

# Aplicación y limitaciones de un modelo 2D de transporte de calor para estimar la recarga del río Guadalfeo al acuífero Motril-Salobreña

*Application and limitations of a 2D heat transport model for estimating Guadalfeo River recharge to Motril-Salobreña aquifer*

Carlos Duque<sup>(1,2)</sup>, María Luisa Calvache<sup>(2)</sup>, Peter Engesgaard<sup>(1)</sup> y Juan Pedro Sánchez-Úbeda<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Department of Geography and Geology, University of Copenhagen, Øster Voldgade 10, DK-1350 Copenhagen, Dinamarca. cad@geo.ku.dk, pe@geo.ku.dk

<sup>(2)</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Av/ Fuentenueva s/n, 18071 Granada, España. calvache@ugr.es, jpgeo3@gmail.com

## ABSTRACT

A 2D heat transport model was applied to determine the interaction between the Motril-Salobreña aquifer and the Guadalfeo River. The river infiltration to the aquifer was estimated from this method. The maximum simulated infiltration was 18 % of the total river discharge at the beginning of the recharge period (March and November), and close to 0 related to the timing of the increase of the water table in the aquifer (April, May). The differences between the model results and the observed temperatures logs in wells located in the vicinity of the river were analyzed looking for the limitations of the heat transport simulation method. The main difficulties matching observations were located at 20-30 meters depth and close to the surface. In these shallow and deeper zones, it would be useful to include perpendicular flow (underflow) to the simulated section for increasing the velocity of the changes and avoid the infiltration overestimation. However, this was not possible with a 2D modeling approach.

**Key-words:** Heat transport model, temperature logs, recharge, river-aquifer interaction.

Geogaceta, 51 (2012), 83-86.  
ISSN:2173-6545

## Introducción

La temperatura del agua subterránea es una propiedad fácil de medir y que puede utilizarse como trazador para determinar las relaciones río-acuífero (Anderson, 2005). La principal ventaja de este método frente a otros es que se trata de un trazador natural y no contaminante (Constantz, 2008), aspecto de gran relevancia en áreas donde existe una intensa actividad humana.

La medida directa de la recarga que produce el río sobre el acuífero o la descarga del acuífero en el río resulta especialmente complicado en Motril-Salobreña ya que, debido a las características sedimento-

lógicas del río y la variabilidad del caudal del río, resulta prácticamente imposible realizar un control continuado. La temperatura del agua constituye en este caso el método indirecto ideal, ya que es de fácil medida y proporciona información valiosa sobre las interacciones entre río y acuífero.

En el sector norte del acuífero Motril-Salobreña se integraron los datos disponibles en un modelo numérico de transporte de calor que permitió cuantificar la recarga que ejerce el río Guadalfeo. Por otra parte se estudiaron las limitaciones encontradas al utilizar esta metodología, especialmente aquellas derivadas de la aplicación de un modelo en dos dimensiones.

## RESUMEN

Un modelo 2D de transporte de calor fue aplicado para determinar la interacción entre el acuífero Motril-Salobreña y el río Guadalfeo. La infiltración del río al acuífero se estimó a partir de este método. La infiltración máxima que se simuló fue un 18 % del caudal del río al inicio de los periodos de recarga (Marzo y Noviembre) y cercano a 0 relacionado con los momentos de nivel piezométrico elevado (Abril y Mayo). Las diferencias entre los resultados del modelo y los perfiles de temperaturas medidas en pozos cercanos al río fueron analizadas para determinar las limitaciones del método de simulación de transporte de calor. Las principales dificultades para ajustarlo a las observaciones se localizaron a 20-30 metros de profundidad y cerca de la superficie topográfica. Tanto en las zonas profundas como en las cercanas a la superficie sería de gran utilidad incluir un flujo perpendicular a la sección simulada para incrementar la velocidad de los cambios y evitar la sobreestimación de la infiltración. Sin embargo esto no fue posible al utilizar un modelo en dos dimensiones.

**Palabras clave:** Modelo de transporte de calor, perfiles de temperatura, recarga, interacción río-acuífero.

Fecha de recepción: 13 de julio de 2011  
Fecha de revisión: 3 de noviembre de 2011  
Fecha de aceptación: 25 de noviembre de 2011

## Metodología

Los datos de temperatura utilizados en la modelación proceden del registro efectuado a diferentes profundidades en el sondeo A (situado a pocos metros de distancia del cauce; Fig. 1) durante el periodo 2001-2007. Además, se dispuso de los datos de caudal del río Guadalfeo procedentes de la Agencia Andaluza del Agua. La relación directa entra los caudales del río y la afección a la temperatura del agua subterránea se puso de manifiesto a partir de estudios previos (Calvache *et al.*, 2004 y 2011; Duque 2009).

Mediante los datos disponibles se cons-

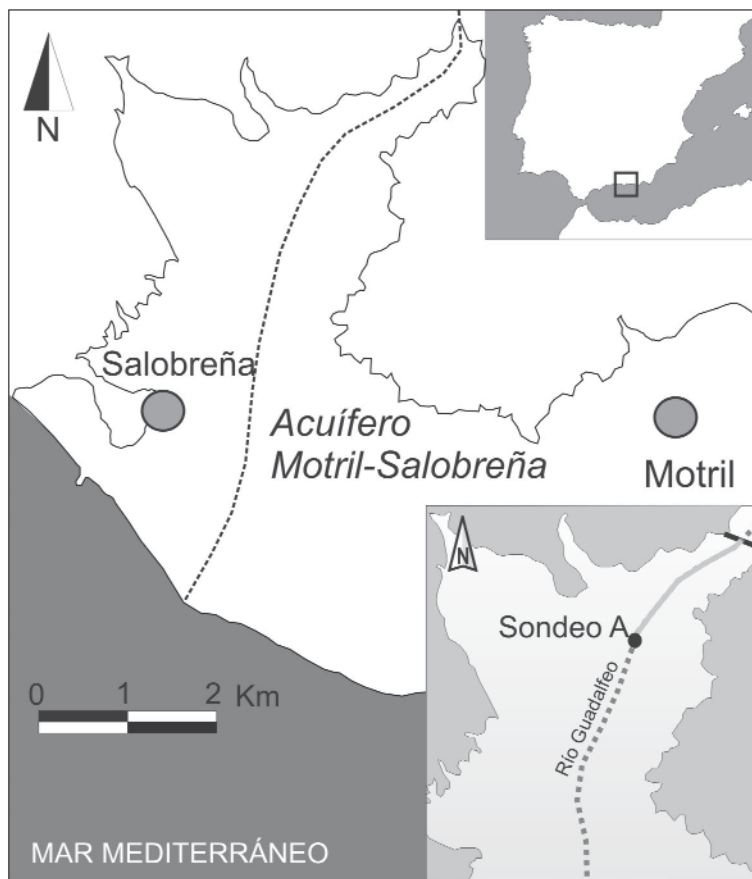


Fig. 1.- Localización y sondeo de control.  
Fig. 1.- Location and monitored borehole.

truyó un modelo en 2D con el software VSDHI (Healy y Ronan, 1996). VSDHI es un modelo de transporte de calor que simula el transporte de energía en un medio poroso bajo diferentes condiciones de saturación que es, precisamente, el caso del río Guadalfeo y el acuífero Motril-Salobreña. El código está basado en la solución conjunta del flujo en la zona no saturada y la ecuación de transporte de calor.

La ecuación de transporte de calor guarda especial similitud con la ecuación de transporte de solutos (Anderson, 2005). Esta cuenta con un término conductivo y un término advectivo. Además de estos procesos, la dispersión termomecánica (Kipp, 1987), la variación en la energía acumulada y las fuentes o sumideros de calor se incluyen en la ecuación.

En el acuífero Motril-Salobreña, la conductividad hidráulica de los materiales acuíferos es relativamente elevada por lo que el mecanismo de transporte dominante será la advección. Además, la advección permite procesos rápidos de transporte por lo que será posible simular situaciones acorto plazo donde el calor asociado a la conduc-

ción tendrá un efecto poco importante. Es de destacar también que las propiedades térmicas del acuífero afectarán poco a los resultados en comparación con el efecto de las elevadas conductividades hidráulicas de sus materiales (Constantz *et al.*, 2003).

El modelo conceptual consiste en un río perdedor de 10 m de anchura desconectado del nivel freático por una zona no saturada de 8 m de espesor (Fig. 2). Para simplificar el modelo, sólo se ha simulado la mitad del río ya que la otra parte sería totalmente simétrica y se considera que produciría exactamente el mismo efecto sobre el acuífero. Las condiciones de contorno consideradas en el modelo son: ausencia de flujo (flujo nulo) en el límite inferior y el límite situado en la mitad del río (divisoria hidráulica), y un límite de nivel constante en el borde opuesto, donde existe la salida del flujo hacia sectores del acuífero más alejados del río.

Los datos iniciales utilizados en el modelo son:

a) Caudal del río Guadalfeo registrado en una estación de aforos situada en el sector septentrional del acuífero. Para la simu-

lación se utilizaron las medias mensuales correspondientes a los periodos en los que el río tuvo caudal.

b) Temperatura del agua del río Guadalfeo registrada de forma continua en una estación de aforos (Azud de Vélez) situada algunos kilómetros aguas arriba del acuífero.

Temperatura del agua subterránea registrada durante los eventos de recarga en los perfiles de temperatura con periodicidad mensual.

c) Temperatura del agua subterránea sin influencia de recarga. Se ha estimado como tal la registrada en meses previos a las crecidas.

d) Propiedades hidráulicas del acuífero estimadas a partir de las columnas litológicas de los sondeos.

e) Propiedades térmicas de los materiales que se obtuvieron a partir de los datos propuestos por Lappala *et al.* (1987), Healy y Ronan (1996) y Stonestrom y Constantz (2003).

## Resultados

Para la modelación se escogieron tres eventos en los que el caudal del río Guadalfeo fue lo suficientemente elevado como para producir una señal térmica en el agua subterránea y que, además se dispusiera de un registro de este parámetro en el sondeo A: las primaveras de 2002 y 2004 y otoño de 2003. En el proceso de calibración del

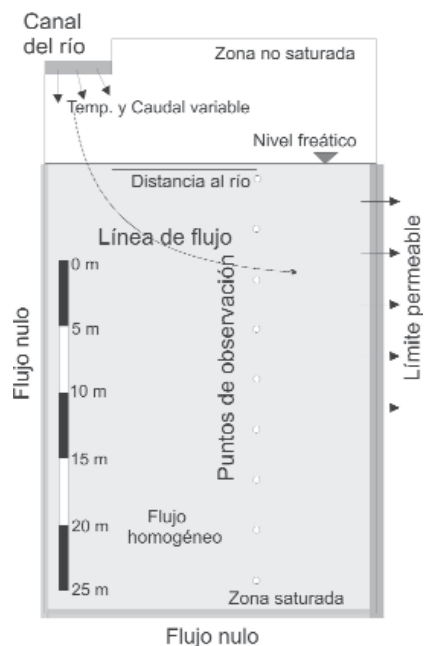


Fig. 2.- Modelo conceptual.  
Fig. 2.- Conceptual model.

modelo se ha ajustado la recarga procedente del río.

En la figura 3A se observa la morfología típica de los perfiles de temperatura y los mejores ajustes que se consiguieron. Las temperaturas en la zona más cercana a la superficie muestran un mayor rango de variabilidad por el efecto de la recarga del río Guadalfeo pero, a partir de una cierta profundidad, tienden a mantenerse más estables. Para estudiar las diferencias en el ajuste entre los datos observados y los calculados mediante el modelo, se proyectaron en un gráfico las diferencias entre temperaturas observadas y temperaturas calculadas con respecto a la profundidad en cada uno de los periodos de estudio (Figuras 3B, 3C, y 3D). El valor 0, por lo tanto, corresponde a un ajuste perfecto entre el modelo y las observaciones. Aunque el ajuste se puede considerar adecuado en la mayoría de las ocasiones, se observan ciertas tendencias como una mayor diferencia a una profundidad entre 20 y 30 m. También en los sectores más próximos a la superficie el ajuste es menos preciso. Además se constata una forma similar para los dos periodos primaverales e invertida con respecto a estas dos para el otoño.

Los porcentajes de infiltración se estimaron a partir de la relación entre el flujo estimado mediante el modelo de transporte de calor y el caudal del río Guadalfeo medido en el punto donde empieza a discurrir sobre la superficie del acuífero Motril-Salobreña. Los resultados obtenidos puntualmente se han extrapolado a todo el tramo comprendido desde el inicio del trayecto del río Guadalfeo sobre el acuífero hasta el sondeo (2300 metros). Se observa cómo al inicio de los periodos de recarga los porcentajes son más elevados para posteriormente disminuir (Tabla I).

Periodo	Q río (l/s)	Infiltración (%)
Marzo 02	3427	14,33
Abril 02	2714	5,34
Mayo 02	3929	6,62
Nov 03	3727	12,42
Dic 03	4010	15,16
Marzo 04	1936	17,92
Abril 04	8102	0,36
Mayo 04	10062	0,28

Tabla I. Caudal del río Guadalfeo y porcentaje de recarga calculado.

Table I. Guadalfeo river discharge and estimated recharge percentage.

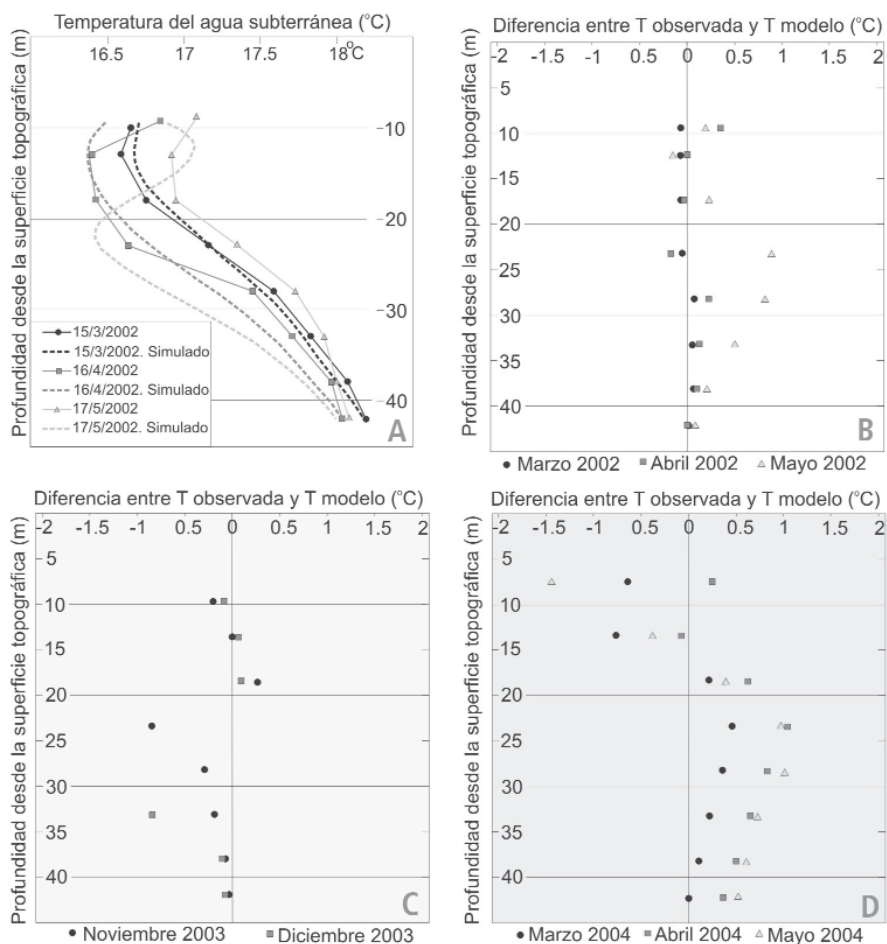


Fig. 3.- Resultados del modelo y comparación con valores observados.

Fig. 3.- Model results and comparison with observed values.

### Discusión

Las diferencias existentes entre los 20 y 30 metros de profundidad para las medidas observadas y calculadas constituyen una de las limitaciones de utilizar un modelo 2D en este caso. Mientras que en las zonas más cercanas a la superficie se simula con mucha facilidad el efecto de la recarga de río con agua de diferente temperatura, hay dificultades para reproducir este efecto a mayor profundidad. La explicación física del proceso que tiene lugar para cambiar la temperatura a esta profundidad es que se trata de agua que se ha infiltrado en tramos anteriores del río Guadalfeo y que ha tenido un tiempo más prolongado para desplazarse hasta una localización más profunda. Es decir, esa señal sería producida por el flujo perpendicular a la sección del modelo producido por el flujo subterráneo transversal asociado al gradiente hidráulico general del acuífero (flujo subterráneo de Norte a Sur).

Precisamente a causa del flujo perpendicular también podría considerarse que en la parte superior del modelo, se halle lige-

ramente sobreestimada la cantidad de agua infiltrada desde el río. Ese mismo flujo perpendicular permitiría que los cambios que se han simulado se produjesen con una menor infiltración procedente del río, ya que la señal térmica registrada es la mezcla de la producida por el río directamente junto con la procedente del agua infiltrada previamente en el río. Es probable por ello que parte de las diferencias observadas próximas a la superficie en el modelo se deban también a esta sobreestimación necesaria para conseguir un mejor ajuste del modelo.

La forma inversa del perfil resultante para el otoño se debe a la variación de una de las condiciones de contorno (diferentes temperaturas del agua del río). Mientras que en primavera el agua procedente del río Guadalfeo presenta temperaturas menores que la del agua subterránea debido a la procedencia del deshielo y a una temperatura ambiental baja (Duque *et al.*, 2010; Calvache *et al.*, 2011), en el inicio del otoño el agua de recarga presenta temperaturas más elevadas, de ahí la inversión de los perfiles de temperatura.

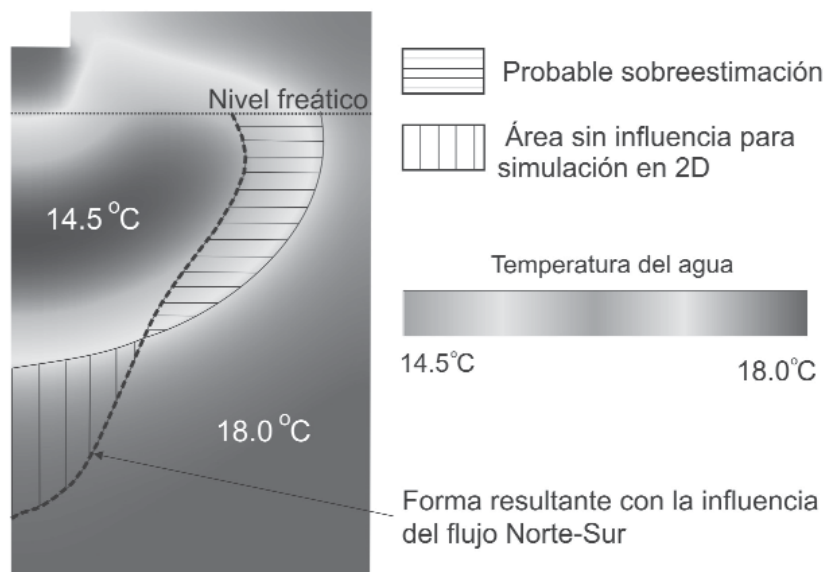


Fig. 4.- Esquema que representa las limitaciones de la simulación en 2D del transporte de calor.

Fig. 4.- Scheme with the limitations of the 2D heat transport simulation.

Los porcentajes de infiltración muestran cierta coherencia con otras metodologías aplicadas para estimar la recarga del río Guadalfeo como modelos numéricos de flujo (Duque, 2009). La tendencia a la disminución a lo largo del periodo de aguas altas que se observa en las dos primaveras consideradas, se debe al ascenso de los niveles a causa de la recarga del río. En el otoño de 2003 se encuentra la tendencia contraria, una infiltración creciente a lo largo del proceso de recarga, que en este caso se debe de nuevo a la limitación de la simulación en 2D. La temperatura del agua de recarga al inicio del otoño es más elevada que la del agua subterránea, sin embargo, en diciembre esta relación se invierte, siendo más baja la temperatura del agua de recarga. Este cambio, fuerza a que el modelo considere una mayor infiltración para conseguir un buen ajuste con los datos de temperatura observados. El agua fría infiltrada en diciembre ha de producir una disminución muy brusca de la temperatura del acuífero recargado con aguas más cálidas en los meses anteriores. El flujo perpendicular ayudaría a producir las variaciones de temperatura de mayor entidad que se producen en estos momentos de cambios bruscos.

Las consecuencias de la aplicación del modelo en 2D se resumen en la figura 4. Se observa cómo la traza de los perfiles de

temperatura muestra un efecto superficial dominado por la influencia directa de la infiltración de agua del río que al simularlo sin tener en cuenta el flujo perpendicular podría estar sobreestimado. Por otra parte y a partir de una cierta profundidad se detecta un sector donde la simulación 2D no consigue reproducir el efecto producido por el movimiento del agua previamente infiltrada desde el cauce del río Guadalfeo y transportada en dirección perpendicular a la sección que se simula.

## Conclusiones

La aplicación de un modelo de transporte de calor ha permitido hacer estimaciones de la infiltración que se produce en el cauce del río Guadalfeo (sector norte del acuífero Motril-Salobreña). Los valores oscilan desde un 18 % del caudal del río al inicio de los periodos de aguas altas hasta hacerse imperceptible cuando el nivel freático intercepta el lecho del cauce.

Las principales desviaciones entre las observaciones y las simulaciones de temperatura del agua subterránea se encuentran a una profundidad comprendida entre los 20 y 30 m y en la zona más superficial. La explicación a estas diferencias se relaciona con las limitaciones de utilizar un modelo 2D.

En los escenarios de cambios bruscos (como al final de otoño, donde el agua de

recarga pasa de tener una temperatura mayor que la del acuífero a menor) el modelo 2D presenta más dificultades para ser ajustado que si los cambios son progresivos y siempre en el mismo sentido.

La aplicación de modelos de transporte de calor representa una opción a tener en cuenta para evaluar las interacciones entre aguas subterráneas y superficiales debido a que presentan frecuentemente importantes contrastes térmicos.

## Agradecimientos

Este estudio se realizó gracias a los fondos del proyecto CGL2008-05016 financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, el grupo de investigación de la Junta de Andalucía RNM-369 y el Programa de Ayudas para Movilidad Postdoctoral del Ministerio de Educación. Los autores agradecen a dos revisores anónimos sus comentarios que ayudaron a mejorar la calidad final de este trabajo.

## Referencias

- Anderson, M.P. (2005). *Groundwater* 43, 951-968.
- Calvache, M.L., Cerón, J.C., Rubio, J.C., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., González-Ramón, A., Ibáñez, S. y Duque, C. (2004). En: *VIII Simposio de Hidrogeología*, Zaragoza, España, 433-442.
- Calvache, M.L., Duque, C., Gómez Fontalva, J.M. y Crespo, F. (2011). *International Journal of Environmental. Science and Technology*, 8, 223-236.
- Constantz J., Cox, M.H. y Su, G.W. (2003). *Groundwater*, 41, 647-656.
- Constantz, J. (2008). *Water Resources Research*, 44. WOOD10.
- Duque, C. (2009). *Influencia antrópica sobre la hidrogeología del acuífero Motril-Salobreña*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 194 p.
- Duque, C., Calvache, M.L. y Engesgaard, P. (2010). *Journal of Hydrology*, 381, 121-133.
- Healy, R.W. y Ronan, A.D. (1996). *U.S Geological Survey Water-Resources Investigations Report* 96-4230, 36 p.
- Kipp, K.L. (1987). *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report* 86-4095, 517 p.
- Lappala, E.G, Healy, R.W. y Weeks, E.P., (1987). *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report* 83-4099, 184 p.
- Stonstrom, D.A. y Constantz, J. (2003). *U.S. Geological Survey Circular*, 1260, 1-96.