

Cálculo de parámetros hidrogeológicos por influencia de la marea a diferentes profundidades en la zona de descarga del acuífero costero Motril-Salobreña (Granada)

Estimation of hydrogeological parameters by tidal influence at different depths in the discharge zone of the Motril-Salobreña Coastal Aquifer (Granada)

Juan Pedro Sánchez Úbeda¹, María Luisa Calvache Quesada¹, Carlos Duque² y Manuel López Chicano¹

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

² Department of Geography and Geology, University of Copenhagen, Øster Voldgade 10, 1350-Copenhagen, Dinamarca. cad@geo.ku.dk

ABSTRACT

The tidal oscillation influence on the water head was clearly detected at deep points at the discharge zone of Motril-Salobreña coastal aquifer, obtaining different diffusivity (T/S) values according to depth, distance of point to the shoreline and depending on the applied method. Water table was also monitored at different shallow and deep locations close to the coastal border in order to compare the results with the previously obtained at deeper points, finding that the diffusivity values increased with depth. However, if we considered a homogeneous medium, the transmissivity values are different when they should be similar for this reduced sector of the aquifer, which would imply that the variable factor should be the storage coefficient (S), depending whether or not there is saturation-desaturation (water table variations close to the surface).

Key-words: Tidal influence, diffusivity, coastal aquifer, transmissivity.

RESUMEN

La influencia de la oscilación de mareas en las medidas de nivel piezométrico se detectó de forma clara en puntos profundos de la zona de descarga del acuífero costero Motril-Salobreña, obteniendo diferentes valores de difusividad (T/S) en función de la profundidad, de la distancia del punto de medida al borde costero y del método de cálculo utilizado. Se ha registrado el nivel piezométrico en diferentes puntos someros y profundos del borde costero con el fin de comparar los resultados con los obtenidos previamente a mayor profundidad, concluyendo que los valores de difusividad aumentan a mayores profundidades. No obstante, considerando un medio homogéneo, los valores de transmisividad se presentan diferentes en un sector tan reducido del acuífero cuando deberían ser similares. Se deduce de ello que el factor variable debe ser el coeficiente de almacenamiento, en función de si se produce o no saturación-desaturación (variaciones de nivel cerca de la superficie).

Palabras clave: Influencia de marea, difusividad, acuífero costero, transmisividad.

Geogaceta, 54 (2013), 131-134.
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 31 de enero de 2013
Fecha de revisión: 25 de abril de 2013
Fecha de aceptación: 24 de mayo de 2013

Localización y contexto hidrogeológico

El acuífero costero Motril-Salobreña, con una extensión superficial de 42 km², se localiza en el SE de la Península Ibérica (Fig. 1). Los materiales que forman el acuífero son sedimentos detríticos de origen fluvio-deltáico, mayormente groseros y muy permeables. En el basamento y los límites laterales del acuífero encontramos esquistos y filitas muy poco permeables, salvo por el borde norte, donde entran en contacto con el acuífero carbonatado de Escalate y con el aluvial del río Guadalfeo, y por el borde sur con el Mar Mediterráneo.

La principal fuente de aportes y recarga del acuífero la constituye dicho río, el cual drena gran parte de la vertiente sur de Sierra Nevada. Por otra parte, el espesor del sistema acuífero es variable, siendo de pocos metros en la zona de cabecera y máximo bajo la actual y antigua desembocadura del río Guadalfeo (más de 250 m), localizada esta última en la parte central de la línea costera del acuífero.

En referencia a la zona de descarga, el sistema acuífero es considerado como libre hasta los 140 m de profundidad, a partir de los cuales encontramos capas de materiales arcillosos de elevada potencia con intercalaciones poco potentes de materiales más

groseros, en las cuales se pueden dar condiciones de confinamiento.

Objetivos

Se pretende examinar las propiedades hidráulicas de la zona de descarga del acuífero, lo cual constituye uno de los factores más determinantes para la aparición de la intrusión marina. Por otra parte se establecen cuáles son las condiciones para poder aplicar métodos indirectos de cálculo de parámetros hidrogeológicos en la zona de descarga de acuíferos no confinados.

Los valores de difusividad hidráulica (T/S) obtenidos a partir del efecto de las ma-

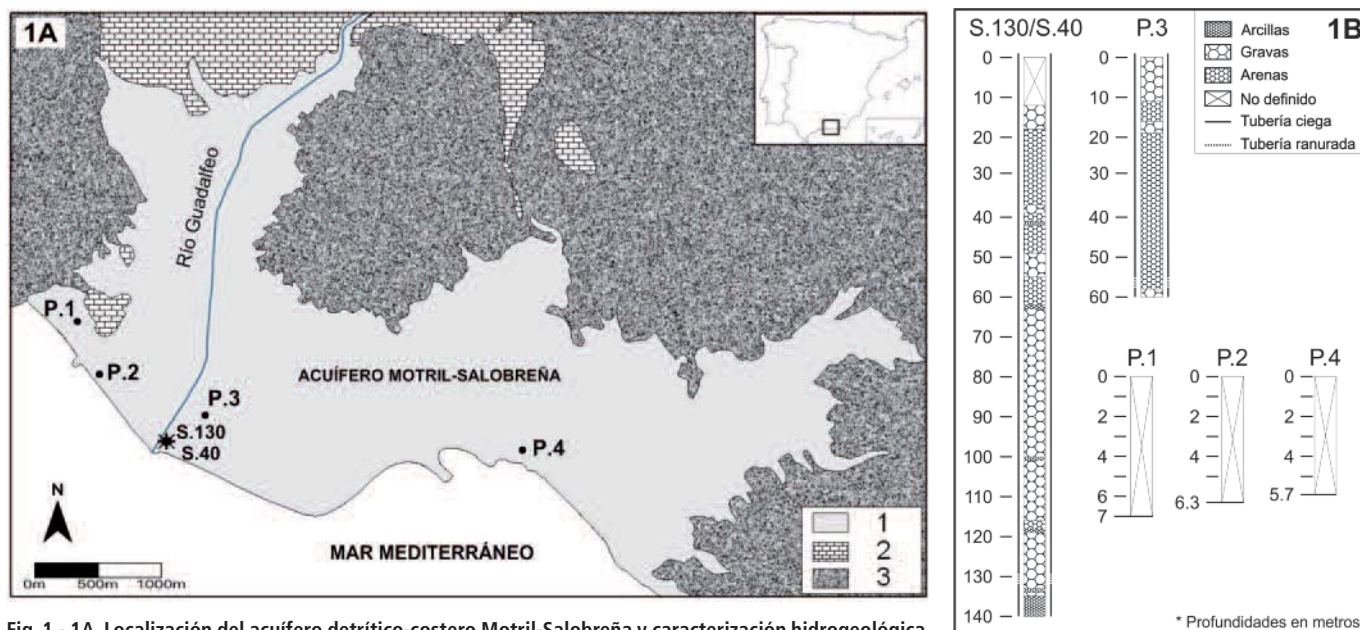


Fig. 1.- 1A. Localización del acuífero detrítico-costero Motril-Salobreña y caracterización hidrogeológica general. 1: Sedimentos detríticos de origen fluvio-deltaico, materiales groseros en su mayoría; 2: Material calizo (Acuífero carbonatado de Escalate y Peñón de Salobreña); 3: Filitas y esquistos del Complejo Alpujarride, considerados impermeables a efectos prácticos; 1B. Columnas litológicas de los puntos discutidos. La litología del punto S.40 coincide por proximidad con la de S.130 hasta los 49 m (prof. total). P.1, P.2 y P.4: puntos de control superficiales; S.130, S.40 y P.3: piezómetros profundos, ranurados a 132, 38 y 59 m respectivamente.

Fig. 1. -1A. Localization of the Motril-Salobreña detrital-coastal aquifer and general hydrogeological characterization. 1: Fluvial-deltaic detrital sediments, mostly coarse material; 2: Limestone (Salobreña and Escalate carbonate aquifers); 3: Phyllites and schists of the Alpujarride complex that can be considered as impermeable; 1B. Lithology of discussed points. S.40 is the same as S.130 until 49 m depth (bottom) due to nearness; P.1, P.2 and P.4: shallow control points; S.130, S.40 and P.3: deep piezometers, slotted at 132, 38 and 59 m respectively.

reas sobre el nivel piezométrico y cómo afecta a estos resultados la profundidad a la que se toma la medida son los temas a tratar en este estudio, comparando dichos resultados con los datos de variación de presión en profundidad en trabajos anteriores.

Metodología

Comprobada la influencia de la oscilación de la marea en niveles profundos de la zona de descarga del acuífero (a 132 y 38 m de profundidad), se ha procedido a medir la variación de nivel piezométrico en puntos someros del borde costero (Fig. 1). Las medidas se han realizado en 4 puntos a diferente distancia de la costa y con una resolución temporal de 5 minutos. Los puntos se pueden considerar someros (cerca del nivel freático) salvo el punto P.3, que alcanza los 60 m y está ranurado sólo en profundidad. Los puntos P.1, P.2 y P.4 son pozos poco profundos (ninguno de ellos supera los 7 m), y totalmente ranurados.

Los registros obtenidos se muestran en la figura 2. Los datos de nivel piezométrico se corrigen automáticamente en función de la conductividad eléctrica del agua, aunque en ningún caso se superan los 3 mS/cm. La

resolución vertical del nivel piezométrico es igual en los 4 gráficos presentados, referenciado al nivel medio del mar. Para el cálculo se han utilizado los valores relativos de nivel del mar para un mismo periodo de tiempo, registrados con resolución horaria en la estación "Motril_2" localizada en el puerto de Motril, y disponibles en la web de Puertos del Estado. En todos los registros se detecta la influencia de la marea a través de sus respectivos espectros de densidad (Luque-Espinar *et al.*, 2005).

Para el tratamiento de los datos piezométricos en función de los datos de marea se han aplicado las ecuaciones del modelo de respuesta de las mareas (desarrollo y ecuaciones generales en Sánchez-Úbeda *et al.*, 2012). Suponiendo que se trata de un acuífero costero confinado, homogéneo e isótropo, y suponiendo una oscilación sinusoidal de la marea, se pueden definir las siguientes expresiones (Ferris, 1951):

1) Retardo de la oscilación del nivel piezométrico respecto a la oscilación de mareas, expresado en unidades de tiempo:

$$R = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{t_0 S}{\pi T}} \tag{2}$$

donde x es la distancia del punto a la línea de costa en metros, y t_0 es el periodo de oscilación de la marea en horas.

Obteniendo valores del retardo o "lag" a partir del tratamiento analítico conjunto de los datos de nivel piezométrico y de mareas se estiman valores de difusividad (T/S) y transmisividad (T), a partir de diferentes valores impuestos de coeficiente de almacenamiento (S).

2) Relación entre la amplitud de oscilación del nivel piezométrico y la amplitud de mareas, o "Eficiencia de Mareas" (EM):

$$EM = \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi x^2 S}{t_0 T}}\right) \tag{1}$$

El valor de EM se ha obtenido mediante la relación entre las desviaciones estándar de los registros de nivel piezométrico y marea, respectivamente (Erskine, 1991). Estas expresiones se desarrollaron para condiciones confinantes. No obstante, son aplicables a un acuífero libre como es el caso, cuando la razón entre la fluctuación del nivel piezométrico y el espesor saturado es menor a 0,02 (Roscoe Moss, 1990). Además, han sido aplicadas en numerosos

casos por diferentes autores, obteniendo resultados o valores favorables (Erskine, 1991; Jha *et al.*, 2003; Zhou, 2008).

Resultados y discusión

Los periodos de oscilación del nivel piezométrico coinciden en todos los casos con el periodo de mareas (12,5 horas). Aplicando los métodos de retardo y de eficiencia de mareas (ecuaciones (1) y (2)), se han obtenido los resultados que se muestran en la Tabla I. Para cada uno de los puntos de registro se han calculado valores de retardo y de factor de eficiencia de mareas (*EM*).

Las amplitudes de oscilación que provoca la marea en los niveles es mayor a mayores profundidades y a menor distancia de la costa (Erskine, 1991), sin tener en cuenta la pendiente de costa (Ataie-Ashtiani *et al.*, 1999). Por ello, y considerando homogénea la litología en profundidad, el efecto de las mareas aparece menos amortiguado en las zonas más profundas del acuífero, ya que para los puntos más profundos (S.130 y S.40) obtenemos valores de *EM* de 0,4964 y 0,4198 respectivamente, mientras que para los puntos someros se obtienen valores menores (todos por debajo de 0,25). Cabe destacar la excepción que presenta P.3 (punto más alejado del borde costero), que con tramo filtrante a mayor profundidad que el resto de puntos más someros, el valor obtenido de eficiencia de mareas es relativamente bajo. De este modo se comprueba la atenuación de la oscilación marreal con la distancia a la costa.

Los valores de retardo obtenidos indican de forma directa la diferencia en la distancia a la línea de costa de cada uno de los puntos, puesto que se obtienen valores mayores de retardo a mayores distancias. Por ello, el punto 3 presenta valores de hasta 9 horas, debido principalmente a su distancia con el mar. Los valores de retardo son cercanos entre sí para los puntos someros (3 a 4 horas). En los valores obtenidos para S.130 y S.40 se observa que la profundidad también es un factor influyente en el desfase de la influencia de la marea, ya que estando ambos a más de 300 m de distancia, los retardos que muestran son del orden de 1 hora.

Los valores de difusividad calculados varían para S.130, S.40 y el punto 3 en un orden de magnitud en función del método

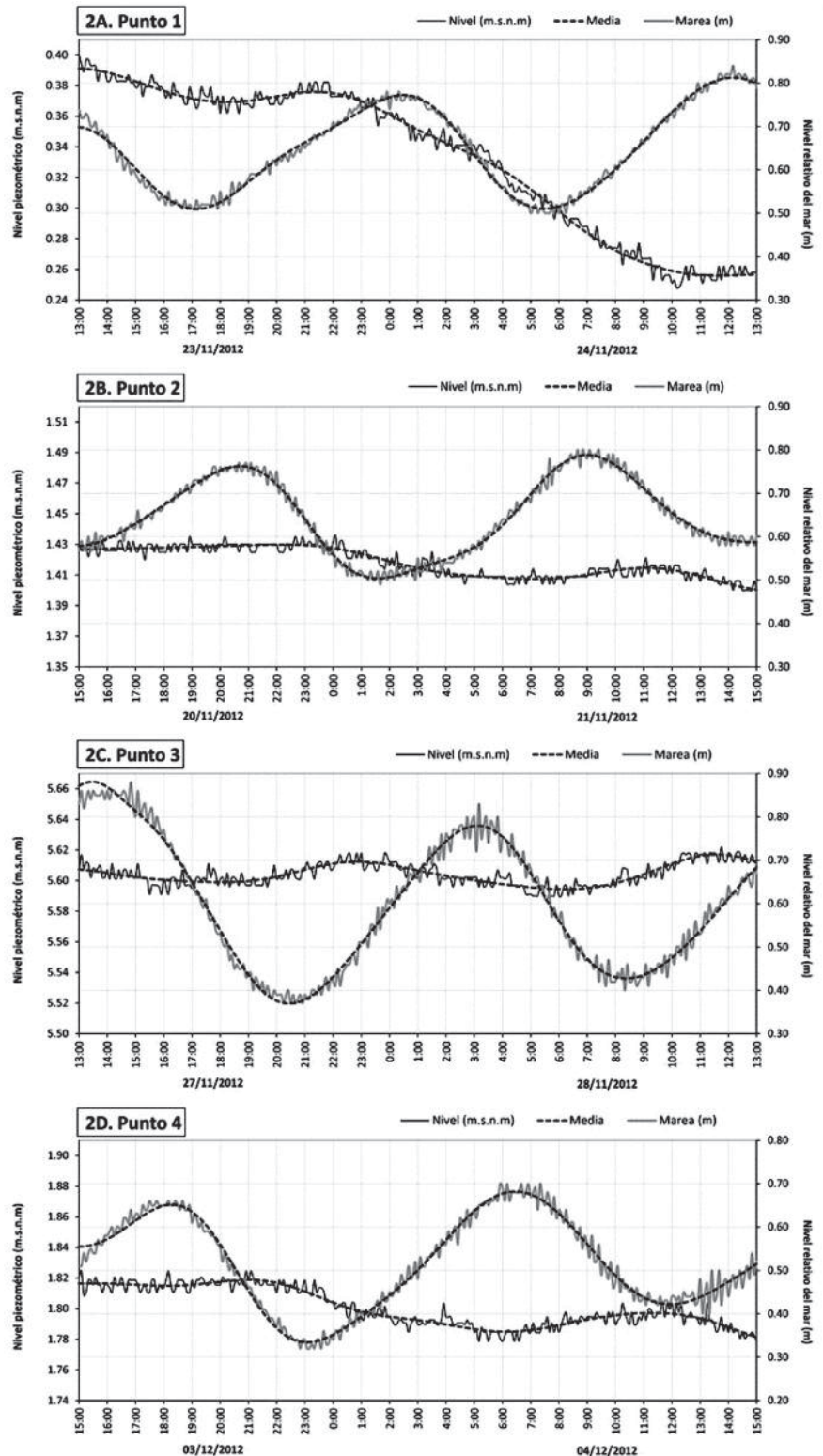


Figura 2.- (A, B, C y D) Registro de nivel piezométrico en los 4 puntos considerados (P.1, P.2, P.3 y P.4 respectivamente), junto con el registro de nivel relativo del mar para el mismo intervalo temporal en cada caso. En ambos registros se muestra el intervalo temporal entre el 21/11/12 y el 4/12/12. Resolución temporal de 5 minutos.

Fig. 2.- (A, B, C and D) Water table set data at 4 considered points (P.1, P.2, P.3 and P.4 respectively), with relative marine level at same time interval. At two logs it's showed the interval time between 21/11/12 and 4/12/12, with a temporal resolution of 5 minutes.

Punto	Desviación estándar						Método de retardo		Método de MD	
	x (m)	Marea	Nivel piez.	R (d)	EM	S	D (T/S)	T (m ² /d)	D (T/S)	T (m ² /d)
P.1	375	0,119	0,008	0,167	0,068	10 ⁻³	2,10 . 10 ⁵	210	1,18 . 10 ⁵	118
P.2	166	0,086	0,021	0,125	0,250	10 ⁻³	7,31 . 10 ⁴	73	8,64 . 10 ⁴	86
P.3	808	0,154	0,026	0,375	0,171	10 ⁻³	1,92 . 10 ⁵	192	1,26 . 10 ⁶	1265
P.4	365	0,098	0,011	0,188	0,111	10 ⁻³	1,57 . 10 ⁵	157	1,66 . 10 ⁵	565
S.130	299	0,145	0,072	0,044	0,496	10 ⁻³	1,88 . 10 ⁶	1883	5,65 . 10 ⁵	565
S.40	294	0,145	0,061	0,051	0,420	10 ⁻³	1,40 . 10 ⁶	1398	1,55 . 10 ⁵	155

Tabla I.- Valores de difusividad (D) y transmisividad (T) calculados según los valores de retardo (*time lag*) y de eficiencia de mareas (EM), para cada punto considerado.

Table I.- Diffusivity (D) and transmissivity (T) values calculated according to the values of (time lag) and tidal efficiency factor (EM) for each considered point.

utilizado, mientras que en el caso de los puntos someros los resultados de ambos métodos son más cercanos entre sí. Sin embargo, en el punto 3 obtenemos un valor de D con el método de EM mucho mayor al que cabría esperar (si lo comparamos con el más profundo, S.130), posiblemente debido al valor alto de EM cuando la distancia al mar (x) es tan grande. Otra posible explicación es la influencia directa de la litología en este punto, por existencia de materiales más groseros y permeables en profundidad (ceranía al paleocanal principal de la antigua desembocadura del río Guadalfeo).

Por otra parte, para el cálculo de la transmisividad se ha considerado como valor de coeficiente de almacenamiento 0.1%, igual al utilizado en el trabajo previo mencionado (Sánchez-Úbeda *et al.*, 2012), y de igual orden de magnitud al utilizado por Calvache *et al.* (2009) que utiliza como valor de S confinado 0,0035. Otros trabajos previos estiman para la zona costera valores de 1620 m²/d (Calvache *et al.*, 2009), 1300 m²/d (Heredia *et al.*, 2002) y 840 m²/d (Duque, 2009), similares también en magnitud a los obtenidos a partir de los valores de retardo para los puntos más profundos.

Los valores de difusividad en el acuífero aumentan con la profundidad del punto, según cabía esperar. Este hecho implica que el valor de S para los puntos someros debería ser mayor al aplicado para los profundos, al menos en un orden de magnitud, ya que las variaciones de nivel en superficie implican la desaturación y saturación del acuífero haciendo intervenir en S a la porosidad efectiva.

Conclusiones

La influencia de la oscilación de la marea en la zona de descarga del acuífero M-S ha sido corroborada a diferentes profundidades. Así, los valores de eficiencia de mareas son más elevados en zonas más profundas del acuífero, siendo la profundidad un factor no contemplado en las ecuaciones aplicadas. Por otra parte, la mayor distancia del punto de medida al borde costero implica claramente una atenuación de la influencia de oscilación de la marea, con lo cual se obtienen valores más bajos para los puntos más alejados si consideramos solamente los puntos más someros. Los puntos en los que el nivel filtrante se localiza en profundidad presentan sin embargo, valores de retardo mucho menores.

Al utilizar los diferentes métodos de cálculo sobre los registros de nivel piezométrico de la zona superficial del acuífero se obtienen valores de difusividad (D) inferiores en un orden de magnitud a los obtenidos para las zonas más profundas del acuífero.

Suponiendo una litología homogénea para la zona de descarga, los valores de D deberían ser homogéneos (al igual que la transmisividad calculada, que se presenta variable). No obstante, en los puntos someros, donde la variación de nivel piezométrico puede implicar variación en el espesor saturado del acuífero, el valor del coeficiente de almacenamiento (S) deberá ser mayor al 0,1 % aplicado en este caso, pues la litología, y en última instancia la porosidad eficaz jugará un papel importante en la elección de un S adecuado.

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. Gracias también a los revisores y editores por sus correcciones y consejos.

Referencias

- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E. y Lockington, D.A. (1999). *Journal of Hydrology* 216, 17-31.
- Calvache, M.L., Ibáñez, S., Duque, C., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rubio, J.C., González, A. y Viseras, C. (2009). *Hydrological Processes* 23, 1268-1281.
- Duque, C. (2009). *Influencia antrópica sobre la hidrogeología del acuífero Motril-Salobreña*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 196 p.
- Erskine, A.D. (1991). *Ground Water* 29, 556-562.
- Ferris, J.G. (1951). *International Association of Scientific Hydrology* 33, 148-155.
- Heredia, J.G., Murillo, J.M., Aróstegui, J.L., Rubio, J.C. y López-Geta, J.A. (2002). En: *Ground-water and Human Development*, 803-812.
- Luque-Espinar, J.A., Pardo-Igúzquiza, E. y Chica Olmo, M.E. (2005). En: *VI Simposio del Agua en Andalucía*. IGME. 451-458.
- Jha, M.K., Kamii, Y. y Chikamori, K. (2003). *Water Resources Management* 17, 69-88.
- Roscoe Moss (1990). *Handbook of Ground Water Development*. John Wiley and Sons, New York, 276-312.
- Sánchez-Úbeda, J.P., Calvache, M.L., López-Chicano, M., Duque, C. y Martín-Rosales, W. (2013). *Geogaceta* 53, 121-124.
- Zhou, X. (2008). *Hydrological Processes* 22, 3176-3180.