Evaluación de tendencias de contaminantes en la masa de agua Bajo Guadalhorce (sur de España). Aplicación del test estadístico de Mann-Kendall

Trend study and assessment of pollutants in Guadalhorce river basin. Application of statistical test of Mann-Kendall

Begoña Urresti Estala[1], Francisco Carrasco Cantos[1], Loreto Fernández Ruíz[2] y Pablo Jiménez Gavilán[1]

[1] Departamento de Geología, Centro de Hidrogeología (CEHIUMA), Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n, 29071 Málaga, España.
b.urresti@uma.es, fcarrasco@uma.es, pgavilan@uma.es
[2] Instituto Geológico y Minero, C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. ml.fernandez@igme.es

ABSTRACT

The Water Framework Directive encourages Member States to study trends of contaminants within the framework of the additional characterization of groundwater bodies. However, do not specify how they should be carried out such studies. In this paper, we show the advantages of using non-parametric method of Mann-Kendall and their use with Sen Slope and applied in the assessment of trends in the concentration of different substances in the groundwater of Bajo Guadalhorce.

Key-words: *Water Framework Directive, trend assessment, Man-Kendall, Bajo Guadalhorce.*

RESUMEN

La Directiva Marco del Agua insta a los estados miembros al estudio de las tendencias de contaminantes dentro del marco de la caracterización adicional de las masas de agua subterránea. Sin embargo, no se especifica la forma en que debe llevarse a cabo dicho estudios. En el presente trabajo, se mostrarán las ventajas del empleo del método no-paramétrico de Mann-Kendall y su utilización conjunta con la pendiente de Sen y se aplicará en la evaluación de tendencias de la concentración de distintas sustancias presentes en la masa de agua subterránea del Bajo Guadalhorce.

Palabras clave: *Directiva Marco del Agua, evaluación de tendencias, Mann-Kendall, Bajo Guadalhorce.*

Geogaceta, 52 (2012), 157-160.
ISSN 2173-6545

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2012
Fecha de revisión: 26 de abril de 2012
Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2012

Introducción

La Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (DMA), y de forma más concreta la Directiva de Aguas Subterráneas 2006/118/CE (DAS), insta a los estados miembros a la evaluación de las tendencias de contaminantes para aquellas masas de agua subterránea identificadas en riesgo en la caracterización inicial realizada en el año 2005. Sin embargo, no especifica la metodología a emplear en su estimación, indicando únicamente que deberá basarse en un método estadístico conocido y apropiado, como el análisis de regresión

El presente estudio muestra una aplicación del empleo del método no paramétrico del test estacional de Mann-Kendall y la pendiente de Sen sobre las variaciones producidas en las tendencias de la concentración de las distintas sustancias contaminantes presentes en la masa de agua subterránea denominada 060.037 Bajo Guadalhorce.

Tiene, además, el objeto de evaluar los posibles cambios sucedidos al amparo de la progresiva entrada en vigor de la DMA, así como de otras directivas europeas de protección de las aguas. Para ello se evalúan las tendencias de las distintas sustancias contaminantes durante los 20 años anteriores a la entrada en vigor de la DMA (1980-2000) y de los 11 trascurridos desde la misma (2000-2011).

Metodología

La forma de calcular las tendencias de contaminantes ha sido muy discutida en los últimos años, con especial relevancia tras la entrada en vigor de la DMA. En este marco se desarrollaron documentos tales como *Technical report nº 1 The EU Water Framework Directive: statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation of monitoring result* (Grath *et al.,*2001), de donde se obtuvo una serie de documentos y recomendaciones que indicaban las técnicas no paramétricas como las más apropiadas para la evaluación de tendencias.

La mayoría de estas técnicas no paramétricas están basadas en el test de Mann-Kendall (MK), (Mann, 1945; Kendall, 1975), que tras la modificación realizada por Hirsch (Hirsch *et al.,* 1982) permite la eliminación de la componente estacional que hacía inviable la utilización de este test con datos de calidad de aguas. Así se origina el Test Estacional de Mann Kendall (SMK).

Un problema que se plantea con la aplicación del SMK es que permite la identificación de tendencias ascendentes o des-

Copyright© 2012 Sociedad Geológica de España / www.geogaceta.com

cendentes, pero no su cuantificación. Para ello, la pendiente de Sen (Sen, 1968) es capaz de cuantificar la magnitud de la pendiente en los casos que se detecte una tendencia monotónica, bien sea ascendente o descendente.

Así pues, se pretende demostrar la utilidad del test de Mann-Kendall para la detección de tendencias en datos de calidad de aguas como herramienta básica para la gestión de ecosistemas acuáticos y su aplicación en masas de agua subterránea, tomando como ejemplo datos de calidad de aguas de la MASb 060.037 situada en la cuenca hidrográfica del río Guadalhorce.

Para tratar los datos de cada punto de control e identificar las tendencias, se ha utilizado una aplicación de Excel denominada MAKESENS (Finnish Meteorological Institute, 2002) que realiza tanto el test de MK, como la estimación de la pendiente de Sen.

Características de la zona de estudio

La cuenca del río Guadalhorce está situada en el sur de España, concretamente en la zona central de la provincia de Málaga (Fig. 1A). Tiene 3.157 km^2 de superficie, lo que supone algo más del 40% de la extensión total de la provincia. La cuenca cuenta con 24 masas de agua, de las cuales la mitad son de naturaleza carbonática, 8 son detríticas, 3 mixtas y sólo una evaporítica.

La MASb Bajo Guadalhorce, está conformada por un acuífero aluvial cuaternario, con una superficie aproximada de 115 km^2 y un espesor cercano a los 50 m, y el acuífero confinado plioceno con espesores no superiores a los 20 m (Vadillo *et al., 2007*).

Se ha seleccionado esta masa debido a que; en primer lugar, se trata de una masa definida en riesgo químico en la caracterización inicial de la cuenca del río Guadalhorce y en segundo lugar debido a que los numerosos registros con los que cuenta permiten hacer una evaluación de tendencias significativa desde el punto de vista estadístico tanto previa como posterior a la entrada en vigor de la DMA. Las numerosas presiones a las que se ve sometida (agricultura, industria, extracciones, intrusión marina, etc.) también la hacen apropiada para evaluar las tendencias de diferentes parámetros como; sulfatos, nitratos, cloruros,

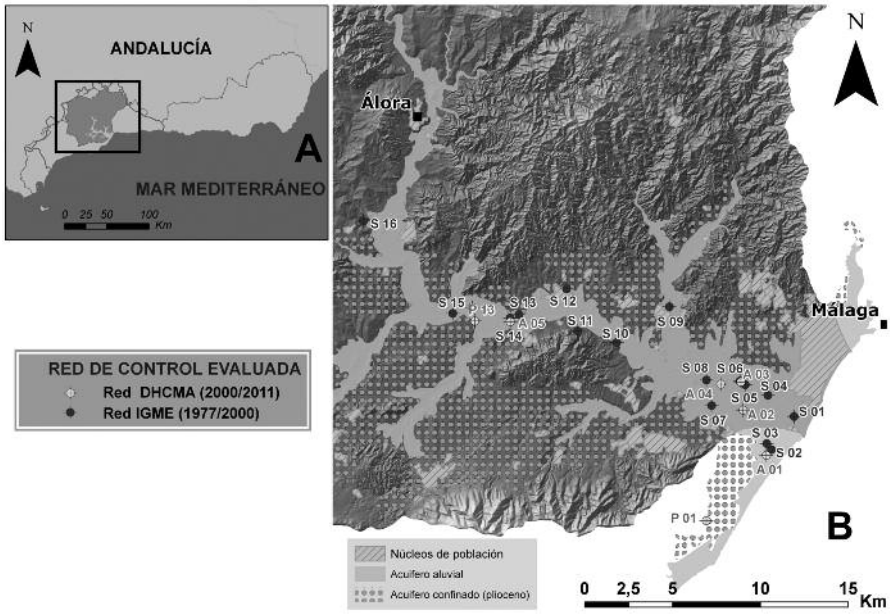


Fig.1 Situación de la cuenca del río Guadalhorce (A). Acuífero aluvial del río Guadalhorce y red de control empleada en la evaluación de tendencias (B).

Fig.1.-Situation of the Guadalhorce river basin (A). Guadalhorce alluvial aquifer and control network used in trend assessment (A).

metales, etc., y su hidrodinámica, característica de acuíferos detríticos aluviales (mayores tiempos de residencia, menores tasas de renovación, flujos más lentos, etc.), permite identificar posibles tendencias más fácilmente que en acuíferos de naturaleza carbonática.

Puntos de muestreo y parámetros analíticos estudiados

Para la realización de este trabajo se han utilizado datos históricos de 16 estaciones de calidad de aguas (pozos y sondeos) procedentes de la base de datos Aguas XXI del IGME, distribuidas por el acuífero aluvial y un único punto ubicado en el acuífero confinado plioceno (Fig. 1B).

Se han evaluado los 16 puntos de control con las series de registros más extensas para realizar un estudio de tendencias significativo desde el punto de vista estadístico. El número de registros varía entre 20 y 35, con una periodicidad anual o semestral. Se han tomado también los datos de la actual red de control perteneciente a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA), que cuenta con 7 estaciones (sondeos) de calidad de aguas para esta masa, ubicadas en las inmediaciones de la ciudad de Málaga y de la población de Cártama.

Los parámetros hidroquímicos analizados son aquellos que se recogen en los anexos I y II de la Directiva de Aguas Subterráneas 2006/118/CE:

a) Sustancias, o iones o indicadores que puedan estar presentes de modo natural y/o como resultado de las actividades humanas: As, Cd, Pb, Hg, NH_4^+, Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-.

b) Sustancias sintéticas artificiales: *Tricloroetileno y tetracloroetileno.*

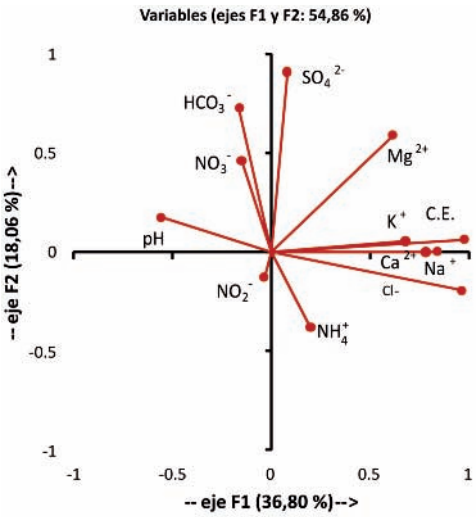
c) Parámetros indicativos de salinización o de otras intrusiones: Conductividad.

Las tendencias que se muestran son las correspondientes a los parámetros que más influencia presentan en la variabilidad del sistema, obtenidos como resultado de la aplicación de técnicas multivariantes (Análisis de Componentes Principales-ACP) a la totalidad de los registros considerados.

Resultados y discusión

El ACP realizado (Fig. 2) muestra la relación entre las variables observadas, así como las variables con más peso a la hora de explicar la masa de agua objeto de estudio.

Como puede apreciarse las variables con más peso en el factor 1 son la conductividad eléctrica, los cloruros y el sodio, por lo que se deduce que el factor 1 representa a la mineralización de las aguas. Con respecto al factor 2, las variables con más relevancia son los sulfatos, los bicarbonatos y los nitratos y por otro lado el amonio. El resto de variables apenas tienen peso por



Contribuciones de las variables (%):

PARÁMETRO	F1	F2	F3
C.E.	21.5	0.2	0.5
Cl^-	20.8	1.7	0.7
Mg^{2+}	8.5	16.2	0.3
NO_3^-	0.5	10.0	35.6
K^+	10.4	0.2	17.6
Na^+	15.9	0.0	2.2
SO_4^{2-}	0.1	38.4	2.5
NH_4^+	0.9	6.6	14.2
Ca^{2+}	13.7	0.0	8.7
HCO_3^-	0.6	24.5	3.7
NO_2^-	0.0	0.7	0.2
pH	7.1	1.4	14.0

Fig.2- Análisis de componentes principales correspondiente a los registros de la masa de agua subterránea del Bajo Guadalhorce.

Fig.2.- Principal component analysis for the records in the groundwater of the Bajo Guadalhorce.

lo que se interpreta que el factor 2 representa a las condiciones redox del acuífero. Por último, el factor 3 está fuertemente condicionado por los nitratos, el potasio y el amonio, todos ellos con un origen común en los fertilizantes, por lo que el factor 3 corresponde a la fertilización y la antropización.

Las variables obtenidas como representativas del sistema objeto de estudio, son las que se expone en la evaluación de tendencias (Tabla I), a lo largo del periodo 1977-2009. Los resultados expuestos corresponden a los valores que se obtienen de la aplicación del SMK, concretamente hacen referencia al estadístico Z.

Los valores con signo positivo indican tendencias significativas ascendentes, por el contrario, los valores con signo negativo son representativos de tendencias decrecientes

Algunos parámetros no han podido ser evaluados para el periodo completo de años (DQO y O_2) debido a que no se contaba con registros en las series o se contaban con un número escaso de éstos (inferiores a 10 registros por punto).

En las ocasiones en la que no se han detectado tendencias significativas se representa mediante el signo "-" en la Tabla I. Cuanto mayor es el valor de Z (en términos absolutos) mayor será el grado de confianza estadístico con el que se detecta la tendencia, sin embargo, este estadístico, no permite calcular su magnitud, es decir, el cambio de unidad por tiempo.

La pendiente de Sen permite, en los casos en los que se detecta una tendencia, cuantificar la misma, facilitando un único dato numérico (Tabla I) por parámetro analizado, lo que permite a su vez, un rápido conocimiento de la evolución del acuífero.

Con respecto a las tendencias observadas, se puede distinguir en principio dos comportamientos distintos; por un lado los puntos de control cercanos a la línea de costa y por otro los situados en la zona media-alta de la masa de agua. Los primeros muestran por lo general tendencias crecientes en parámetros como la conductividad eléctrica, cloruros y sodio, y decrecientes en sulfatos y bicarbonatos, lo cual se in-

		Parámetros recogidos en el Anexo I y II de la Directiva de Aguas Subterráneas 2006/118/CE					Otros parámetros (componentes mayoritarios)					Otros parámetros (Parámetros fisico-químicos)		
	Punto de control	C.E (µS/cm)	Cl' (mg/l)	SO_4^2 (mg/l)	NH_4^+ (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	Ca^{2+} (mg/l)	Mg^{2+} (mg/l)	Na^+ (mg/l)	K^+ (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	pH (udpH)	O_2 (mg/l)	DQO (mg/lO_2)
Red de control IGME DHCMA (1977-2000)	S01	3,0	4,4	-4,1	–	–	2,7	–	–	-2,7	-3,1	3,1	x	–
	S02	–	2,3	–	–	–	–	–	1,8	–	–	–	x	–
	S03	3,3	3,3	1,9	–	–	2,8	3,5	1,8	–	–	-2,0	x	1,7
	S04	2,5	3,7	-1,9	–	–	–	–	2,9	–	-4,5	-2,0	x	1.8
	SO5	2,4	3,2	–	–	–	1,7	–	3,3	–	-2,5	-4,0	x	2,3
	S06	3,5	4,1	–	–	-2,0	–	2,9	3,4	–	-4,0	–	x	–
	S07	–	–	–	–	-1,8	–	–	–	–	-2,3	-1,8	x	–
	SO8	–	1,9	–	–	-1,7	–	–	1,7	–	–	–	x	–
	S09	–	–	–	–	–	–	-2,5	–	–	–	–	x	–
	S10	3,5	3,7	2,2	–	2,9	1,8	1,7	4,1	–	–	–	x	–
	S11	-2,7	-1,3	-2,7	-1,9	–	–	-2,3	–	–	–	–	x	–
	S12	3,3	3,8	2,0	–	2,9	–	–	4,4	2,3	-2,0	–	x	-2,0
	S13	3,6	4,2	2,6	–	1,7	2,9	–	4,4	–	–	–	x	–
	S14	–	2,6	–	–	1,6	–	–	2,4	–	–	–	x	–
	S15	–	–	–	x	–	–	-3,0	–	–	–	–	x	–
Red de control DHCMA (2002-2009)	S16	2,1	–	–	–	1,9	–	–	–	–	–	–	x	–
	A01	–	–	2,3	–	-1,8	–	1,8	–	–	–	–	–	x
	A02	–	–	-1,7	–	-1,7	–	–	–	–	–	–	–	x
	A03	–	-2,9	–	1,8	-2,9	–	–	–	-2,6	-1,7	2,4	–	x
	A04	–	–	–	–	-1,7	-2,2	–	–	–	–	–	–	x
	A05	–	-1,7	-2,4	–	2,2	–	–	–	–	–	–	–	x
	A06	-1,9	-2,2	-1,8	-2,6	–	–	–	-2,3	-1,8	-2,8	–	3,1	x
	P13	-1,6	-2,0	–	–	–	–	–	-2,5	–	-2,6	–	1,7	x

–, no hay tendencias significativas x, no se dispone de suficientes datos

Tabla I.- Resultados de la aplicación del test estacional de Mann Kendall en el Bajo Guadalhorce.

Table I.- Results of the application of the Mann Kendall Seasonal test in the Bajo Guadalhorce.

terpreta como un aumento en los parámetros representativos de la mineralización como consecuencia de la intrusión marina que tiene lugar en esta masa. El aumento de la explotación de la masa de agua para cubrir los distintos usos que tienen lugar en este sector (industrial, agrícola, abastecimiento, etc.) han originado un avance de la interfase entre agua dulce y agua marina, el cual puede verse claramente reflejado en la evaluación de tendencias entre los años 1977-2000 (Tabla I).

Por otro lado, cabe destacar el comportamiento de los registros pertenecientes a la zona media-alta de la masa de agua subterránea, donde también se pueden distinguir patrones comunes. Los nitratos muestran tendencias crecientes en la totalidad de los puntos donde se han identificado tendencias significativas, así como el potasio, ambos representativos de la fertilización de que tiene lugar en dicha zona (principalmente cítricos).

También los parámetros representativos de la mineralización siguen una evolución conjunta, viéndose tendencias crecientes en la mayoría de puntos evaluados, lo que se debe principalmente a los retornos de riego que se producen en el sector.

Por último, cabe destacar los resultados de las tendencias evaluadas en los años trascurridos tras la entrada en vigor de la DMA, que a pesar de abarcar un periodo de tiempo más corto, puede distinguirse un cambio cualitativo en su evolución. Así, se observa que no existen tendencias (estabilización) o éstas son decrecientes en los parámetros indicativos de la mineralización y en el caso de los nitratos la mayoría de las tendencias son decrecientes.

Otros procesos, de carácter más local, que también se observan tras la evaluación de las tendencias son la disminución de la mayoría de parámetros evaluados en aquellas captaciones usadas para abastecimiento (A-02 y A-06), así como procesos típicamente controlados por las condiciones redox (A-03), disminución de especies oxidadas (oxígeno disuelto, nitratos y sulfatos) y aumento de las especies reducidas (amonio).

Conclusiones

La utilización del test de Mann-Kendall y la pendiente de Sen se muestra como una herramienta útil para obtener una visión de conjunto sobre la evolución en el tiempo de la calidad de las aguas subterráneas mediante datos periódicos de calidad y los resultados numéricos obtenidos son fácilmente interpretables.

La aplicación del método no-paramétrico de regresión de la pendiente de Sen confirma las tendencias obtenidas mediante la aplicación del test de Mann-Kendall, y permite cuantificar de forma numérica las mismas.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del test aportan una visión global de la evolución de la hidroquímica para la masa de agua del Bajo Guadalhorce en el periodo comprendido entre 1977 y 2009. Durante el primer periodo (1977-2000) se distingue una evolución distinta según el sector de la masa considerado, pero en general las tendencias indican un deterioro de la calidad del agua subterránea durante este periodo. La mayoría de parámetros contaminantes o indicadores de contaminación tienen un comportamiento creciente como consecuencia del progresivo desarrollo de la zona objeto de estudio desde finales de los años 70 hasta el año 2000 y de los impactos que dicho desarrollo generó.

Como primera aproximación a la evaluación de tendencias tras la publicación de la DMA, se puede concluir que de forma generalizada se aprecia una estabilización o una disminución en la concentración de los distintos parámetros evaluados, aunque será necesario esperar a estudiar periodos más amplios para poder confirmar dichos resultados.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al proyecto CGL2008-04938BTE de la DGICYT así como al Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía.

Referencias

Briggs, J.C. (1978). *Nationwide surface water quality monitoring networks of the U.S. Geological Survey*. American Water Resources Association, San Francisco, California, 49-57.

Finninsh Meteorological Institute (2002). *Mann-Kendall test and Sen`s Slope Estimates for the trend of annual data*.

Grath, J., Scheidleder, A., Uhlig,S., Weber, K., Kralik, M., Keimel, T. y Gruber , D. (2001). *The EU Water Framework Directive: Statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation of monitoring results*. Final Report. Austrian Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management (Ref.: 41.046/01-IV1/00 and GZ 16 2500/2-I/6/00), European Commission (Grant Agreement Ref.: Subv 99/130794).

Hirsch, R.M., Slack, J.R. y Smith, R.A. (1982). *Water Resources Research*, 18, 107-121.

Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*, 4th Ed. Charles Griffin, London.

Mann, H.B. (1945). *Econometrica*, 13, 245-249.

Sen, P.K. (1968). *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.

Vadillo, I., Carrasco, F. y Sánchez, D. (2007). En: Bajo Guadalhorce (M.A.S 060.037), *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*, (E. Andreo, Ed.). Diputación de Málaga, IGME, Universidad de Málaga, Tomo 2, 179-84.