

Validez de los resultados obtenidos a partir de las soluciones analíticas de Theis y Cooper-Jacob en ensayos de bombeo realizados en acuíferos costeros

Validity of applying Theis and Cooper-Jacob analytical solutions in pumping tests carried out in coastal aquifers

María Luisa Calvache¹, Juan P. Sánchez-Úbeda¹, Carlos Duque², Manuel López-Chicano¹ y Beatriz de la Torre³

¹ Departamento de Geodinámica, Avda. Fuentenueva s/n, 18071 Granada, España. calvache@ugr.es, juampesu@ugr.es, mlopezc@ugr.es

² Department of Geosciences, University of Oslo, Norway, cduque@ugr.es

³ Departamento de Ecología y Geología, Universidad de Málaga, Málaga, España. beatrizdelatorremartinez@gmail.com

ABSTRACT

Two pumping tests were performed in the unconfined detrital Motril-Salobreña aquifer in a 250 metre-deep artesian well 300 m from the coast-line containing both freshwater and saltwater. The two observation wells where the drawdowns are measured record the influence of tidal fluctuations and a high vertical heterogeneity in the aquifer. The Theis and Cooper-Jacob approaches give average T and S values of $1,460 \text{ m}^2/\text{d}$ and 0.027 , respectively. Numerical modelling in a synthetic model was applied to analyse the sensitivity of the Theis and Cooper-Jacob approaches to the usual boundary conditions in coastal aquifers. The T and S values calculated from the numerical modelling drawdowns indicate that the regional flow, variable pumping flows, and tidal effect produce an error of under 10% in results obtained with classic methods. Fluids of different density (freshwater and saltwater) cause an error of 20% in estimating T and of over 100% in calculating S . The factor most affecting T and S results in the pumping test interpretation is vertical heterogeneity in sediments, which can produce errors of over 100% in both parameters.

Key-words: pumping test, coastal aquifer, vertical heterogeneity, Theis solution, Cooper-Jacob solution.

RESUMEN

En el acuífero costero Motril-Salobreña se realizaron dos ensayos de bombeo en un sondeo surgente de 250 m de profundidad localizado a 300 m del borde costero en el que se detectó la presencia de agua dulce y agua salada y una fuerte heterogeneidad vertical. En los dos piezómetros donde se miden los descensos, se registra la influencia de las oscilaciones mareales. La aplicación de las soluciones analíticas de Theis y Cooper-Jacob da valores medios de T y S de $1.460 \text{ m}^2/\text{d}$ y $0,027$, respectivamente. Para analizar la sensibilidad de las aproximaciones de Theis y Cooper-Jacob ante condiciones de contorno que suelen aparecer en acuíferos costeros se ha aplicado un modelo matemático sintético. Los valores de T y S calculados a partir de los descensos resultantes del modelo indican que la existencia de un flujo regional, un caudal de bombeo variable y el efecto de las mareas producirá un error inferior al 10% en los resultados obtenidos con los métodos clásicos. La presencia de fluidos de diferente densidad provocará un error del 20% para T y mayor del 100% para S . El factor que más afecta a los resultados de T y S en la interpretación de ensayos de bombeo es la heterogeneidad vertical de los sedimentos que pueden dar errores superiores al 100% para ambos parámetros.

Palabras clave: ensayo de bombeo, acuífero costero, heterogeneidad vertical, Theis, Cooper-Jacob.

Geogaceta, 59 (2016), 31-34
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 15 de julio de 2015
Fecha de revisión: 20 de octubre de 2015
Fecha de aceptación: 27 de noviembre de 2015

Introducción

Los ensayos de bombeo continúan siendo los métodos más ampliamente utilizados para la estimación de la transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) en acuíferos. Las soluciones analíticas más utilizadas son las propuestas por Theis (1935) y Cooper y Jacob (1946) que consideran unas condiciones de contorno muy restrictivas. En el caso de los acuíferos costeros, algunas de estas condiciones de contorno no se cumplen por lo que la validez de los resultados

obtenidos aplicando estas soluciones analíticas no queda clara. Hay autores que han modificado las soluciones analíticas para adaptarse a la presencia de fluidos de diferente densidad, a las oscilaciones del nivel por el efecto de las mareas, a un caudal de bombeo variable o a la frecuente presencia de niveles con diferente conductividad hidráulica (Trefry y Johnston, 1998; Chen y Jiao, 1999; Hemker, 1999; Sakr, 2001; Sen y Altunkaynak, 2004; Chapuis *et al.*, 2006; Zhang, 2013; Chattopadhyay *et al.*, 2014). A pesar de ello, todavía no se ha encontra-

do una solución genérica que se pueda aplicar a los acuíferos costeros por lo que recurrir a las soluciones de Theis y Cooper-Jacob sigue siendo una buena opción.

En este trabajo se va a presentar el caso de dos ensayos de bombeo realizados en un sondeo profundo localizado en el acuífero costero Motril-Salobreña (Granada), en el que coinciden una serie de circunstancias específicas propias de los acuíferos costeros que dificultan la interpretación de los descensos obtenidos durante los ensayos de bombeo. En concreto

se trata de un sondeo surgente con caudal variable decreciente, perforado en un acuífero detrítico que muestra una serie estratificada con niveles de diferente conductividad hidráulica. Además, el pozo intersecta la zona de mezcla agua dulce-agua salada y, debido a su proximidad al borde costero, se ve afectado por las oscilaciones mareales. Los objetivos de este trabajo son comprobar la afección que producen estas circunstancias específicas de los acuíferos costeros en los valores de T y S previamente estimados aplicando los métodos clásicos de Theis y Cooper-Jacob mediante modelación numérica.

Contexto hidrogeológico

El acuífero detrítico costero Motril-Salobreña ocupa una superficie de 42 km². A 300 m de la línea de costa, se perforaron tres sondeos que resultaron surgentes (Calvache *et al.*, 2011). El más profundo (S250) de 250 m, cuenta con 12 tramos ranurados de 3 m cada uno distribuidos a lo largo de toda su longitud y aporta un caudal medio de 18 L/s. Las otras dos perforaciones son piezómetros, situados a 4,7 y 9,6 m del primer sondeo, que tienen profundidades de 40 m (S40) y 135 m (S135), respectivamente. El caudal medio que aportan estos dos piezómetros es de 0,10 y 0,13 L/s, respectivamente. A partir de los registros de conductividad eléctrica realizados en el sondeo S250, se ha podido comprobar que la interfase agua dulce-agua salada se encuentra aproximadamente entre los 135 y los 200 m de profundidad.

La columna litológica en este sector del acuífero se puede simplificar en 3 unidades. Desde la superficie hasta los 65 m dominan arenas finas con limo y escasas intercalaciones de gravas. Desde esta profundidad hasta los 140 m se detectaron gravas con

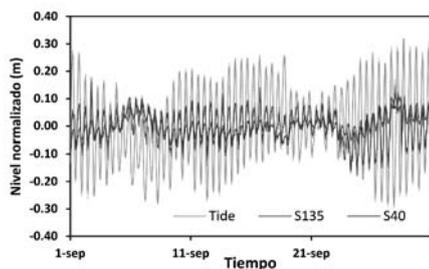


Fig. 1.- Oscilaciones del mar Mediterráneo durante septiembre de 2011 y su efecto en S40 y S135 en ese mismo periodo.

Fig. 1.- Mediterranean tide and tidal effects in S40 and S135 in September 2011.

	PT1		PT2	
Duración	11h 35 min		26 h 7 min	
Caudal bombeado (m ³ /d)	1576		1451	
Punto de observación	S40	S135	S40	S135
Distancia al bombeo (m)	4,72	9,60	4,72	9,60
Nivel estático (m)	5,23	6,62	4,88	6,58
Max. descenso (m)	0,79	0,45	0,49	0,44
Amplitud oscilación mareal (m)	0,008	0,06	0,006	0,06

Tabla I.- Datos de los dos ensayos de bombeo realizados en S250.

Table I.- Data of the two pumping tests carried out in S250 well.

cantos de diámetros centimétricos mezcladas con arena gruesa. Desde aquí hasta el fondo (250 m) aparecen abundantes arcillas con capas de gravas intercaladas y de poca potencia.

El registro horario de los niveles en los dos piezómetros, S40 y S135, nos muestra el efecto de las oscilaciones mareales, siendo mayor la amplitud de oscilación inducida (unos 15 cm) en el piezómetro S135, en relación al menos profundo (5 cm) (Fig. 1).

Metodología

Los resultados de los ensayos de bombeo (Fig 2), cuyas características más importantes aparecen en la tabla I, fueron interpretados aplicando las soluciones de Theis y Cooper-Jacob.

Posteriormente se realizó un análisis de la sensibilidad de estos resultados mediante un modelo numérico sintético. En concreto, se comprobará la afección de la densidad variable del fluido, el caudal de bombeo no constante, existencia de un gradiente re-

gional, las oscilaciones periódicas del nivel en uno de los bordes y la heterogeneidad vertical de la conductividad hidráulica. El modelo conceptual considerado será una simplificación del caso real estudiado, ya que el objetivo es determinar el grado de error que pueden tener los valores de T y S obtenidos con los métodos tradicionales cuando no se cumplen las condiciones de contorno consideradas por Theis y Cooper-Jacob (caso 1). Para ello, se han estimado los valores de T y S (T_i, S_i) a partir de los descensos obtenidos en cada escenario simulado y se ha calculado el error respecto al caso 1 (T₁, S₁) como:

$$Error_t = \frac{T_i - T}{T_1}; Error_s = \frac{S_i - S_1}{S_1}$$

Resultado

T y S a partir de Theis y Cooper-Jacob

El ajuste de los descensos a las curvas teóricas ha sido más satisfactorio para el caso del piezómetro S40 con un error estándar de 1,6%, frente al 4% resultante en el ajuste conseguido para S135. Esta diferencia probablemente es debida a las oscilaciones mareales, mucho más patentes en S135, que dificultan el ajuste de los datos (Fig. 2). Los datos de T estimados en S40 y S135 (Tabla II) ofrecen rangos de valores de 1.598 a 2.360 m²/d y 3.192 a 4.383 m²/d, respectivamente. En el caso de S, los valores obtenidos oscilan entre 0,003 y 0,009 para el S40 y entre 1,2 · 10⁻⁴ y 0,008 para el S130.

Teniendo en cuenta las modificaciones propuestas por Streltsova (1988) para caudal variable, se obtienen valores de T un poco más bajos que los anteriores. Estos oscilan entre 1.292 y 1.630 m²/d para S40, y entre 2.750 y 3.249 m²/d para S135 (Tabla II). Para S, sin embargo, se obtienen valores más elevados, 0,023 para el S40 y entre 0,03 y 0,002 para el S135. En general, los errores estándar obtenidos al ajustar las

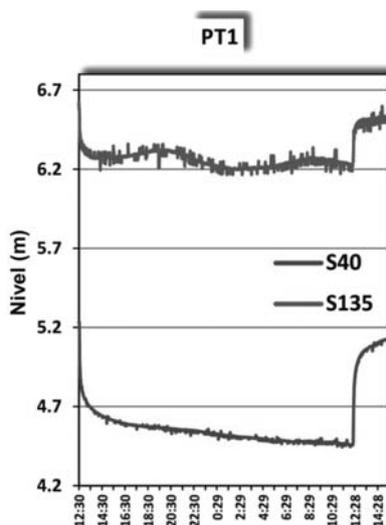


Fig. 2.- Niveles medidos en S40 y S135 durante los dos ensayos de bombeo realizados.

Fig. 2.- Heads measured in S40 and S135 during pumping tests.

Ensayo de bombeo			PT1		PT2	
Solución Analítica			Cooper-Jacob	Theis	Cooper-Jacob	Theis
Bombeo Constante	T (m ² /d)	S40	1602	1598	1977	1971
		S130	4381	4383	3192	3192
	S (-)	S40	0,009	0,009	0,003	0,003
S130		1,5 10 ⁻⁴	1,2 10 ⁻⁴	0,009	0,008	
Bombeo Variable	T (m ² /d)	S40	1292	1290	1629	1630
		S130	3249	3249	2768	2750
	S (-)	S40	0.03	0.03	0.023	0.023
S130		0.002	0.002	0.03	0.03	

Tabla II.- Resultados de T y S obtenidos a partir de los métodos clásicos considerando las soluciones analíticas para bombeo constante y variable.

Table II.- T and S results obtained from classical methods taking into account analytical solution with constant and variable discharge

curvas en este último caso son muy similares a los conseguidos sin considerar el caudal variable, aunque considerando éste se llega a obtener el mínimo error estándar (1,5%) en el ajuste de los datos registrados en S40. Por lo tanto, se tomará como valores representativos de T y S en el sector occidental del acuífero Motril-Salobreña aplicando los métodos de Theis y Cooper-Jacob (con caudal variable), los valores promedio de las estimaciones obtenidas en S40. En concreto se considera una T de 1.460 m²/d y un S de 0,027.

Modelación numérica

Se ha realizado un modelo de flujo y transporte 3D con el que se han simulado siete casos diferentes: (1) Condiciones consideradas en Theis y Cooper-Jacob, (2) con flujo regional debido a la existencia de un gradiente general, (3) con caudal de bombeo variable, (4) con borde de oscilaciones mareales, (5) con heterogeneidad vertical, (6) con fluidos de diferente densidad, y (7) con todos los condicionantes anteriores. El tamaño del modelo ha sido suficiente para asegurar que el cono de depresión producido no alcanza a los bordes establecidos.

Las dimensiones del modelo son 5x5 km² de superficie por 200 m de profundidad con celdillas de 50x50 m². En los casos en los que se considera un acuífero homogéneo (1, 2, 3, 4 y 6) se ha establecido una sola capa y en los que se considera un acuífero heterogéneo (5 y 7) 3 capas (Fig. 3).

En el modelo se han situado cuatro puntos de observación:

- R1: a 50 m del punto de bombeo en sentido opuesto al flujo y a 40 m de profundidad.
- R2: a 100 m del punto de bombeo en

sentido opuesto al flujo y a 135 m de profundidad.

- L1: a 50 m del punto de bombeo en el sentido del flujo y a 40 m de profundidad.
- L2: a 100 m del punto de bombeo en el sentido del flujo y a 135 m de profundidad.

En la tabla III se representan los datos de T y S calculados a partir de los valores de descensos que se han obtenido con el modelo numérico tras un día de bombeo en los diferentes escenarios considerados. Los valores de T calculados en los escenarios 2, 3, 4 y 6 son bastante similares a los valores obtenidos con los métodos de Theis y Cooper-Jacob (caso 1). El error que se comete suele estar por debajo del 10% y solo en el caso de los S medidos en el punto más alejado del bombeo (R2) considerando diferentes densidades se llega a alcanzar un error del 20% (caso 6).

El factor que más afecta a la aplicabilidad de los métodos tradicionales en la in-

terpretación de los ensayos de bombeo es la heterogeneidad vertical. En este supuesto (caso 5), los valores de T obtenidos presentan mayor porcentaje de error, aunque hay una gran diferencia entre el valor calculado en el punto localizado en la capa 1 (R1) con un error que ronda el 30% y el de la capa 2 (R2) que supera el 100% de error.

Es de destacar que cuando se consideran conjuntamente todos los factores (caso 7) el porcentaje de error desciende a un 40-50% en la mayor parte de los casos, probablemente debido a que unos efectos compensan a los producidos por otros factores.

El coeficiente de almacenamiento (S) es mucho más sensible a los cambios respecto a la situación de referencia. Sólo se han encontrado resultados aceptables para los casos en los que se tiene en cuenta la existencia de un gradiente hidráulico, caudal de extracción variable y efecto de las mareas con una sola capa (casos 2, 3 y 4) con errores, en general, inferiores al 3%. En el resto de los casos, los valores de S obtenidos son mucho más elevados que el valor calculado para el caso 1, con errores que oscilan aproximadamente entre 100 y 300%. Sólo se obtienen valores de S más bajos (2,4 10⁻⁴ y 4,3 10⁻³ según se aplique Theis o Cooper-Jacob, respectivamente) en la profundidad 2 cuando se considera un medio heterogéneo (R2 en la tabla III). Estos valores tan bajos son debidos a que el modelo numérico, cuando se trabaja con una capa que permanece totalmente saturada durante toda la simulación el parámetro de almacenamiento que aplica es el almacenamiento específico (S_s*b) que en este caso

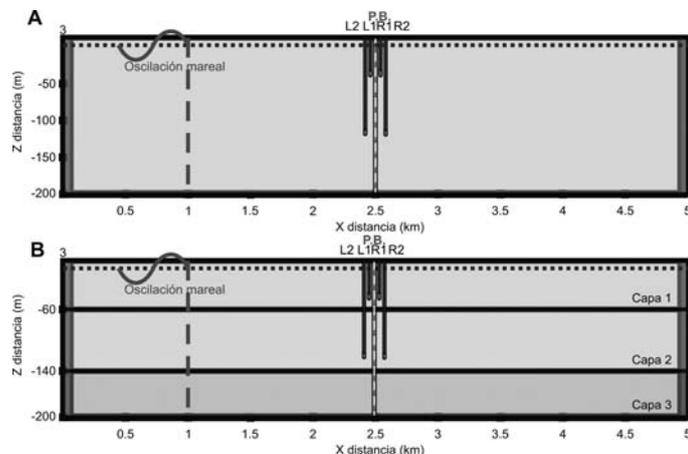


Fig. 3.- Sección a lo largo de una fila del modelo conceptual. A) Modelo homogéneo con 1 capa (casos 1, 2, 3, 4 y 6). B) Modelo heterogéneo con 3 capas (casos 5 y 7).

Fig. 3.- Conceptual model cross section along a row. A) Homogeneous model with 1 layer (cases 1, 2, 3, 4 and 6). B) Heterogeneous model with 3 layers (cases 5 and 7).

Casos	TRANSMISIVIDAD							
	R1				R2			
	Theis		Jacob		Theis		Jacob	
	Valor (m ² /d)	Error (%)						
1 Ideal	1958	-	2014	-	1994	-	2133	-
2 Gradiente	1959	0,0	2066	2,6	1995	0,1	2066	-3,1
3 Bombeo Variable	1944	-0,7	2009	-0,2	1985	-0,5	2170	1,7
4 Efecto Marea	1958	0,0	2077	3,1	1994	0,0	2133	0,0
5 Heterogeneidad Vertical	2517	28,5	2639	31,0	8806	341,7	5295	148,2
6 Densidad Variable	1810	-7,5	1945	-3,4	1583	-20,6	2170	1,7
7 Todos	2863	46,2	2827	40,4	2314	16,1	3579	67,8

Casos	COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S)							
	R1				R2			
	Theis		Jacob		Theis		Jacob	
	Valor (-)	Error (%)	Valor (-)	Error (%)	Valor (-)	Error (%)	Valor (-)	Error (%)
1 Ideal	0,0292	-	0,0263	-	0,0288	-	0,0237	-
2 Gradiente	0,0292	0,0	0,0254	-3,4	0,0288	-0,1	0,0254	7,2
3 Bombeo Variable	0,0300	2,7	0,0262	-0,4	0,0291	1,0	0,0235	-1,1
4 Efecto Marea	0,0292	0,1	0,0254	-3,4	0,0288	-0,2	0,0243	2,4
5 Heterogeneidad Vertical	0,0970	232	0,0843	220	0,0002	-99,2	0,0043	-81,9
6 Densidad Variable	0,0664	127	0,0558	112	0,0707	145	0,0494	108
7 Todos	0,0664	127	0,0558	112	0,0707	145	0,0494	108

Tabla III.- Valores de T y S calculados a partir de los descensos obtenidos en cada uno de los casos modelados y errores de estimación respecto al caso 1 (condiciones de Theis).

Table III.- T and S values estimated from drawdowns obtained in every case modelled and errors compared to the case 1 (Theis and Cooper-Jacob conditions).

tomaría un valor de $8 \cdot 10^{-4}$, en contraste con lo que ocurre en las capas en las que se produce saturación-desaturación, en las cuales el modelo aplica el coeficiente de almacenamiento (S_y).

Al igual que ocurre con la T, los valores de S que se obtienen para el caso 7 en el que se consideran conjuntamente todas las variables, presentan un error inferior que para el caso 5. La densidad variable del fluido afecta más a la estimación de S (errores superiores al 100%) que a la de T (errores entre 1,7-20,6%).

Conclusiones

A partir de la aplicación de un modelo numérico sintético se ha podido comprobar que el error en la estimación de los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento calculados por Theis y Cooper-Jacob en un acuífero detrítico

puede ser inferior al 10% en el caso de que exista un determinado flujo regional (gradiente hidráulico), que el caudal bombeado varíe un 10% a lo largo del test y que los niveles presenten una oscilación mareal del orden del 1% respecto de la altura piezométrica.

La presencia de la interfase agua dulce-agua salada puede provocar un error del 20% en los resultados de transmisividad y superiores al 100% en el coeficiente de almacenamiento.

El factor que mayor error introduce en los resultados obtenidos de T y S a partir de las metodologías clásicas es la heterogeneidad vertical. La presencia de capas con variaciones en la conductividad hidráulica entre 1 y 30 m/d provoca errores en ambos parámetros superiores al 100%.

Se podrán aplicar los métodos de Theis y Cooper-Jacob en el caso de acuíferos costeros para la interpretación de ensayos de

bombeo y obtención de T y S, siempre y cuando sean acuíferos uniformes, sin heterogeneidad vertical importante y en el sector donde no haya influencia del agua salada (cuña salina).

Para acuíferos estratificados con variaciones de la conductividad hidráulica en la vertical o que el bombeo se realice en el dominio de la cuña salina, no se podrán considerar válidos los datos de S obtenidos mediante Theis o Cooper-Jacob y los valores de T se deberán considerar como aproximados y sobreestimados.

Agradecimientos

Este estudio se realizó gracias a los fondos del CGL2012-32892 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y del grupo de investigación de la Junta de Andalucía RNM-369.

Referencias

Calvache, M.L., Duque, C., Gómez-Fontalva, J.M. y Crespo, F. (2011). *International Journal of Environmental Science and Technology* 8, 223-236.

Chapuis, R.P., Belanger, C. y Chenaf, D. (2006). *Ground Water* 44, 300-305.

Chattopadhyay, P.B., Vedanti, N. y Singh, V.S. (2014). *Water Resources Management* 29, 771-784.

Chen, C. y Jiao, J.J. (1999). *Ground Water* 37, 465-474.

Cooper, H.H. y Jacob, C.E. (1946). *Transactions American Geophysical Union* 27, 526-534.

Hemker, C.J. (1999). *Journal of Hydrology* 225, 1-18.

Sakr, S.A. (2001). *Ground Water* 39, 5-9.

Sen, Z. y Altunkaynak, A. (2004). *Journal of American Water Resources Association* 40, 1189-1196.

Streltsova, T.D. (1988). *Well testing in heterogeneous formations*. John Wiley & Sons, New York, 413 p.

Theis, C.V. (1935). *Transactions American Geophysical Union* 2, 519-524

Trefry, M.G. y Jhonston, C.D. (1998). *Ground Water* 36, 427-433.

Zhang, G. (2013). *Journal of Hydrology* 476, 345-351.