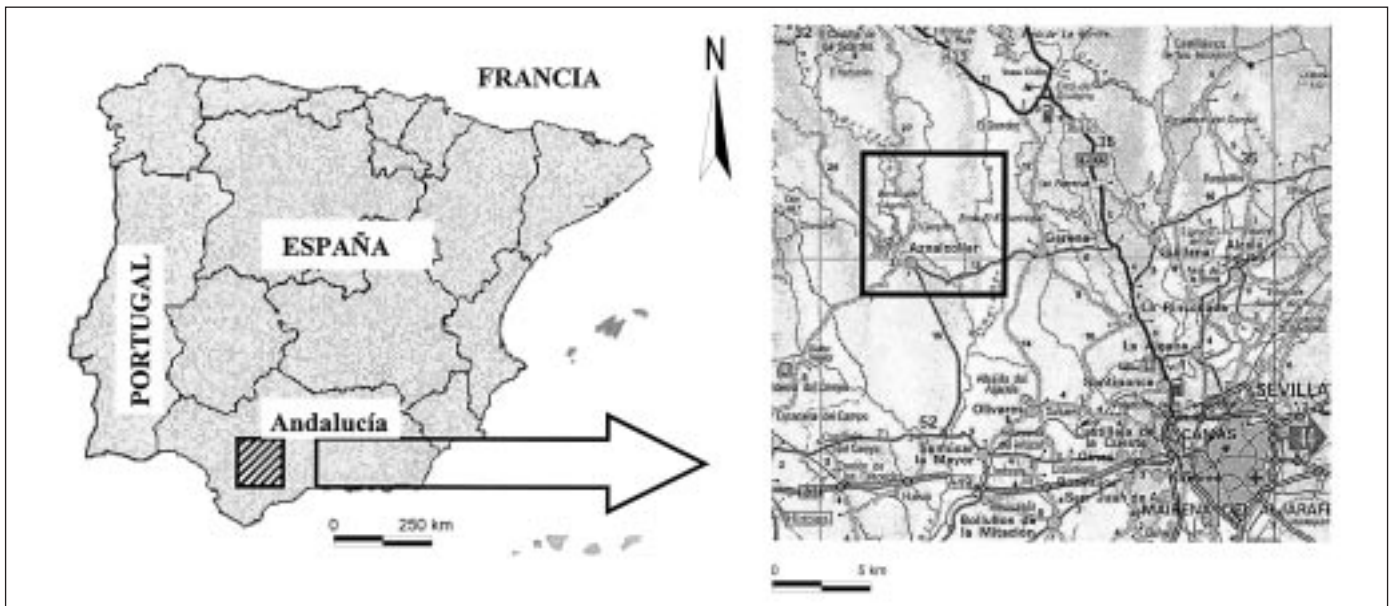


Fig 1. Localización del área de estudio
Fig 1. Localization of the study area

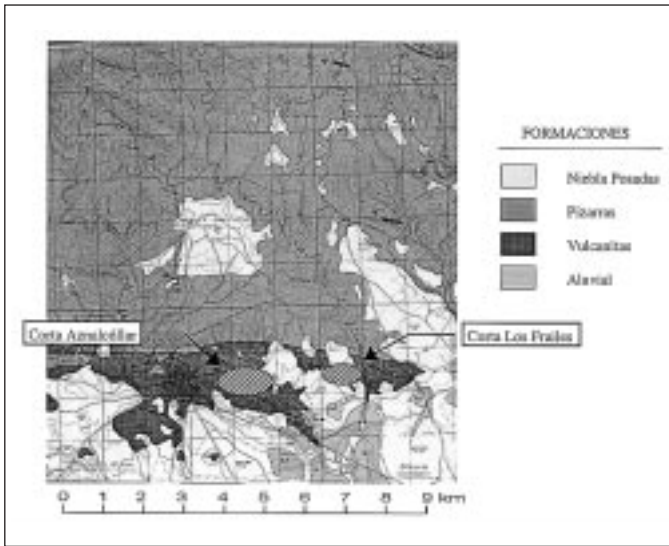


Fig 2. Mapa geológico del área de estudio (según cartografía MAGNA del IGME)

Fig 2. Geologic map of the study area (after the MAGNA mapping of IGME)

de evaluar las posibles consecuencias ambientales, dado que las excavaciones de ambas cortas descenden bastante por debajo del nivel freático y reciben agua subterránea de los materiales encajantes, aún siendo estos de baja permeabilidad.

Uno de los trabajos que se emprendieron para estudiar las posibles consecuencias sobre el entorno fue la elaboración de un modelo de flujo subterráneo (ver Gómez de las Heras, *et al.*, 2001). Desgraciadamente, no se disponía de información hidrogeológica en cantidad y calidad suficiente, por lo que las incertidumbres sobre los flujos estimados por el modelo son muy importantes, en especial en áreas alejadas de las cortas. Con el objetivo de reducir dicha incertidumbre se han incorporado al modelo, además de las medidas de conductividad hidráulica y niveles piezométricos de sondeos y pozos, otros tipos de datos, como niveles deducidos de manantiales naturales, caudales bombeados y niveles durante la explotación de ambas cortas, etc. (ver Aliaga *et al.*, 2001). La carencia de información es más acusada en las pizarras paleozoicas situadas inmediatamente al norte de las cortas (ver figuras 2 y 3), de las que sólo se dispone de datos de niveles en unos pocos sondeos localizados fundamentalmente al norte de la corta de los Frailes y próximos a la misma, y de los niveles que se pueden deducir de algunos manantiales. Presumiblemente, las pizarras deberían tener una conductividad hidráulica pequeña de acuerdo con la escasa y poco cuantificada experiencia en este tipo de formaciones, aunque es conocido que existe una

zona superior alterada, de características y espesor variable de unos casos a otros, que puede ser notablemente más permeable que el conjunto y con un apreciable coeficiente de almacenamiento.

Para tratar de indagar en las propiedades hidrogeológicas de las pizarras se ha analizado el caudal base de las estaciones de aforo en zonas próximas al área de estudio y que tuvieran su cuenca fundamentalmente en pizarras. La que mejor se adapta de las existentes es la estación de aforo de Gerena, en el río Guadiamar. Esta cuenca está situada inmediatamente al este de la zona estudiada y tiene unas características geológicas, morfológicas y climáticas muy parecidas a las del norte del área de estudio aquí considerada. Se trata de una cuenca también pequeña, aunque de dimensiones algo mayores a la del río Los Frailes. El proceso que se ha seguido en el análisis (esquematisado en la figura 4) es el siguiente:

- 1) Generación de un modelo lluvia-escorrentía-recarga a partir de los datos medidos en estaciones meteorológicas de la zona y de los caudales medidos en la estación de aforos de Gerena, en el río Guadiamar. Como resultado de este modelo se obtiene un valor de la recarga media diaria al acuífero.

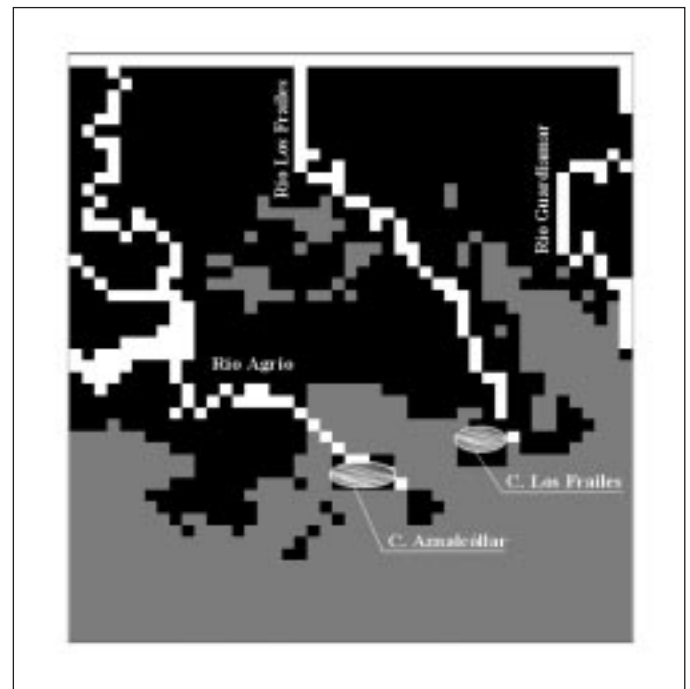


Fig 3. Vista en planta de la capa superior del modelo. En blanco, los ríos; en gris, la formación Niebla-Posadas (en parte confinada); y en negro los materiales paleozoicos

Fig 3. Lay-out of the upper layer of the model: rivers in white, the Niebla-Posadas formation in grey (partially confined) and the Palaeozoic formations in black

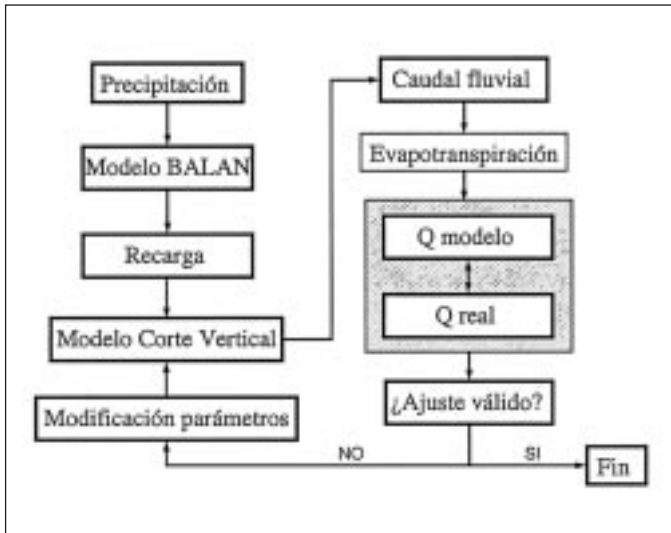


Fig. 4. Diagrama de flujo
Fig. 4. Flow chart

- 2) Partiendo de los caudales recargados obtenidos en el punto 1 y considerando las peculiaridades de la cuenca, realización de un modelo de flujo subterráneo en 2D en una sección vertical del terreno perpendicular al cauce fluvial (en adelante modelo "Corte Vertical"), que se supone que es representativa de lo que sucede a lo largo del mismo. Como resultado de este modelo se obtienen los caudales diarios drenados al río por el acuífero, en el supuesto de que todo el flujo esté contenido en ese plano.
- 3) Separación del hidrograma de Gerena en aporte superficial y aporte subterráneo, y comparación del aporte subterráneo medido en la estación de aforos con el obtenido del modelo de flujo.
- 4) Variación de los parámetros del modelo Corte Vertical para conseguir un adecuado ajuste entre el hidrograma calculado en el punto 2 y el obtenido en el punto 3 mediante un proceso de calibración manual.
- 5) Traslado de los resultados a un modelo de flujo en 3D para un calibrado final (en realización).

Características del área de estudio

El área de estudio se sitúa en la provincia de Sevilla, en las proximidades de Aznalcóllar, entre este núcleo de población y el de Gerena. En ella hay dos dominios, uno elevado que corresponde a los afloramientos rocosos de Sierra Morena y otro más bajo que corresponde a la Depresión del Guadalquivir, que es una fosa tectónica terciaria rellena de sedimentos

poco consolidados. El tránsito entre los dos dominios, orientados E-O, es un escarpe en el que se encajan los cauces fluviales y torrentes. Se trata de pequeñas cuencas que se unen en la depresión. La zona minera está próxima al escarpe y en su entorno ha transformado la morfología e hidrografía originales, en especial en los últimos 30 años.

Geológicamente, se presentan tres conjuntos de materiales distintos (ver Gómez de las Heras *et al.*, 2001):

- 1) Pizarras paleozoicas que ocupan la mitad septentrional del área de estudio (se localizan en las zonas en negro en la figura 3). Tienen una baja conductividad hidráulica. Son las formaciones cuyo comportamiento se analiza en este trabajo.
- 2) Vulcanitas y mineralizaciones asociadas a éstas. Tienen una permeabilidad mayor. Son las formaciones más oscuras de la figura 2.
- 3) Sedimentos miocenos, prácticamente sin deformación, que se extienden por la mitad meridional, recubriendo discordantemente los materiales paleozoicos (zonas en gris en la figura 3). Se han distinguido dos formaciones, conocidas como Niebla-Posadas y Margas Azules. La formación Niebla-Posadas, que se dispone discordante directamente encima de las pizarras paleozoicas, tiene una permeabilidad sensiblemente mayor que los materiales paleozoicos y define un nivel acuífero poco potente, pero regional, que actualmente está siendo aprovechado para abastecimiento y riego. En la parte sur del área de estudio la formación Niebla-Posadas se encuentra cubierta por la formación de las Margas Azules, muy poco permeables. Al norte de las cortas también aparecen retazos dejados por la erosión de la formación Niebla-Posadas.
- 4) Depósitos cuaternarios de carácter aluvial.

Existen datos de cinco estaciones meteorológicas situadas en la zona, aunque ninguna de las series está completa. En la figura 5 se representa la distribución anual de la lluvia mediante medias de las medias mensuales de las cinco estaciones. Se observa claramente una marcada estacionalidad en la distribución temporal de las lluvias, típica de climas mediterráneos, con precipitaciones más abundantes durante el otoño e invierno, y muy escasas durante el periodo estival.

En la figura 6 está representada la variabilidad anual de las precipitaciones registradas en la zona. Hay años muy secos, en los que apenas se superan los 200 mm, mientras que en los años más húmedos se superan los 1000 mm. Esto representa precipitaciones 5 veces superiores en los años más húmedos con respecto a los años más secos. Como se verá

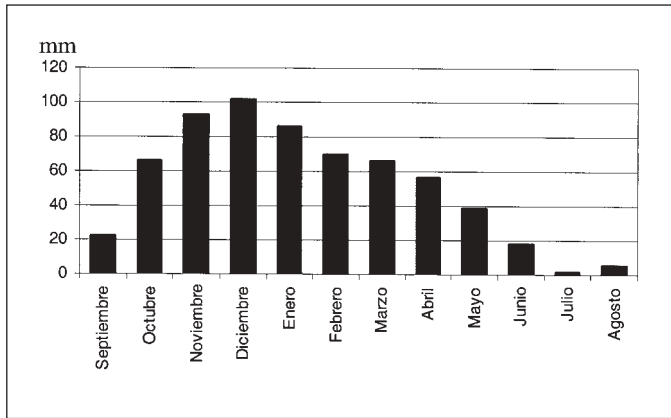


Fig. 5. Distribución anual de la lluvia media mensual (1943-1996)
 Fig. 5. Annual distribution of mean monthly rainfall (1943-1996)

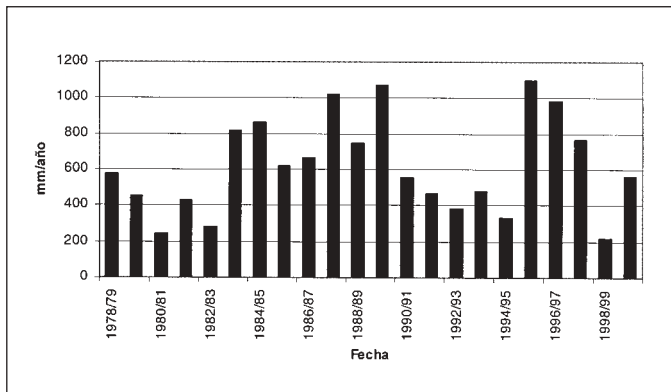


Fig. 6. Distribución temporal de la precipitación media anual en el área de Aznalcóllar
 Fig. 6. Evolution of yearly mean precipitation in the area of Aznalcóllar

más adelante, esta variabilidad, tanto anual como estacional, tiene un marcado efecto sobre la cuantía de la recarga a la zona saturada y su distribución temporal.

El clima de la región es subtropical mediterráneo, con valores máximos de la temperatura de 40°C en julio y agosto, y mínimas próximas a 10°C en diciembre y enero. La temperatura media anual estimada para la zona minera es de 17,8°C.

Mientras que la precipitación media entre junio y septiembre es inferior a 20 mm, la temperatura es superior a 20°C. Es por ello que los cauces que salen de la zona de estudio suelen quedarse secos durante el período estival, cuando la posible aportación subterránea es interceptada y transpirada por la vegetación próxima al cauce.

Dentro del área de estudio se pueden definir tres subcuencas fluviales: la del río Agrío (o Crispinejo), la del río Los Frailes y la alta del río Guadiamar, con los

cauces orientados de N a S. La confluencia entre los dos primeros ríos tiene lugar dentro del área estudiada, en las proximidades de las instalaciones mineras. Unos 4 km aguas abajo de esta confluencia se produce la unión con el río Guadiamar, que es el curso principal y que tributa a las marismas del Guadalquivir, en el área de Doñana.

En la década de 1970 se construyó en el río Agrío, aguas arriba de la zona minera, un embalse de aproximadamente 50 hm³ de capacidad para disponer de agua para las necesidades mineras. Aguas abajo existe otro menor que actúa como azud del que se deriva el canal construido con el objetivo de desviar el cauce del río Agrío a su paso por la corta de Aznalcóllar.

Apenas hay manifestaciones de agua subterránea en el dominio de las pizarras salvo las propias cortas y obras mineras. La mayoría de sondeos piezométricos están en el entorno minero. Sin embargo, los cauces fluviales reciben aportes subterráneos a lo largo de los mismos y en especial en las partes más encajadas.

En la situación actual, el río Los Frailes es perdido en el entorno de la corta de Los Frailes debido al fuerte descenso de niveles freáticos producida por las extracciones de agua de la explotación minera. Para obtener algunos datos adicionales, el IGME ha perforado sondeos dobles (uno corto y otro profundo) en dos emplazamientos en las pizarras, al norte de las cortas, para conocer los materiales y los niveles piezométricos y su variabilidad.

Modelo matemático general

Para integrar el efecto de las cortas mineras y de su gestión futura en el contexto hidrogeológico general se ha previsto realizar un modelo 3D que sea capaz de simular la información disponible en las proximidades de las cortas. Se ha seleccionado un área que incluye a las cortas de Aznalcóllar y de Los Frailes, de 9 km en sentido E-O y 10 km en sentido N-S, en el que buena parte se trata de pizarras de características prácticamente desconocidas. Para poder analizar las componentes verticales de flujo se considera una profundidad en el entorno de 1000 m.

En las proximidades de las cortas se observan variaciones importantes de los niveles piezométricos asociados a la precipitación y a la gestión del agua de las cortas mineras.

Para adquirir conocimientos adicionales antes de operar un modelo 3-D, que es muy consumidor de tiempo y esfuerzo, se ha ido a analizar la cabecera de la cuenca del Guadiamar, colindante al área de estudio y con flora, geología, morfología y clima práctica-

mente análogos a la del río Los Frailes aguas arriba de las cortas. En esta cuenca existe una estación de aforos a la salida de Sierra Morena, localizada en la parte más baja de los afloramientos de las pizarras, denominada estación de aforos de Gerena.

En algunos años lluviosos los hidrogramas de la estación manifiestan una permanencia de caudales importantes, de incluso varios cientos de litros por segundo durante varias semanas en las que las lluvias son pequeñas o inexistentes. Los gráficos del logaritmo de caudal en función del tiempo se pueden adaptar a rectas, pero no tienen el aspecto de las rectas de regresión exponencial decreciente clásicas, y no aparece claro cómo aplicar el método propuesto por Rorabaugh (Rutledge, 1993). Esto indujo a utilizar el método desarrollado en el Instituto de Hidrología del Reino Unido (Institute of Hydrology, 1980a y 1980b), que se realiza en una serie de pasos:

- se divide el año en segmentos de 5 días
- se marca el valor mínimo de cada grupo como punto potencial de flujo base
- cada uno de los valores escogidos se compara con el menor valor de los segmentos anterior y posterior
- si la diferencia de los logaritmos de los valores es mayor de 0,1 se retiene el primero de los tres datos. En caso contrario se avanza un segmento y se repite la operación.

Este método es fácilmente automatizable, por lo que se escribió un pequeño programa en FORTRAN, que se ha empleado para obtener una estimación de las componentes superficial y subterránea del caudal total. En la figura 7 se puede ver la separación efectuada para un año especialmente seco, correspondiente al año hidrológico 1994/1995, mientras que la figura 8 muestra la separación efectuada sobre un año especialmente lluvioso, correspondiente a 1996/1997. En ambas figuras se ha empleado una escala logarítmica para facilitar la visualización.

La figura 9 muestra la separación del hidrograma realizada para el año hidrológico 1995/1996. Además se han superpuesto en forma de barras verticales las precipitaciones registradas. Se puede apreciar como después de unas lluvias importantes, que producen recarga al acuífero, se mantienen caudales de algunos centenares de litros por segundo durante varias semanas. La cuenca recogida por la estación de Gerena tiene sólo 240 km² de superficie, por lo que la permanencia de caudales elevados durante tanto tiempo implica necesariamente la existencia de una recarga importante al terreno.

Prácticamente en la totalidad de los años de los que se dispone de datos el río se ha secado durante el período estival. Por lo tanto se puede estimar razo-

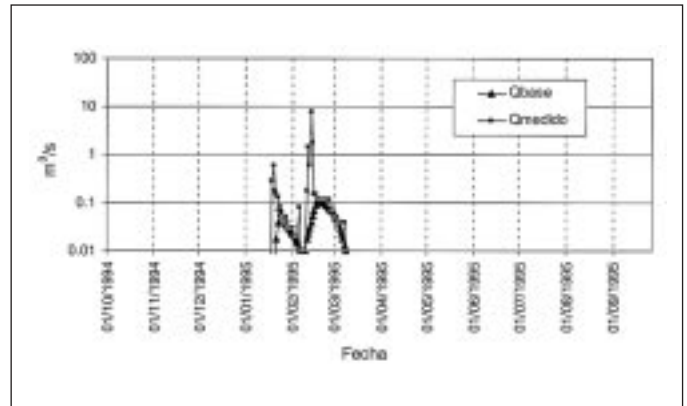


Fig. 7. Separación del hidrograma para un año seco en la estación de Gerena (año 1994/95)
 Fig. 7. Hydrograph separation in a dry year, in the Gerena gauging station (year 1994/95)

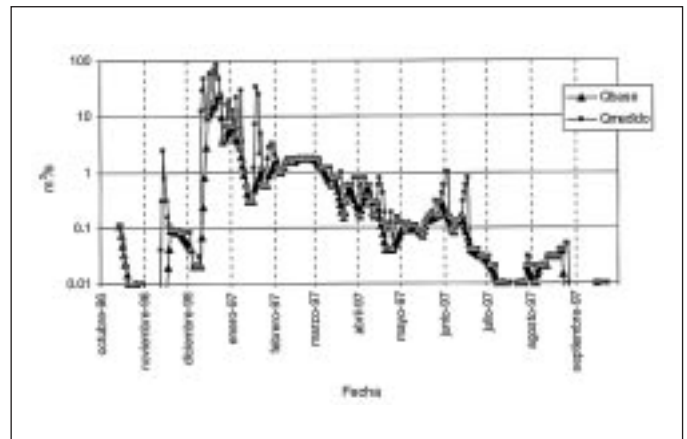


Fig. 8. Separación del hidrograma para un año húmedo, en la estación de Gerena (año 1996/97)
 Fig. 8. Hydrograph separation for a wet year, in the Gerena gauging station (year 1996/97)

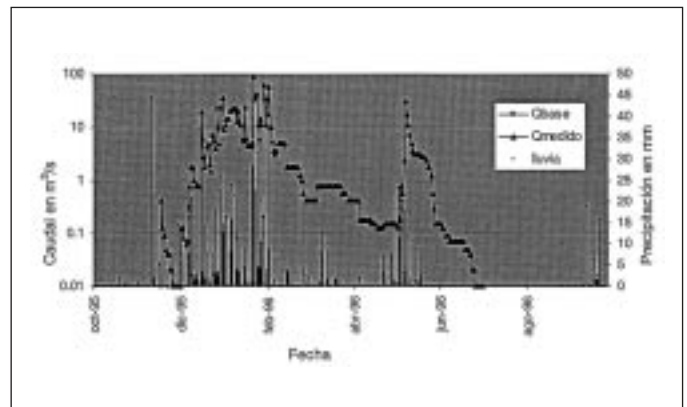


Fig. 9. Separación del hidrograma en la estación de Gerena y precipitación diaria (año 1995/96)
 Fig. 9. Baseflow separation in the Gerena gauging station and daily rainfall (year 1995/96)

nablemente que la recarga de un año se descarga durante el mismo año, salvo por el pequeño volumen diferencial que queda almacenado en el acuífero. No llega a producir caudales apreciables en el río al ser sustraído por la evapotranspiración freática debida a aquella vegetación permanente asociada a los cauces, tal que puede tener acceso al nivel freático y tomar el agua antes de que alcance el lecho.

La recarga de un año hidrológico corresponde en este caso razonablemente bien a la integral de la curva de caudal base. Es fácil comprobar que los años menos lluviosos la recarga que se produce es sensiblemente menor que en los años más húmedos.

En la tabla 1 se muestra la separación realizada para los años de los que se dispone de series completas de datos. Las recargas estimadas por este método en los años húmedos son bastante elevadas, superiores a las esperables en formaciones de este tipo. También se han descrito recargas anuales elevadas (superiores a 300 mm en un año) en este caso en formaciones graníticas poco permeables en una zona húmeda como la del Mirror Lake, New Hampshire, USA (Mau y Winter, 1997).

En la figura 10 se muestra un diagrama de dispersión de precipitación-recarga al que se ha ajustado una recta de regresión potencial. Al disponer sólo de siete datos el resultado ha de tomarse como meramente orientativo, pero aporta una idea del crecimiento de la recarga con la lluvia anual.

Simulación de los hidrogramas de Gerena

Los datos de temperatura y precipitación disponibles se han integrado para obtener una precipitación diaria y una temperatura media diaria en la cuenca, las que a su vez se han empleado junto con los caudales diarios medidos en la estación de Gerena para la

Año	Aporte subterráneo (hm ³)	Recarga (mm)	Lluvia (mm)
1986/87	4,4	18	663
1988/89	2,7	11	749
1993/94	3,1	13	477
1994/95	0,2	1	335
1995/96	40,8	170	1098
1996/97	29	121	984
1997/98	33,3	139	768

Tabla 1. Recarga estimada y precipitación para la estación de aforos de Gerena (240 km²)

Table 1. Estimated recharge and precipitation for the Gerena gauging station (240 km²)

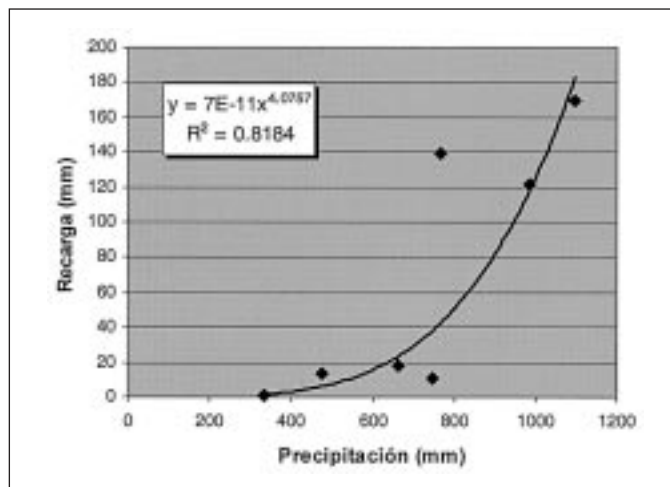


Fig 10. Ajuste realizado mediante regresión potencial entre los valores de precipitación anual medida y recarga anual estimada, con indicación de la ecuación y coeficiente de regresión obtenidos Fig. 10. Potential regression line, equation and correlation coefficient showing the recharge-precipitation relation

construcción de un modelo lluvia-escorrentía de la cuenca. Se ha empleado el modelo VISUAL-BALAN (Samper et al., 1999). Este modelo realiza balances de agua en el suelo considerando la precipitación, evapotranspiración potencial, escorrentía y retención del suelo, obteniendo tras un proceso de calibración automática los caudales diarios que salen de la cuenca por escorrentía, la evapotranspiración y la recarga diaria al acuífero subyacente.

El ajuste del modelo BALAN a los caudales aforados se realizó de forma automática, empleando el método de minimización de Powell descrito en la página 45 del manual. El código minimiza la diferencia cuadrática entre el valor del caudal medido y el valor del caudal simulado. Ello hace que los valores elevados de caudal, provenientes principalmente de escorrentía superficial, tengan un peso específico mayor en la función objetivo. Se ha corregido esta tendencia modificando el código para que considere las diferencias en valor absoluto, dando así una importancia mayor a los caudales más pequeños.

La salida del modelo lluvia-escorrentía se utiliza como entrada al modelo de flujo que se comenta en el apartado próximo. Se trata de un corte vertical del terreno, en adelante designado como "Corte Vertical", con el que se realiza una calibración de los parámetros que gobiernan el flujo, para poder aplicarlos al modelo de flujo general.

El modelo Corte Vertical se basa en que la mayor parte de la recarga fluye a poca profundidad hacia el río, y por lo tanto la mayoría del flujo está contenido en un plano vertical perpendicular al cauce. Esto

puede ser una primera aproximación, a veces un tanto grosera, pero simplifica mucho el tratamiento, que será luego perfeccionado en el modelo 3-D. Con dicho modelo se pretende:

- corroborar el modelo conceptual de flujo hacia los ríos estimando la importancia relativa del flujo subhorizontal,
- caracterizar en lo posible los parámetros hidrogeológicos del acuífero, y
- estimar la distribución de las alturas piezométricas en función de la profundidad y distancia al río.

Se emplea un modelo simple de flujo en dos dimensiones que comprende un corte vertical del terreno en una zona situada 2 km al norte de la Corta Los Frailes. Se estudia una franja de la cuenca que se considera representativa de la misma, perpendicular al río, que la cruza por su parte central, y con una longitud de 2050 m. El modelo se prolonga hasta una profundidad de 1000 m, y se compone de 8 capas y un total de 328 celdas de 50 m x 50 m en planta y espesor variable (ver figura 11).

Las condiciones de contorno son de límite impermeable en todas las caras del modelo menos en la superior en la que se establecen caudales prescritos variables en el tiempo, correspondientes a los valores de recarga obtenidos con el modelo lluvia-escorrentía para el año 1995/1996, y que simulan la recarga al acuífero. La celda central de la capa superior es atravesada por el cauce del río y tiene la condición de altura prescrita constante en el tiempo, correspondiente a la altitud del cauce. Para el cálculo se ha empleado el código MODFLOW (Harbaugh *et al.*, 2000).

La entrada de agua al modelo se produce por tanto a través de las celdas de la capa superior y la salida se produce por la celda central de esa misma capa,

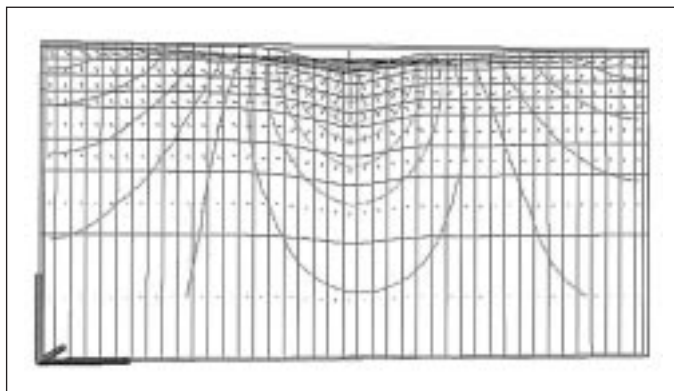


Fig. 11. Alzado del modelo Corte Vertical, incluyendo las líneas equipotenciales y los vectores de velocidad
 Fig. 11. Front view of the vertical model including isopotentials and flow vectors

hacia la que convergen los vectores de flujo (figura 11). Se puede estimar cuál sería el caudal drenado al río por la totalidad de la cuenca multiplicando el caudal de salida del modelo por la superficie de la cuenca y dividiendo por la superficie del modelo. Si se representan estos caudales en función del tiempo se crea el hidrograma "estimado" por el modelo.

Dicho hidrograma "estimado" por el modelo se compara con la componente subterránea del hidrograma generado con los datos medidos en la estación de Gerena. Dado que el tiempo de permanencia del agua en el acuífero depende de la conductividad hidráulica y del coeficiente de almacenamiento, se puede variar la forma del hidrograma generado por el modelo simplemente variando estos parámetros. Para evitar parametrizar en exceso el modelo se ha optado por emplear un mismo valor de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento para todas las celdas de la capa superior del modelo, mientras que el resto de las capas (capa 2 a la 8) tienen también el mismo valor de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento. Por tanto se dispone de 4 parámetros para tratar de ajustar la respuesta de este modelo a lo observado (medido).

Comparando las figuras 12 y 13 se puede ver el efecto de aumentar la conductividad hidráulica en las celdas del modelo. En ambas figuras se muestra el hidrograma "simulado" por el modelo. En el segundo caso la conductividad hidráulica es dos órdenes de magnitud superior. Los caudales descargados por el modelo en los primeros días de la simulación en el primer caso son del orden de 0,6 L/s, mientras que en el caso de conductividad hidráulica elevada los caudales son aproximadamente un orden de magnitud superiores (unos 6 L/s). En este caso se produce un vaciado rápido del acuífero, mientras que con menor conductividad hidráulica los tiempos de permanencia del agua en la zona saturada son mucho mayores.

Tras un proceso de calibración manual en el que se han realizado multitud de simulaciones y se ha variado la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento de las celdas se han obtenido caudales punta comparables a los recogidos en la estación de Gerena, que decrecen lentamente durante semanas. Para ello ha sido necesario incrementar sensiblemente la conductividad hidráulica de la capa superior del modelo. Los parámetros obtenidos pasan a ser ahora el punto de partida del modelo 3-D, que está en curso. En la tabla 2 se recoge el orden de magnitud de los valores calibrados.

Para realizar una estimación más precisa del caudal que llegaría hasta la estación de aforos es necesario considerar la evapotranspiración freática. Este concepto hace referencia a la suma de la evaporación

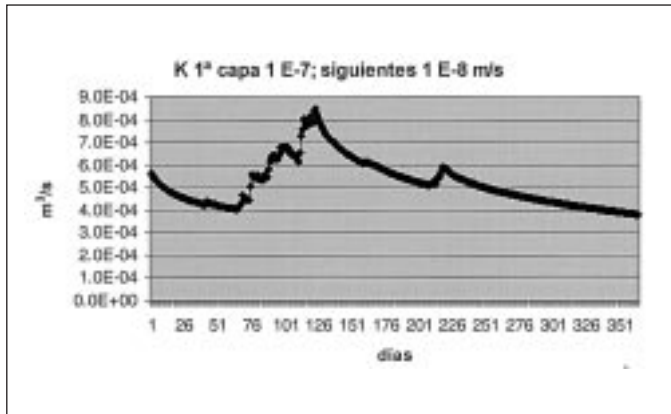


Fig. 12. Hidrograma generado por el modelo para un año hidrológico empleando conductividades hidráulicas bajas
 Fig. 12. Annual hydrograph obtained with the model using low hydraulic conductivity values

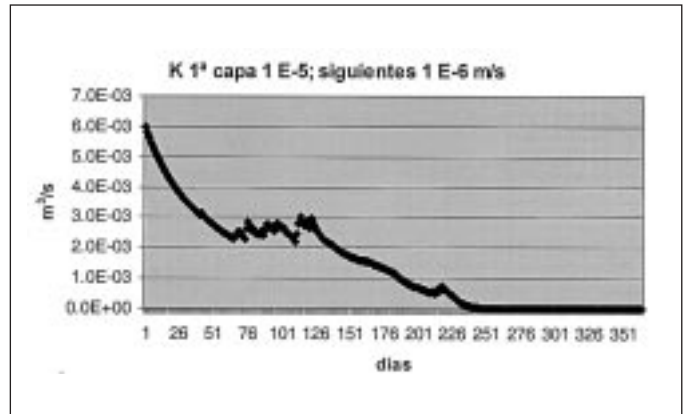


Fig. 13. Hidrograma generado por el modelo para un año hidrológico empleando conductividades hidráulicas altas
 Fig. 13. Annual hydrograph obtained using high hydraulic conductivity values

directamente desde el nivel freático más la transpiración producida por las plantas cuyas raíces alcanzan el nivel freático, tomando agua para sus funciones vitales directamente desde el mismo o desde la franja capilar cuando dicho nivel freático está próximo a la superficie. La transpiración de las plantas ocasiona un descenso del nivel freático como si se produjera un bombeo espacialmente distribuido, y reduce el flujo del acuífero al río. Este efecto puede afectar a los cauces pequeños más que a los grandes porque es mayor la relación entre el volumen evapotranspirado y el caudal circulante (Winter et al., 1998).

En el área de estudio la evapotranspiración freática cobra gran importancia en los cauces y sus márgenes durante la estación estival, cuando los aportes desde el acuífero son escasos y las temperaturas elevadas. Con drenajes del orden de unos pocos litros por segundo, la vegetación de ribera es capaz de consumir toda el agua y ésta no llega a fluir por el cauce. Se ha considerado este fenómeno como un factor que retrasa parte del caudal obtenido como resultado del modelo. La disminución de caudal tiene escasa importancia relativa durante el invierno, época que combina una notablemente menor evapotranspiración

potencial y lluvias más abundantes, pero es de gran importancia durante el verano, época que tiene asociada una mayor evapotranspiración potencial y menores lluvias, ocasionando el agotamiento de los caudales del río.

Al reducir el espesor de la capa superficial de celdas someras, aparece el problema de que se produce el secado de las mismas. Tradicionalmente, el tratamiento de las celdas que quedaban secas en MODFLOW era la inactivación de las mismas. Empleando una opción especial, incluida actualmente en el paquete básico de MODFLOW, se pueden rehidratar las celdas que se han secado (ver McDonald et al., 1992), pero se producen problemas de estabilidad numérica al variar bruscamente la conductividad de la celda al pasar de inactiva a activa. En la actualidad se está trabajando dentro de este proyecto en una variación del código de MODFLOW que permita reducir la transmisividad de las celdas de la capa superior conforme disminuya el espesor saturado, pero que impida que la transmisividad llegue a cero. El objetivo es evitar la inactivación de las celdas para poder subsanar los inconvenientes que ello conlleva.

	Capa superficial	Resto de capas
Conductividad hidráulica, m/s [m/día]	2×10^{-6} [~0,2]	1×10^{-8} [~0,001]
Coefficiente de almacenamiento	1×10^{-3}	1×10^{-6}

Tabla 2. Parámetros calibrados del modelo corte vertical
 Table 2. Calibrated parameters using the vertical cross-section model

Conclusiones

En el análisis de los hidrogramas de la estación de Gerena se identifica una recarga importante, superior a 100 mm/año en los años húmedos en las pizarras paleozoicas.

El proceso de calibración, presentado aquí como un método generalizable, lleva a la conclusión de que no es posible reproducir los caudales medidos en la estación de Gerena sin la existencia de una capa

superior notablemente más permeable y con mayor almacenamiento, por la que circula la mayor parte del flujo infiltrado al acuífero.

Es importante el papel de la parte superior del medio saturado en cuanto a recibir y diferir la descarga del agua recargada. Esto puede ser una tónica general de este tipo de formaciones, cuya simulación plantea algunos problemas numéricos que se están abordando.

Agradecimientos

Se agradece en especial la esencial ayuda recibida de D. Carlos Mediavilla, hidrogeólogo de la oficina de proyectos del IGME en Sevilla, para la obtención de datos y de reconocimientos de campo. También se agradece a la Confederación Hidrográfica del Guadiana y en especial a D. Rafael Muñoz Gilabert, el acceso a los aforos de Gerena.

También se agradecen los comentarios recibidos de los profesores J. Samper, de la Universidad de La Coruña y F.J. Elorza, de la Universidad Politécnica de Madrid.

Este trabajo se enmarca en el programa de tesis doctorales del IGME, del que es becario el primero de los autores. El tercer autor agradece al IGME su apoyo durante su período al frente del mismo.

Referencias

Aliaga, R., Sahuquillo, A., Gómez-Hernández, J.J. y Hendricks-Franssen, H.J. 2001. Incorporación de información para la realización de un modelo preliminar de flujo en el entorno de la corta de Aznalcóllar. *Las Caras del Agua Subterránea*. (Ed. Medina, A., Carrera, J. y Vives, L.). IGME. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, no. 1/2001, Madrid: 631-638.

Gómez de las Heras, López Geta, J.A. Mediavilla, C. Sahuquillo, A. y Custodio, E. 2001. Comportamiento hidráulico y modelación hidrogeológica de las formaciones paleozoicas y miocenas de la cuenca del río Guadamar. *Boletín Geológico y Minero*. Madrid. 112 (esp): 257-283.

Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C. y McDonald, M.G. 2000. *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model: User guide to modularization concepts and the ground-water flow process*: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, Washington D. C.: 1-121.

Institute of Hydrology. 1980a. *Low flow studies*. Institute of Hydrology, Research Report 1. Wallingford, Oxon, U.K.

Institute of Hydrology 1980b. *Low flow studies*. Wallingford, Oxon, U.K. Institute of Hydrology, Report no. 3: 12-19.

Mau, D.P. y Winter, T.C. 1997. Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA. *Ground Water*, 35, 2: 291-304.

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., Orr, B.R. y Ackerman, D.J. 1992. *A method of converting no-flow cells to variable-head cells for the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Open-File Report 91-536. Washington D.C.: 1-99.

Rutledge, A.T. 1993. *Computer programs for describing the recession water recharge and discharge from streamflow records*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 93-4121. Washington D.C.: 1-45.

Samper J., Huguet, L., García-Vera, M.A. y Ares, J. 1999. *Manual del usuario del programa VISUAL BALAN V.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrogeológicos y la estimación de la recarga*. Universidad de A Coruña. 1-124.

Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L. y Alley, W.M. 1998. *Ground water and surface water a single resource*. U.S. Geological Survey. Circular 1139. Washington D.C.: 1-79.

Recibido: mayo 2004

Aceptado: julio 2004