

# Aplicación de un modelo lluvia-caudal al acuífero carbonático de la Sierra de las Cabras (Provincia de Cádiz, S de España)

*Application of a rainfall-outflow model to the carbonate aquifer of the Sierra de las Cabras (Cádiz Province, Southern Spain)*

P. Jiménez Gavilán<sup>(1)</sup>, B. Andreo Navarro<sup>(1)</sup>, F. Carrasco Cantos<sup>(1)</sup>, J.J. Durán Valsero<sup>(2)</sup>, J.A. López Geta<sup>(3)</sup> e I. Vadillo Pérez<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Hidrogeología. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n. 29071 Málaga.  
<sup>(2)</sup> Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

## ABSTRACT

*A rainfall-outflow model has been applied for simulating the daily outflows of El Tempul spring (Cadiz, Southern Spain) based on daily precipitation values. The model fits quite good for average climatic conditions; however, for high recharge or very drought periods, the model presents variations that moves away of reality. The application of this model can be useful in water resource management of the carbonate aquifer system of the Sierra de las Cabras, which would result in benefit of water supplying of Cadiz Bay, an area where the demand of water is elevated and, in addition, presents important seasonal variations, with greater demand in summer.*

**Key words:** carbonate aquifer, El Tempul spring, hydrodynamic, model rainfall-outflow.

*Geogaceta*, 31 (2002), 63-66  
 ISSN:0213683X

## Introducción

El acuífero carbonatado de la Sierra de las Cabras está situado en la parte central de la provincia de Cádiz y comprende las sierras del Valle, de Dos Hermanas, de la Sal, de las Cabras y de la Loma del Tempul, nombradas de Oeste a Este (Fig. 1). Todos estos relieves configuran una alineación montañosa de 42 km<sup>2</sup> de extensión, cuya forma en planta es de medialuna con la concavidad abierta hacia el Suroeste. La Sierra es atravesada por dos cauces fluviales: el arroyo de Bogaz, también llamado Boca de Foz, en la parte oriental, y el arroyo de Bujalance en la parte occidental. Los valores medios anuales de precipitación y temperatura en el área de estudio son, respectivamente, 825 mm y 17,3 °C.

La Sierra de las Cabras es un acuífero de gran interés puesto que su principal punto de descarga (manantial de El Tempul) ha constituido, históricamente, la fuente de abastecimiento de agua a Jerez de la Frontera (Cádiz). Un adecuado conocimiento de su funcionamiento hidrogeológico permitiría mejorar la gestión de sus recursos hídricos y redundaría en beneficio del abastecimiento de la Bahía de Cádiz, un área donde la demanda de agua es elevada y, además, presenta

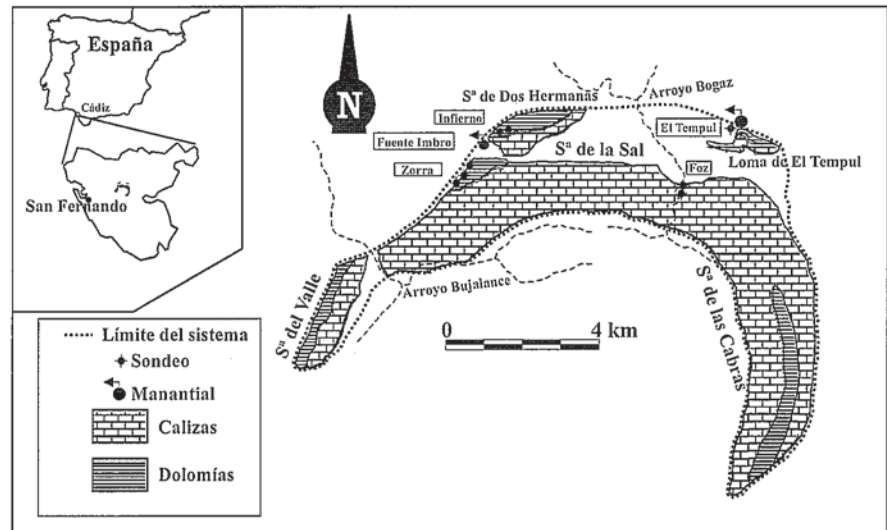


Fig. 1.- Esquema de situación del acuífero de Sierra de las Cabras.

*Fig. 1.- Location of Sierra de las Cabras aquifer.*

importantes variaciones estacionales (mayor demanda en verano que en invierno), de forma análoga a lo que ocurre en otras áreas costeras en las que la actividad turística es uno de los pilares económicos. Los periodos de sequía que tienen lugar en esta región del Sur de España dificultan, aún más si cabe, la gestión de los recursos hídricos disponibles.

La existencia de series de larga duración de datos correspondientes a parámetros climáticos (precipitación y temperatura) y a caudales del manantial de El Tempul, permite modelizar la descarga del acuífero de la Sierra de las Cabras.

Hay gran cantidad de modelos, que bajo el nombre genérico de modelos lluvia-caudal han sido aplicados al dominio

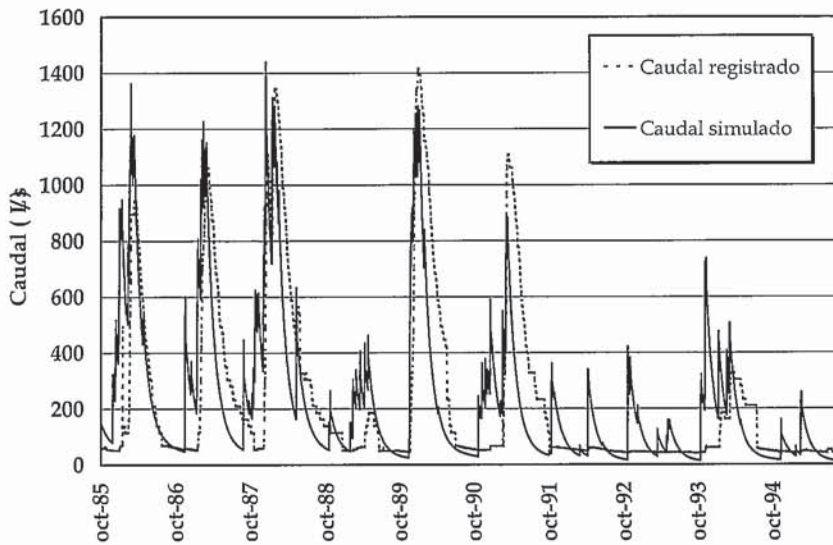


Fig. 2.- Caudales medios diarios calculados y medidos en el manantial de El Tempul.

Fig. 2.- Calculated and measured average daily outflows in El Tempul spring.

kárstico: modelo GIRARD (Girard, 1970), modelo CREC (Cormary y Guilbot, 1971) y modelo BEMER (Bezes, 1976), entre otros. Más reciente, cabe destacar el modelo TRIDEP (Padilla y Pulido Bosch, 1988), aplicado con éxito al sistema kárstico de El Torcal de Antequera.

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de un modelo lluvia-caudal (Témez, 1977; Estrela, 1997) a los datos disponibles, en el que se ha tenido en cuenta los resultados de estudios preliminares (Carreras, 1996; ITGE, 1996; IGME, 2000; Jiménez *et al.*, 2001), para simular el caudal del manantial de El Tempul a partir de las precipitaciones.

**Marco geológico e hidrogeológico. Antecedentes**

Los materiales que constituyen la Sierra de las Cabras pertenecen a la unidad del mismo nombre, dentro del dominio Subbético Medio de la Zona Externa de la Cordillera Bética (Chauve, 1960-62; Martín Algarra, 1987; García de Domingo *et al.*, 1990). La serie estratigráfica de dicha unidad está constituida por tres conjuntos litológicos principales: uno inferior, de edad triásica en facies germano-andaluza (Keuper); uno medio, de 300 metros de espesor y naturaleza calcáreo-dolomítica, de edad fundamentalmente jurásica y otro superior, de carácter magro-calcáreo, de edad cretácico-terciaria.

La estructura geológica del área de estudio está formada por pliegues anticlinales y sinclinales que presentan una forma arqueada en cartografía y que han sido afectados por una tectónica de fractura posterior. En la parte meridional hay una estructura anticlinal que constituye los relieves de Sierra del Valle, Sierra de la Sal y Sierra de las Cabras, en cuyo núcleo afloran principalmente los materiales carbonatados jurásicos (Fig. 1). Hacia el Norte, la estructura está formada por un sinclinal ocupado por materiales cretácicos, bajo los cuales deben encontrarse las calizas y dolomías jurásicas, que afloran inmediatamente al norte (Sierra de Dos Hermanas y Loma de El Tempul).

Las calizas y dolomías del Jurásico constituyen un acuífero cuya alimentación se produce por infiltración directa de las precipitaciones caídas sobre los afloramientos de este tipo de rocas y, eventualmente, por infiltración de parte de la escorrentía que circula por los arroyos de Bujalance y Bogaz, arroyos que se encuentran normalmente secos y con sus cauces colgados del orden de más de 30 metros, sobre la zona saturada del acuífero. En el Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Cádiz (DPC, 1985), se estimaron los recursos medios del sistema en 5,5 hm<sup>3</sup>/año, procedentes exclusivamente de las precipitaciones. En trabajos posteriores (IGME, 2000; Jiménez *et al.*, 2001), se han calculado que los recursos medios del sistema son del orden de los 8-9 hm<sup>3</sup>/año.

La descarga se produce, de modo natural, por el manantial de El Tempul, a la cota 120 m s.n.m., cuyo caudal varía entre unos 20 l/s y menos de 2000 l/s, con un valor medio de 283 l/s. En épocas de recarga excepcional entra en funcionamiento el “trop plein” de Fuente Imbro (Fig. 1), situado en la cabecera del arroyo del Infierno (Sierra de Dos Hermanas) a la cota de 140 m s.n.m.

También se produce descarga, por bombeo, en algunos de los sondeos perforados (Fig. 1) con motivo de la sequía de 1995 (Carreras, 1996; ITGE, 1996).

**Características básicas del modelo utilizado**

El modelo de Témez (1977) forma parte de los denominados “modelos de reservorios”, el cual reproduce los procesos esenciales del transporte de agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico. En este modelo, el sistema acuífero se divide en dos zonas. En una de ellas se almacena el agua como humedad del suelo y en otra se almacenan parte de los excedentes que se producen en la primera. Esta última zona funciona como un embalse subterráneo con desagüe a la red de drenaje. El fundamento del modelo se puede resumir en que la lluvia se almacena en la primera zona descrita en forma de humedad y, en ella, dependiendo del estado de humedad, de la capacidad máxima de almacenamiento y de la evapotranspiración potencial, se origina un excedente. Este excedente consta de dos componentes: uno que discurre en superficie y otro que se infiltra en el acuífero. La primera parte del excedente se evacúa por los cauces dentro del período de tiempo en el que se producen las lluvias, mientras que el resto se almacena en el embalse subterráneo para drenarse en fechas posteriores.

Las variables necesarias para aplicar el modelo son la precipitación y la evapotranspiración potencial. Los parámetros a introducir en el modelo son la capacidad máxima de humedad en el suelo, un coeficiente de excedentes, la capacidad máxima de infiltración y el coeficiente de descarga del agua infiltrada.

Para la modelización en el manantial de El Tempul, se ha utilizado una modificación del modelo Témez (1977) desarrollada por Estrela (1997). Este autor considera la existencia de dos celdas virtuales que recogen el agua infiltrada, cada una de las cuales tiene su descarga propia (la curva de recesión tiene dos tramos: decrecida y agotamiento). En este caso es necesario considerar, además, los coefi-

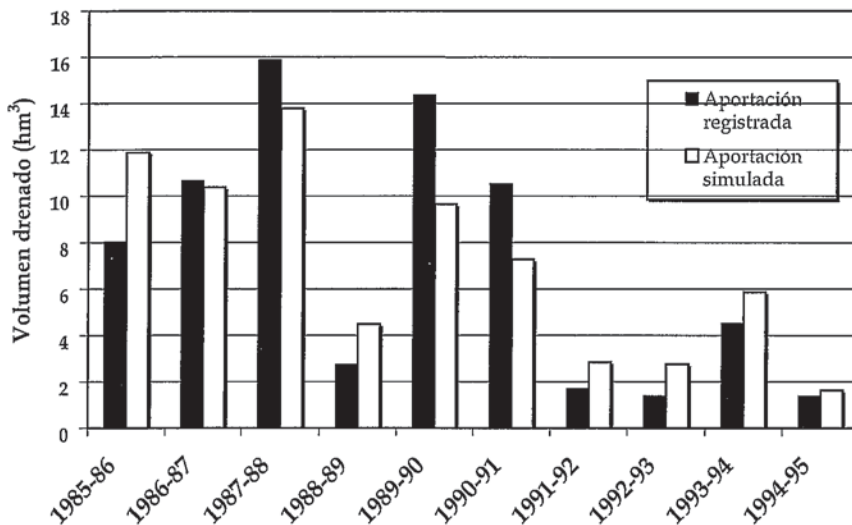


Fig. 3.- Aportaciones calculadas y medidas en el manantial de El Tempul durante el período de simulación.

Fig. 3.- Calculated and measured contributions during the period of simulation in El Tempul spring.

cientos de descarga de ambas celdas, así como el coeficiente de reparto de la infiltración entre las mismas.

El modelo utilizado en este trabajo (Estrela, 1997), a diferencia de otros modelos lluvia-caudal (modelo CREC, Cormary y Guilbot, 1971; modelo BEMER, Bezes, 1976), requiere pocos parámetros de ajuste y resulta de fácil aplicación.

#### Período de simulación y datos utilizados

La simulación se ha realizado para el período comprendido entre Octubre de 1985 y Agosto de 1995, debido a la existencia tanto de datos diarios de precipitación y temperatura, como de caudal en el manantial de El Tempul. El periodo elegido termina en 1995 porque en esa fecha se produjo una intensa explotación del acuífero mediante bombeos, lo cual interfiere en la comparación entre los caudales reales y simulados.

La simulación se ha llevado a cabo a partir de datos diarios y no mensuales, como habitualmente se hace con el modelo de Estrela (1997), para una mayor precisión a la hora de calibrar el modelo.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se ha utilizado el método Thornthwaite, a partir de los datos diarios de temperatura del aire registrados en la estación meteorológica de San Fernando (Cádiz). La precipitación que se ha utilizado corresponde a los datos diarios medidos en la estación meteorológica de El Tempul.

Con respecto a los otros parámetros que necesita el modelo, cabe mencionar los coeficientes de agotamiento (de la decrecida y del agotamiento propiamente dicho), que han sido los calculados previamente a partir del análisis de varias curvas de recesión del manantial de El Tempul (IGME, 2000; Jiménez *et al.*, 2001).

#### Proceso de calibración y resultados

A partir de los primeros resultados obtenidos se ha realizado un proceso de calibración durante el cual se han ido modificando progresivamente los parámetros, hasta encontrar un ajuste aceptable entre los valores de caudal diario del manantial de El Tempul y los calculados por el modelo. Los valores finales utilizados para cada uno de los parámetros se recogen en la tabla 1.

En la figura 2 se muestra el mejor ajuste conseguido entre los valores de caudal diario registrados en el manantial de El Tempul y los valores de caudal diario simulados por el modelo. Para obtener este ajuste ha sido necesario modificar especialmente dos parámetros (Tabla 1): el parámetro de excedente ( $c$ ) y los coeficientes de reparto ( $b_1$  y  $b_2$ ). Dado que muchos de los picos de caudal presentaban valores muy superiores a los reales, ha sido necesario modificar el parámetro  $c$  dándole un valor más elevado de lo normal. Así, aunque los picos obtenidos siguen siendo superiores para las crecidas pequeñas, se ajustan mejor las crecidas importantes. Este mismo efecto se puede

Capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo	$H_{\max}$	50 mm
Infiltración máxima	$I_{\max}$	100 mm
Coefficiente que afecta al umbral de excedencia del agua	$c$	0,80
Coefficiente de la primera rama de descarga (decrecida)	$\alpha_1$	0,017 días <sup>-1</sup>
Coefficiente de la segunda rama de descarga (agotamiento)	$\alpha_2$	0,0016 días <sup>-1</sup>
Coefficiente de reparto	$b_1$	0,8
Coefficiente de reparto	$b_2$	0,2

Tabla 1.- Valores finales de los parámetros de calibración del modelo.

Table 1.- Final values of model calibration parameters.

conseguir aumentando la máxima capacidad de humedad en el suelo ( $H_{\max}$ ), pero se considera que el valor utilizado (50 mm) es adecuado para el contexto físico del área de estudio.

Para ajustar mejor la forma de los hidrogramas calculados a los valores medidos se han modificado los valores de coeficiente de reparto ( $b_1$  y  $b_2$ ) para cada una de las celdas virtuales. Así, se comenzó el proceso de calibración dándole los mismos coeficientes de reparto (0,5) a ambas celdas, hasta alcanzar un valor de  $b_1=0,8$  para la primera rama de descarga (decrecida) y  $b_2=0,2$  para la segunda rama (agotamiento).

En la figura 2 se observa que el ajuste conseguido es algo irregular, aunque la decrecida aparece bien reflejada en casi todos los hidrogramas, existiendo períodos en los que la aproximación calculada por el modelo se puede considerar bastante aceptable, como es el caso de los ciclos hidrológicos 1985-86 a 1987-88. Los hidrogramas simulados pronostican, sistemáticamente, aumentos de caudal del manantial en respuesta a las precipitaciones de principios de año hidrológico, hecho éste que no suele ocurrir realmente de acuerdo con los caudales medidos, porque el modelo no tiene en cuenta, suficientemente, el estado del acuífero en el momento en el que se produce la lluvia, ni la importante inercia del mismo (Jiménez *et al.*, 2001). Este hecho se hace más patente en los periodos de sequía como el comprendido entre 1991 y 1994.

Los valores de las aportaciones totales calculadas para todo el período de simulación son de 70,4 hm<sup>3</sup>, mientras que las aportaciones medidas son de 71,1 hm<sup>3</sup> (Fig. 3). Por tanto, aunque el ajuste de los hidrogramas simulado y real sea irregular para el periodo comprendido entre Octubre de 1985 y Agosto de 1995, los volúmenes de descarga deducidos si son similares.

**Discusión sobre el modelo.**

**Conclusiones**

La aplicación del modelo "lluvia-caudal" (Estrela, 1997) propuesto para la simulación de los caudales diarios del manantial de El Tempul presenta, una serie de aspectos que deben ser tenidos en cuenta:

- La modelización de años hidrológicos con condiciones climáticas diferentes de la media, ya sea por precipitaciones intensas o por condiciones de sequía, es bastante menos precisa que la que se puede generar en un año hidrológico con condiciones climáticas medias.

- La gran inercia que presenta el acuífero de Sierra de las Cabras, ya contrastada anteriormente, genera cierto retraso en la señal de salida con respecto a la señal de entrada, y aún siendo caracterizada esta inercia dentro del modelo mediante los coeficientes de agotamiento, no queda lo suficientemente reflejada debido a los pocos parámetros que requiere el modelo utilizado.

- La utilización de datos de temperatura procedentes de una estación meteorológica costera (San Fernando) para el cálculo de la evapotranspiración potencial, puede provocar algunos errores en la modelización, ya que el área de estudio se encuentra relativamente alejada del litoral.

En resumen, la simulación permite obtener una descarga media anual del

manantial de El Tempul de 7,1 hm<sup>3</sup>, ligeramente inferior al valor de 8 hm<sup>3</sup> medido durante el periodo 1985-1995, por lo que la utilización de este modelo como herramienta para predecir los recursos hídricos aportados por el manantial de El Tempul para un ciclo hidrológico concreto, resultaría aceptable.

**Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General de Obras Hidráulicas de la Junta de Andalucía y el Instituto Geológico y Minero de España, y constituye una contribución a los proyectos PB98-1397 de la DGES e IGCP 448 de la UNESCO, así como al Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía. Se agradece al Real Observatorio de San Fernando (Cádiz) la cesión de los datos de temperatura de la estación de San Fernando. A la Empresa de Aguas de Jerez (AJEMSA) se agradece la cesión de los datos de lluvia y de caudal del manantial de El Tempul

**Referencias**

Bezes, C. (1976): *Thèse 3ème cycle*, 135 p.  
 Carreras, A. (1996): *Jorn. sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 9-21.  
 Chauve, P. (1960-62): *Mem. Soc. Geol.*

*Francia.*  
 Cormary, Y. y Guilbot, A. (1971): *La Houille Blanche*, 2, 131-140.  
 D.P.C. (1984): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Cádiz*. Ed. Diputación Prov. de Cádiz, 100 p.  
 Estrela, T. (1997): *Formulación teórica del modelo Témez*. Publicaciones del CEDEX, 18 p.  
 García de Domingo, A. et al. (1990): *Mapa geológico de España. Escala 1:50.000: Hoja 1063 (Algar)*. I.T.G.E. Madrid, 45 p.  
 Girard, G. (1970): *Cahiers d'ORSTOM*, VII (1),  
 IGME (2000): *Análisis de la descarga de la Sierra de las Cabras (Cádiz) a través del manantial de El Tempul*. Informe inédito, 66 p.  
 ITGE (1996): *Funcionamiento hidrodinámico y regulación hidrogeológica del manantial de El Tempul (Cuenca del Guadalquivir; Cádiz)*. (IDRENA).  
 Jiménez, P., Andreo, B., Durán, J.J., Carrasco, F., López-Geta, J.A., Vadillo, I. y Vázquez, M. (2001): *Bol. Geol. Min.*, 2, 85-102  
 Martín Algarra, A. (1987): *Tesis Doctoral*, Universidad de Granada, 1171 p.  
 Padilla, A. y Pulido Bosch, A. (1988): *II Congreso Nacional Geología*, II, 425-428.  
 Témez, J.R. (1977): *Modelo matemático de transformación "Precipitación-Aportación"*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica, 39 p.