

Análisis de tendencia de contaminantes en la masa de agua subterránea Fuente de Piedra (provincia de Málaga)

Trend assessment of pollutants in Fuente de Piedra groundwater body (Málaga province)

Román González Báez, Pablo Jiménez Gavilán e Iñaki Vadillo Pérez

Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga, Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga, 29071.
romgb7@gmail.com, pgavilan@uma.es, vadillo@uma.es

ABSTRACT

European legislation aims to achieve good groundwater chemical status. It is essential to monitor and detect trends in the increase of pollutants concentration. Despite the importance of this point, there is no specific test to detect these trends, so various tests are commonly applied. In this work, a combination of parametric (linear regression), non-parametric (Mann-Kendall) and descriptive (Ozgun) methods is proposed. This methodological proposal has been applied to data from the groundwater quality control network of Fuente de Piedra (Málaga, Southern Spain) groundwater body. The irregularity of the data series and the important degree of exploitation of this groundwater body make this system an ideal scenario for contrasting these types of methods.

Key-words: Water Framework Directive, trend assessment, linear regression, Mann-Kendall, Fuente de Piedra.

RESUMEN

La normativa europea persigue alcanzar el buen estado químico de sus aguas subterráneas. Para ello es fundamental controlar y detectar tendencias en el aumento de la concentración de contaminantes. Pese a la importancia de esta cuestión, no existe un test específico para detectar estas tendencias, por lo que se suelen aplicar varios. En este trabajo se propone una combinación de métodos paramétricos (regresión lineal), no paramétricos (Mann-Kendall) y descriptivos (Ozgun). Esta propuesta metodológica ha sido aplicada a los datos de la red de control de calidad del agua subterránea de la masa de agua subterránea (MASb) de Fuente de Piedra (Málaga, sur de España). La irregularidad de las series de datos y el importante grado de explotación de esta MASb hacen de este sistema un escenario ideal para contrastar este tipo de técnicas.

Palabras clave: Directiva Marco del Agua, evaluación de tendencias, regresión lineal, Mann-Kendall, Fuente de Piedra.

Geogaceta, 63 (2018), 43-46
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 20 de junio de 2017
Revisión: 18 de octubre 2017
Aceptación: 23 de octubre 2017

Introducción

La aplicación de la Directiva Marco del agua (DMA; 2000/60/CE) y posteriormente de la Directiva de Aguas Subterráneas (DAS) (2006/118/CE) establece la necesidad de tener un buen estado químico de todas las masas de agua, así como de determinar tendencias al aumento significativas de concentraciones de contaminantes en las aguas subterráneas.

En el anejo IV.A de la Directiva 2006/118/CE (European Commission, 2008), se establece que la evaluación de las tendencias debe estar basada en un método estadístico como el análisis de regresión, pero "No se impone un procedimiento específico siempre que el método utilizado sea estadísticamente reconocido".

En el presente estudio, se expondrán diferentes posibilidades para realizar este

análisis de tendencia y concluir cuál sería el método más acertado. Para ello, se aplicará un método descriptivo, un método paramétrico y un método no paramétrico.

Otro de los objetivos es el de analizar las tendencias observadas en las redes de control oficiales de la masa de agua subterránea 060.034 Fuente de Piedra. La mayor parte de las redes ofrecen unas series muy irregulares, con pocos datos y con posibles errores de medida (Urresti-Estala *et al.*, 2016), por lo que presenta un buen entorno para comparar la significancia y representatividad de los diferentes métodos.

Características del área de estudio

La masa de agua subterránea de Fuente de Piedra se localiza al norte de la provincia

de Málaga (Fig. 1), en el sur de España. Ocupa una extensión de 150 km², coincidiendo los límites de la masa de agua con los de la cuenca hidrográfica, de manera que los recursos superficiales y subterráneos no explotados, alimentan a la laguna endorreica de Fuente de Piedra (Linares, 1990).

Desde un punto de vista geológico, la masa de agua de Fuente de Piedra se emplaza en la Zona Externa de la Cordillera Bética, en el denominado Complejo Caótico Subbético (Martín-Algarra y Vera, 2004). En él, se distinguen diferentes unidades (Fig. 1).

La base de dicho complejo está compuesta por los materiales triásicos en facies germano-andaluzas, conformando un sustrato arcilloso-evaporítico. Sobre estos mismos se reconocen, de forma desorganizada, unidades jurásicas, cretácicas y miocenas (Linares, 1990).

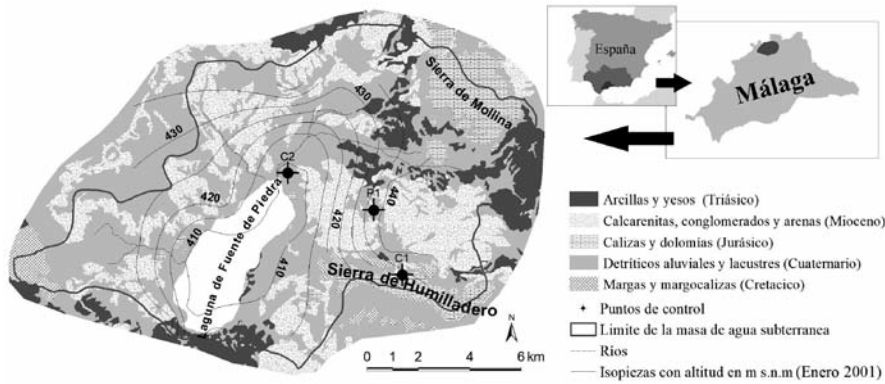


Fig 1.- Mapa hidrogeológico, situación de los puntos de control y situación de la cuenca.

Fig. 1.- Hydrogeological map, situation of sampling points and situation of basin.

Las unidades jurásicas carbonáticas, como las de Sierra Humilladero o la de Sierra de Mollina, están compuestas por dolomías, calizas y margocalizas, presentando espesores de hasta 500 m (Pedrera *et al.*, 2016). La unidad cretácica, formada por margas y margocalizas, no tiene apenas presencia en el área de estudio, mientras que los materiales del Mioceno superior, los cuales están compuestos fundamentalmente por calcarenitas y margas, muestran un espesor variable que puede superar los 100 m. Estos materiales afloran en la mayor parte del área de estudio, en continuidad con los materiales cuaternarios, compuestos por sedimentos detríticos aluviales y lacustres, y con un espesor que apenas alcanza los 15 m (Linares, 1990).

Respecto al comportamiento de las diferentes litologías como acuíferos, se observan dos acuíferos claramente diferenciados. El post-orogénico, de tipo detrítico, muestra un comportamiento muy similar para la formación cuaternaria y miocena, con una alta permeabilidad, y los jurásicos (acuíferos de la Sierra de Humilladero y de Mollina-La Camorra), con un alto grado de karstificación, donde el tránsito del agua por la zona no saturada es muy rápido (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2016a).

Hay continuidad hidrogeológica entre ambos, de manera que, al producirse un flujo hacia la laguna, son las formaciones jurásicas las que alimentan con sus aguas a la formación post-orogénica. Al mismo tiempo, hay que considerar que, bajo estas formaciones, se encuentran los materiales triásicos, con una permeabilidad baja, pero de carácter acuitado y saturados con aguas de elevada salinidad, aunque existen posturas contrarias respecto a la existencia o no de flujos profundos que alimenten a la laguna (Montalván *et al.*,

2017, Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2016b; Kohfahl *et al.*, 2008).

Material y métodos

Los más de 40 puntos de muestreo que el Instituto Geológico y Minero Español (IGME) mantuvo desde 1977 hasta 2002 como red oficial de calidad de aguas (pozos y sondeos) se redujeron a tres (Fig. 1), que son los que conforman la actual red oficial de control de calidad de la masa de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA). Para este trabajo, se han recopilado los datos de dicha red de control de calidad. El control por parte de la DHCMA ha sido muy irregular, ya que en ciertos años se encuentran dos medidas, mientras que existen periodos de varios años sin ningún dato.

El diagrama de Piper de todas las muestras recopiladas (Fig. 2) permite comprobar que los tres puntos de control analizan aguas diferentes. Así, el sondeo C.06.34.001-B (C1), con 116 m de profundidad, presenta aguas con facies bicarbonatadas, del acuífero jurásico de Sierra de Humilladero; del punto C.06.34.002-B (C2), con 14 m de profundidad, se muestrean aguas de los materiales acuitados triásicos. Por último, en el piezómetro P.06.34.001-B (P1), se muestrean aguas con alto contenido en nitratos, relacionados con la actividad agrícola, la cual se desarrolla mayoritariamente sobre el acuífero mioceno, que es el que capta este sondeo, con 45 m de profundidad.

En el presente trabajo se han evaluado las tendencias de tres variables hidroquímicas (NO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}), que según los anexos I y II de la DAS, constituyen indicadores que pueden estar presentes de modo natural y/o como resultado de las actividades humanas, y de la conductividad eléctrica (CE) como va-

riable indicativa de procesos de salinización.

Se han analizado las tendencias haciendo uso de tres métodos diferentes. El método descriptivo que se ha usado es el método de Ozgur (Kisi y Ay, 2014), que constituye una evolución del método gráfico convencional.

Como método paramétrico se ha hecho uso de la regresión lineal (RL), que cuantifica la tendencia, y posteriormente, se verifica con la prueba T de Student si es estadísticamente fiable al 95%.

Y como método no paramétrico, se ha usado el Test Estacional de Mann-Kendall (Hirsch *et al.*, 1982), el cual indicó la presencia de pendientes, que posteriormente se cuantificaron con la aplicación de la pendiente de Sen. Para su aplicación se utilizó una hoja Excel denominada MAKESENS (Finnish Meteorological Institute, 2002) donde se han programado ambas pruebas.

Los resultados de pendientes se han obtenido para un nivel de significancia máximo de 0,05, tal y como indica la guía "Estrategia común de implantación de la Directiva Marco del Agua" (European Commission, 2008)"

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos (Tabla I) ponen de manifiesto varios procesos y fenómenos que se analizarán a continuación.

El acuífero jurásico de Sierra Humilladero (punto de control C1) es de gran importancia, ya que sirve de abastecimiento a las poblaciones de Fuente de Piedra y de Humilladero, por lo que las tendencias ascendentes que se observan son muy preocupantes. Especialmente en lo que respecta al contenido de cloruro y de sodio, dado que

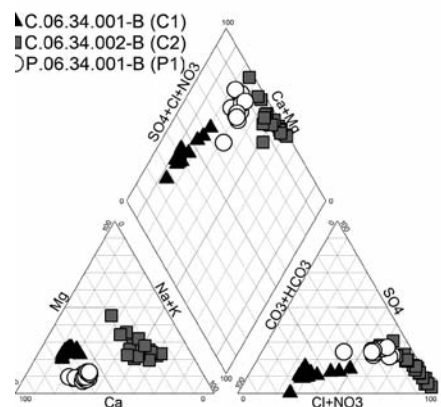


Fig. 2.- Diagrama de Piper

Fig. 2.- Piper diagram

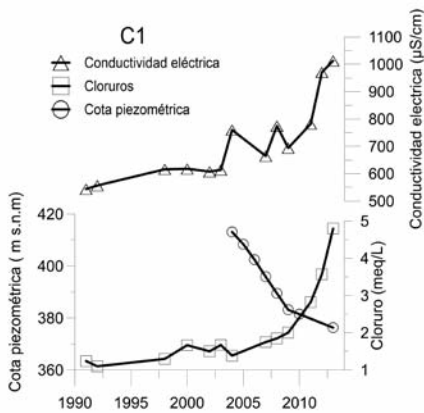


Fig. 3.- Evolución de la cota piezométrica, conductividad eléctrica y cloruro en C1

Fig. 3.- Evolution of piezometric level, electrical conductivity and chloride in C1

se está provocando una salinización y un aumento de la conductividad eléctrica del agua subterránea (en adelante CE), la cual estaba en 544 $\mu\text{S}/\text{cm}$, al principio de la serie en 1991, y tiene un valor de 1013 $\mu\text{S}/\text{cm}$, al final de la misma en 2013.

Esta tendencia se puede entender con la evolución piezométrica (Fig. 3). El nivel piezométrico al final de la serie se encuentra a cota inferior (376 m s.n.m.) a la de la propia laguna (409 m s.n.m.), por lo que existen las condiciones para entender que se ha provocado una inversión en los flujos hacia Sierra Humilladero, ya que el descenso del nivel piezométrico observado desde 2003 es de 49 m.

Como se ha mencionado anteriormente, en régimen natural existía un flujo desde la formación jurásica hasta la laguna, pasando por el acuífero mioceno y cuaternario, pero

en esta situación el flujo se ha invertido, provocando que aguas de peor calidad, como las del acuífero mioceno, o incluso aguas profundas del triásico, se mezclen con las del acuífero jurásico y deterioren la calidad de unas aguas que son necesarias para el consumo de las poblaciones mencionadas (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2016b).

El hecho de que los nitratos sean el único contaminante que no tiene tendencia clara, o esta incluso sea descendente según Ozgur (Fig. 4), se puede entender si se observa la tendencia en el resto de puntos de control. Así, a partir de la red de la que se dispone para el presente trabajo, se observa que la contaminación por nitratos se está viendo reducida en el acuífero mioceno, lo cual provoca que, aunque se hayan invertido los flujos hacia la Sierra de Humilladero, los nitratos que llegan a estas aguas no aumenten apreciablemente y su máximo se establezca en 36 mg/L.

Respecto al acuitardo triásico (punto de control C2) que conforma la base de la masa de agua, se comprueba que las tendencias son descendentes para Cl^- , es decir, disminuye la salinidad, y, por lo tanto, la CE. Una posible explicación de estas tendencias naturales podrían estar relacionadas, tal y como propone Montalván *et al.* (2017) en su modelo de funcionamiento hidrogeológico de este sistema acuitardo, con procesos de dilución (años húmedos) y evaporación local (años secos) de salmueras poco profundas, que unido a un registro de datos muy corto (10-15 años), provoca que estos procesos puedan marcar notablemente la tendencia.

Así, con la representación de la CE junto con sulfatos y cloruros (Fig. 5), se observa que CE y cloruros evolucionan de forma muy similar, mientras que el sulfato muestra un comportamiento diferente (no tendencial; Tabla I), que podría deberse a que junto con los procesos de dilución y evaporación, esta salmuera evoluciona como el producto de mezcla de flujos de diferente salinidad y densidad provenientes de la disolución de evaporitas, de la disolución de materiales yesíferos-margosos y de una salmuera profunda existente alrededor de la laguna (Montalván *et al.*, 2017). No obstante, esta evolución podría también explicarse a través de células o flujos convectivos propuestos por Kohfahl *et al.*, (2008) y Rodríguez-Rodríguez *et al.*, (2016b), ya que a pocos centos de metros del borde norte de la laguna (donde se sitúa el punto de control), como consecuencia de las permeabilidades elevadas de los materiales de este sector, se facilita un flujo subsuperficial de baja mineralización que provoca procesos de mezcla con aguas subterráneas más mineralizadas que dan lugar a flujos convectivos que explicarían el comportamiento diferente de cloruros y sulfatos.

En lo que respecta al acuífero mioceno (punto de control P1), se trata de la de mayor extensión superficial, y sobre la cual se desarrollan la mayoría de las actividades potencialmente contaminantes. Este hecho se ve reflejado en valores máximos de 501 mg/L de nitrato o 255 mg/L de sulfatos (Tabla I), pero a pesar de tener una contaminación evidente, se debe explicar por qué las tendencias son descendentes. La serie

	Punto de control C1				Punto de control C2				Punto de control P1			
	NO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
n	13	13	13	13	18	18	18	18	14	14	14	14
Max	36,0	69,5	170,0	1013,0	185,0	908,5	6400,0	17470,0	501,9	255,1	283,7	4810,0
Min	13,1	1,0	39,0	544,0	1,6	260,0	460,0	2350,0	66,8	91,5	78,1	874,0
Media	28,7	38,9	72,7	709,0	114,5	527,7	2706,6	8640,4	210,6	188,5	230,4	1760,3
Desviación	5,7	16,4	38,0	147,8	43,4	169,0	1860,5	1952,1	127,0	43,7	55,6	917,9
Año inicio serie	1991	1991	1991	1991	1985	1985	1985	1985	2002	2002	2002	2002
Año final serie	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013
Ozgur	↓	↑	↑	↑	-	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Pendiente RL	-	1,0	6,2	23,5	-	-	-194,4	-458,3	-13,5	-3,9	-5,1	-67,6
Significancia RL	-	*	**	***	-	-	***	***	**	*	**	*
Pendiente de Sen	-	1,1	3,4	14,7	-	-	-163,6	-548,8	-10,4	-3,8	-4,2	-20,6
Significancia Sen	-	*	***	***	-	-	***	***	*	*	**	*

↑ : Tendencia creciente ↓ : Tendencia decreciente - : no hay tendencia RL : Regresión lineal

Significancia: * para $\alpha=0,05$; ** para $\alpha=0,01$; *** para $\alpha=0,001$

Tabla I.- Estadísticas y resultados

Table I.- Statistics and results

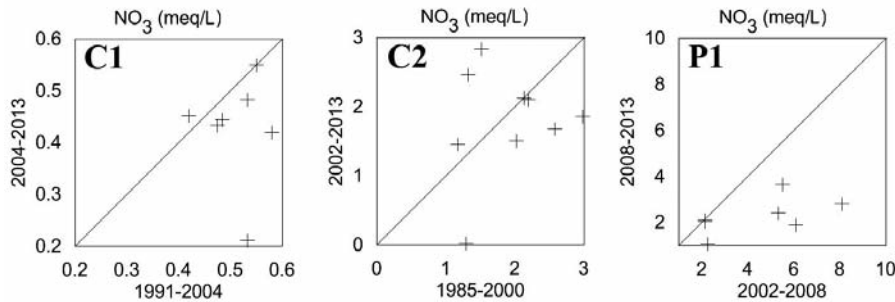


Fig. 4.- Gráficas de Ozgur para nitratos
Fig. 4.- Ozgur's graphs for nitrates

comienza en 2002, por lo que podría entenderse, en función a las tendencias obtenidas, esta tendencia como una consecuencia de la entrada en vigor de la DMA, es decir, una concienciación por parte de las comunidades agrícolas y ganaderas en la que, mediante el uso de buenas prácticas están reduciendo el uso de sustancias contaminantes (aunque claramente insuficientes) y, por lo tanto, su concentración en las aguas subterráneas. A pesar de que la tendencia sea ligeramente descendente, las concentraciones de nitratos siguen siendo muy altas, ya que el último dato de la serie,

cientes que dificultan notablemente la adecuada implantación de la DMA y la DAS, por lo que es realmente necesaria una mejora en las redes de control por parte de la DHGMA, para poder realizar correctamente dicha implantación. Por ello, es necesario aumentar la cantidad de puntos de control, así como la periodicidad de las medidas si se quiere realizar un correcto seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas en la cuenca de Fuente de Piedra.

Las tendencias de origen antrópico de las variables analizadas, en un acuífero tan importante para el abastecimiento como es el de la Sierra de Humilladero, reflejan los notables problemas que puede acarrear una explotación sin control y no coordinada por los municipios de Humilladero y Fuente de Piedra. El acusado descenso del nivel piezométrico, que provoca la mencionada inversión de los flujos de la cuenca, está desembocando en un empeoramiento evidente de las aguas de este acuífero, que se refleja en un aumento de la CE, y en una primera fase de deterioro de facies bicarbonatadas cálcicas a facies más cloruradas sódicas.

Respecto a los métodos de análisis y cuantificación de tendencias aplicados se puede destacar lo siguiente:

- El método descriptivo de Ozgur es un método rápido, sencillo y de gran utilidad, pero pierde la fiabilidad al encontrar casos en los que las tendencias no son claras.

- El método paramétrico de regresión lineal es un buen método para las situaciones en las que no hay grandes ausencias de datos. El uso de un estadístico como T de Student es muy importante para verificar la significancia real de la tendencia analizada.

- El método no paramétrico de Mann-Kendall es la herramienta que mejor resultados ha dado debido a la irregularidad y poca representatividad que presentan los datos de contaminantes en estas masas de aguas sub-

terráneas, ya que es el único que tiene en cuenta las ausencias de datos en las series, interpretándolas estadísticamente, por lo que debe ser considerado el test de referencia.

Agradecimientos

Un reconocimiento expreso a un revisor anónimo, al Dr. S. Martos Rosillo y a los editores de Geogaceta por sus contribuciones y recomendaciones para la mejora de este manuscrito.

Referencias

- European Commission (2008). *Common Implementation Strategy For The Water Framework Directive (2000/60/EC). Guidance Document No. 18. Guidance On Groundwater Status And Trend Assessment.*
- Finnish Meteorological Institute (2002). *Mann-Kendall test and Sen's Slope Estimates for the trend of annual data.* <http://en.ilmatie teenlaitos.fi/makesens>.
- Hirsch, R.M., Slack, J.R. y Smith, R.A. (1982). *Water Resources Research* 18, 107-121.
- Kisi, O. y Ay, M. (2014). *Journal of Hydrology* 513, 362-375.
- Kohfahl, C., Rodríguez, M., Fenk, C., Menz, C., Benavente, J., Hubberten, H., Meyer, H., Paul, L., Knappe, A. y López-Geta, J.A. (2008). *Journal of Hydrology* 351, 170-187.
- Linares, L. (1990). *Hidrogeología de la Laguna de Fuente de Piedra.* Tesis Doctoral. Univ. de Granada, 309 p.
- Martin-Algarra, A. y Vera, J.A. (2004). En: *Geología de España* (Ed: J.A. Vera), Ed. Sociedad Geológica de España, Madrid. 352-354 p.
- Montalván, J., Heredia J., Ruiz J.M., Pardo-Igúzquiza E., García de Domingo, A. y Elorza F.J. (2017). *Science of the Total Environment* 576, 335-346.
- Pedraza, A., Martos-Rosillo, S., Galindo-Zaldívar, J., Rodríguez-Rodríguez, M., Benavente, J., Martín-Rodríguez, J.F. y Zúñiga-López, M.I. (2016). *Journal of Applied Geophysics* 129, 17-27.
- Rodríguez-Rodríguez, M., Martos-Rosillo, S., Pedraza, A. y Cruz Berlanga, M. (2016a). *Hydrobiologia* 782(1), 145-154.
- Rodríguez-Rodríguez, M., Martos-Rosillo, S. y Pedraza, A. (2016b). *Journal of Hydrology* 543, 462-476.
- Urresti-Estala, B., Jiménez-Gavilán, P., Vadillo-Pérez, I. y Carrasco-Cantos, F. (2016). *Environmental Science and Pollution Research* 23, 15990-16005.

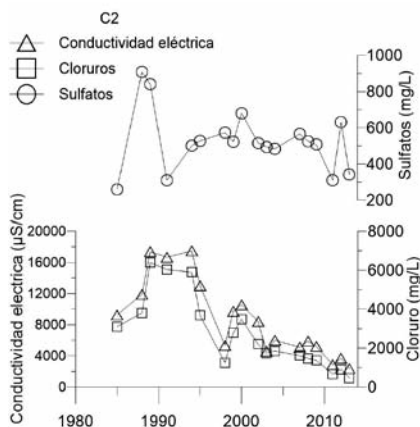


Fig. 5.- Evolución de sulfato, conductividad eléctrica y cloruro en C2
Fig. 5.- Evolution of sulphate, electrical conductivity and chloride in C2

de 2013, supera los 131 mg/L, lo cual indica las fuertes presiones a las que está sometido este acuífero.

Conclusiones

En el presente estudio, se pone de manifiesto lo importante que es disponer de registros de datos continuos y representativos con los que poder aplicar métodos estadísticos fiables. En este caso nos encontramos con unos registros muy defi-