

Estimación de parámetros hidrogeológicos en los acuíferos costeros del Bajo Guadalhorce (Málaga) mediante el análisis de la influencia de las mareas

Hydrogeological parameters assessment by tidal influence analysis in the coastal aquifers of Bajo Guadalhorce (Malaga province, southern Spain)

José Manuel Nieto López, Bartolomé Andreo Navarro y Matías Mudarra Martínez

Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHUMA), 29071 Málaga, España.

nietolopezjm@uma.es, andreo@uma.es, mmudarra@uma.es

ABSTRACT

By the use of continuous data recording on two points of the Bajo Guadalhorce coastal sector (Malaga province, southern Spain), located at 626 m and 985 m inland, it has been possible to verify a clear influence of tidal oscillations on the water table of the unconfined and the confined aquifers. Various methods to estimate aquifer transmissivity have been applied. The results depends on the method and, more important, on the storage coefficient (S) values. After the calculations it is possible to confirm that the time lag and tidal efficiency factor methods give coherent results with previous data, although with the time lag method the transmissivity values are an order of magnitude higher.

Key-words: Tidal influence, time lag, transmissivity, coastal aquifer, Guadalhorce.

RESUMEN

El registro continuo de las variaciones piezométricas en dos puntos del sector costero del Bajo Guadalhorce (Málaga), ubicados a 626 m y 985 m de la línea de costa, ha permitido constatar la influencia de las oscilaciones mareales en los niveles piezométricos de los acuíferos libre y confinado. Se han podido aplicar varias metodologías para estimar la transmisividad de ambos. Los resultados dependen del método utilizado y, en mayor medida, de los valores de coeficiente de almacenamiento (S). Tras los cálculos se puede afirmar que las metodologías de retraso de mareas y eficiencia de mareas presentan resultados coherentes con los datos previos, aunque con el método de retraso de mareas se obtienen valores de transmisividad de hasta un orden de magnitud mayores.

Palabras clave: Influencia de marea, retraso de marea, transmisividad, acuífero costero, Guadalhorce.

Geogaceta, 59 (2016), 39-42
 ISSN (versión impresa): 0213-683X
 ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 3 de junio de 2015
 Fecha de revisión: 20 de octubre de 2015
 Fecha de aceptación: 27 de noviembre de 2015

Introducción

La cuenca sedimentaria de Málaga o del Bajo Guadalhorce ocupa una extensión aproximada de 270 km². Por ella discurre el río Guadalhorce (Fig. 1A). El relleno sedimentario de la cuenca está constituido por una serie de materiales de edad Neógeno-Cuaternario, poco deformados (Sanz de Galdeano y López Garrido, 1991). Los más antiguos son calcarenitas y conglomerados del Mioceno Superior. Sobre éstos se sitúa un conjunto de depósitos pliocenos formados por un conglomerado basal y una potente serie margosa con intercalaciones arenosas hacia techo. El relleno termina con sedimentos cuaternarios fluviales: gravas, arenas, limos y arcillas. Estos sedimentos

constituyen el principal acuífero de la zona, de carácter libre, seguidos en importancia hidrogeológica por las intercalaciones arenosas del Plioceno, en particular, el tramo arenoso que existe hacia techo de las margas pliocenas, que conforman acuíferos semiconfinados. Los mayores espesores del acuífero cuaternario se encuentran en la zona del aeropuerto de Málaga, donde pueden alcanzar hasta 50 metros (Linares *et al.*, 1995). Las intercalaciones arenosas del acuífero plioceno pueden tener potencias máximas de 20 metros.

Entre el acuífero plioceno y el aluvial cuaternario existe una relación hidrogeológica compleja de tal modo que el segundo recarga al primero (Linares *et al.*, 1988). Esto último está favorecido

por el hecho de que las captaciones suelen atravesar a ambos acuíferos (IGME, 1983).

En el sector de la desembocadura, entre los dos brazos del río Guadalhorce, existe un complejo lagunar de origen antrópico (Fig. 1A). Dicho complejo se está investigando actualmente desde el punto de vista hidrológico e hidrogeológico, con el fin de dilucidar su interacción con el río, el mar y los acuíferos subyacentes. Para ello, entre otras acciones, se han realizado medidas puntuales del nivel piezométrico en varios pozos y piezómetros de la zona, con periodicidad mensual, y se han instalado dos sensores para el registro continuo del nivel piezométrico en los sondeos P-1 y P-3 (Fig. 1A y B).

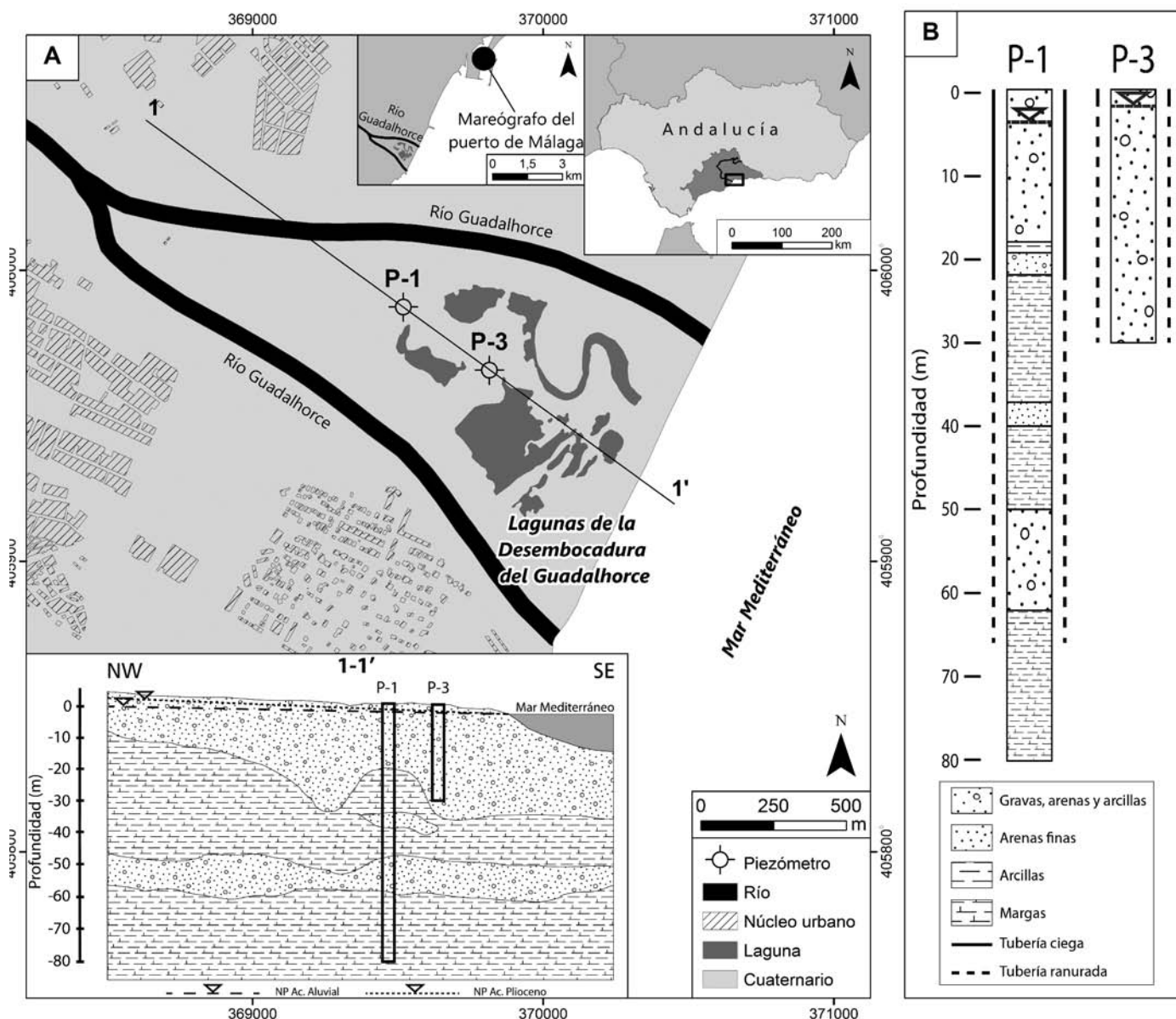


Fig. 1.- A) Localización geográfica del área de estudio y corte hidrogeológico 1-1', donde se muestran los dos brazos del río Guadalhorce y los humedales, así como el corte hidrogeológico 1-1'. Modificado de D.G.O.H. (1995). B) Columnas litológicas de los sondeos P-1 y P-3.

Fig. 1.- A) Geographic location and hydrogeological sketch of the study area (modified from D.G.O.H., 1995) showing the two branches of Guadalhorce river and the wetlands. B) Stratigraphic columns of P-1 and P-3 wells.

Los sensores mencionados anteriormente han permitido registrar variaciones piezométricas en los dos puntos de control, atribuibles a la influencia de las mareas, lo que ha permitido la aplicación de metodologías de retraso de mareas (R) y eficiencia de mareas (EM). Para ello se aplican ecuaciones que permiten estimar la difusividad (T/S) del acuífero y, por tanto, los parámetros transmisividad (T) y permeabilidad (K), bajo un coeficiente de almacenamiento (S) dado. Estos métodos complementan a las técnicas clásicas, de ensayos de bombeo, utilizadas con esta finalidad.

Metodología

Los puntos P-1 y P-3 se encuentran alejados de la línea de costa 985 m y 626 m, respectivamente. Los registros obtenidos mediante los sensores de registro continuo fueron comprobados y corregidos con las medidas puntuales del nivel piezométrico llevadas a cabo en el marco de la presente investigación.

La tubería de los piezómetros P-1 y P-3 está ranurada en los tramos acuíferos plioceno y cuaternario, respectivamente (Fig. 1B), por lo que es posible comparar las metodologías para condiciones semi-

confinadas y libres. La diferenciación de los tramos libre y confinado se puede apreciar en el corte hidrogeológico de la figura 1A.

Con el fin de comparar los registros piezométricos frente a la oscilación mareal se han utilizado los datos de nivel relativo del mar registrados en el mareógrafo "Málaga_3", localizado en el puerto de Málaga, y disponibles en la web de Puertos del Estado (www.puertos.es).

Tanto los registros de nivel piezométrico como de nivel del mar corresponden a un periodo de 3 días, comprendido entre las 00:00 del día 5 de abril de 2015 y las

23:00 horas del día 7 de abril de 2015, con intervalos horarios.

Las ecuaciones de respuesta a las mareas permiten la obtención de parámetros hidrogeológicos a partir de las fluctuaciones cíclicas registradas en los niveles piezométricos. Estas ecuaciones tienen en consideración las características de un acuífero costero, confinado, homogéneo e isótropo. No obstante, son aplicables a acuíferos libres, como el acuífero aluvial cuaternario, cuando la razón entre la fluctuación del nivel piezométrico y el espesor saturado es menor de 0,02 (Roscoe Moss, 1990; Madan Kumar *et al.*, 2003), lo cual se cumple en el caso de este estudio.

Las ecuaciones aplicadas para la estimación de la difusividad en los acuíferos son las que tienen en cuenta el tiempo de retraso de la oscilación del nivel piezométrico respecto a las mareas (R) y la eficiencia de mareas (EM) (Ferris, 1951; Todd, 1980):

$$R = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{t_0 S}{\pi T}} \quad (1)$$

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

donde:

- x = distancia desde la costa al punto
- t₀ = periodo de marea
- S = coeficiente de almacenamiento
- T = transmisividad del acuífero

El valor de EM se ha obtenido mediante la relación entre la amplitud de oscilación del nivel piezométrico y la amplitud de mareas. Los

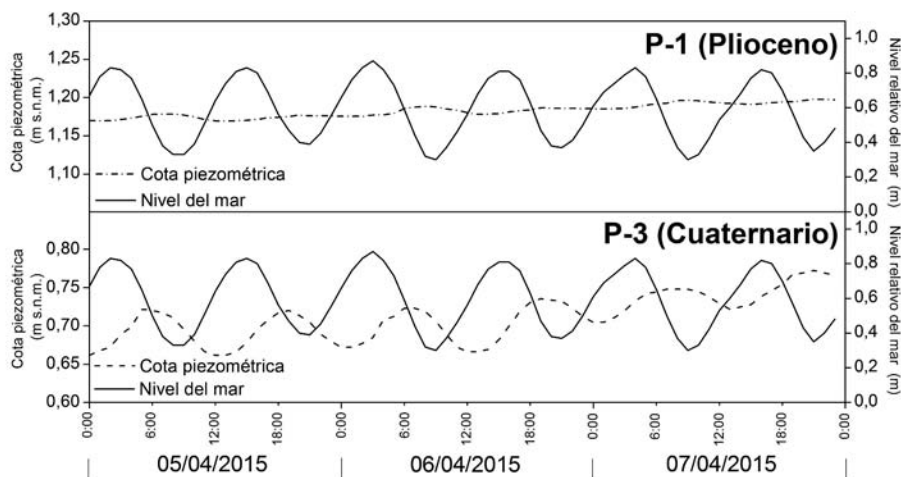


Fig. 2.- Registro de nivel piezométrico y nivel relativo del mar en los puntos P-1 y P-3 del 5 al 7 de abril de 2015, con periodicidad horaria.

Fig. 2.- Water table and relative sea level set data at points P-1 and P-3 corresponding to the 5th to 7th days of April 2015, with hourly measured data.

valores de amplitud han sido calculados con el método de amplitud media (Madan Kumar *et al.*, 2003), de forma similar al estudio realizado por Sánchez-Úbeda *et al.* (2013).

Estas dos expresiones permiten obtener valores de transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S), siempre y cuando se imponga un valor de alguno de esos parámetros para obtener el otro.

Resultados

La comparación de los registros de nivel piezométrico con la variación del nivel del mar refleja de forma clara la relación que existe entre ambos, así como el retraso existente en la propagación de las mareas (Fig. 2). La amplitud media de oscilación de las mareas en el intervalo estudiado es de 0,49 m y el periodo de mareas de 12 horas. La amplitud de los niveles piezométricos es de 0,007 m (P-1) y 0,043 m (P-3), con un periodo de oscilación de 12 horas, que coincide con el de las mareas. Mediante la me-

dición del desfase entre los niveles piezométricos de ambos puntos y las mareas, se obtienen valores medios de retraso de 4,7 horas en P-1 y de 2,6 horas en P-3.

Se han aplicado las ecuaciones (1) y (2) para ambos puntos mediante el empleo de diversos valores de coeficiente de almacenamiento (S), cuyos resultados se reflejan en la Tabla I. Los valores tomados son acordes con las características de cada acuífero. El coeficiente de almacenamiento (S) utilizado para el sondeo P-1 ha sido de 10⁻³ y 10⁻⁴ y para el sondeo P-3 de 10⁻² y 5·10⁻³. Se ha elegido este intervalo de datos a partir de informes previos existentes (IGME, 1983 e Intecsa-Inima, 2004).

Los valores de eficiencia de mareas son menores en P-1 (0,015 m) que en P-3 (0,099 m). Este hecho indica que el acuífero confinado sufre una amortiguación en la propagación de la marea con respecto al libre, aunque se debe tener en cuenta que el punto P-1 está más alejado de la línea de costa que P-3 (Fig. 1A).

Punto	x (m)	R (h)	Amplitud NP (m)	EM	S	Método R		Método EM		Ensayos de Bombeo	
						T (m ² /día)	K (m/día)	T (m ² /día)	K (m/día)	T (m ² /día)	K (m/día)
P-1	985	4,7	0,007	0,015	0,001 0,0001	1.006 100	67 7	348 34	23 2	120-240	8-16
P-3	626	2,6	0,043	0,099	0,01 0,005	13.285 6.642	479 239	4.621 23.11	166 83	4.800- 10.000	7- 1.300

Tabla I.- Valores de transmisividad (T) y permeabilidad (K) calculados mediante los métodos del retraso de mareas (R) y de eficiencia de mareas (EM) y comparación con los obtenidos mediante ensayos de bombeo.

Table I.- Transmissivity (T) and hydraulic conductivity (K) values calculated by time lag (R) and tidal efficiency factor (EM) methods, and comparison with the data obtained from pumping tests.

Los resultados varían en gran medida en función del valor de coeficiente de almacenamiento y del método utilizado. Así, para el sondeo P-1, los datos de transmisividad están comprendidos entre 34 y 1.006 m²/día, intervalo en el que se incluyen los valores calculados en trabajos previos (IGME, 1983) para el acuífero plioceno. En el sondeo P-3 se han obtenido transmisividades entre 2.311 y 13.285 m²/día, por lo que también son acordes con el trabajo previamente mencionado (IGME, 1984) y con el de Intecsa-Inima (2004), para el acuífero aluvial cuaternario.

Con el método de retraso de mareas (R) los valores son significativamente más elevados que con el método de eficiencia de mareas (EM), tal y como se evidencia en otros estudios (Sánchez-Úbeda *et al*, 2013).

La permeabilidad calculada a partir de los datos de transmisividad varía entre 2 y 67 m/día para el acuífero plioceno y entre 83 y 479 m/día para el acuífero aluvial. Presenta valores similares a los estimados por IGME (1983) e ITGE (1996).

Conclusiones

Los valores de eficiencia de mareas (EM) y retraso de mareas (R) obtenidos reflejan la amortiguación que sufre la propagación de las mareas en el acuífero. Presentan valores más bajos de eficiencia, y más altos de retraso, cuanto más alejado está el punto de la costa. Asimismo, se aprecia un descenso en la propagación de la marea en el acuífero plioceno.

Por otro lado, los valores de coeficiente de almacenamiento utilizados para el cálculo en el acuífero libre son meramente orientativos, debido a que los ensayos de bombeo realizados en la zona (IGME, 1983, e ITGE, 1996) aportan valores muy diversos, desde 10⁻⁴ a 0,2. Esta variabili-

dad, así como el amplio rango de transmisividades y permeabilidades calculadas mediante ensayos de bombeo, reflejan la heterogeneidad del acuífero aluvial a lo largo de su extensión.

Los valores de transmisividad que se han calculado para ambos acuíferos en el tramo de la desembocadura concuerdan con los estimados por trabajos previos, con valores de entre 34 y 1.006 m²/día para el acuífero plioceno y entre 2.311 y 13.285 m²/día para el libre.

Cabe destacar la validez de la aplicación de los métodos de retraso de mareas y eficiencia de mareas para acuíferos confinados y libres, aunque el método de eficiencia de mareas (EM) presenta valores sensiblemente inferiores, con valores de transmisividad de aproximadamente un orden de magnitud menor que por el método de retraso de mareas (R).

Las transmisividades calculadas confirman las afirmaciones de Madan Kumar (2003), quien asegura que la ecuación de eficiencia de mareas es más apropiada para acuíferos libres, aunque el método de retraso de mareas aporta resultados concordantes con los de estudios previos.

Por tanto, los métodos de estimación de parámetros hidráulicos en acuíferos mediante el análisis de la influencia de las mareas en los registros del nivel piezométrico son una herramienta aplicable y se acercan a la realidad. Constituyen un complemento de otros métodos de estimación de parámetros hidrogeológicos más comunes, como los ensayos de bombeo.

Agradecimientos

Este trabajo constituye una contribución del Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía al Proyecto Europeo EAGUA.

Se agradece la colaboración de la Consejería de Medio Ambiente y Territorio de la

Junta de Andalucía y de la Agencia Andaluza de Medio Ambiente y Agua en las tareas de investigación en el Paraje Natural Desembocadura del Guadalhorce.

Son de agradecer las aportaciones realizadas por los revisores para la mejora del trabajo final.

Referencias

- Ferris, J.G. (1951). *International Association of Scientific Hydrology*, Publ. 33, 148-155.
- IGME (1983). *Investigación hidrogeológica de las cuencas del sur de España (sector occidental)*. Informe técnico nº 5, Sistema Acuífero nº 37 (Detrítico de Málaga), 130 p.
- Intecsa-Inima (2004). *Asistencia técnica para la realización del estudio de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca del río Guadalhorce*. Informe Técnico, 474 p.
- ITGE (1996). *Investigación hidrogeológica para apoyo a la gestión hidrológica en el Bajo Guadalhorce (Cuenca del Sur de España, Málaga)*. Tomo I. Base hidrogeológica, 178 p.
- Linares, L., López Geta, J.A. y Parra y Alfaro, J.L. (1988). En: *TIAC '88, Tecnología de la intrusión en acuíferos costeros*, 287-315.
- Linares, L., López-Arechavala, G., López-Geta, J.A. y Rubio, J.C. (1995). En: *VI Simposio de Hidrogeología*, Sevilla, 19, 435-447.
- Madan Kumar, J., Kamii, Y. y Chikamori, K. (2003). *Water Resources Management* 17, 69-88.
- Roscoe Moss Company (1990). *Handbook of Ground Water Development*. John Wiley and Sons, N.Y. 276-312.
- Sánchez-Úbeda, J.P., Calvache, M.L., López-Chicano, M., Duque, C. y Martín-Rosales, W. (2013). *Geogaceta* 53, 121-124.
- Sanz de Galdeano, C. y López Garrido, A.C. (1991). *Geodinamica Acta*, 5, 173-186.
- Todd, D.K. (1980). *Groundwater Hydrology*, John Wiley and Sons, Inc., N.Y., 535 p.