Concentración de iones mayoritarios en las aguas de la red fluvial de la cuenca del Guadalquivir y sus condicionantes geológicos

Concentration of major ions in the fluvial network waters of the Guadalquivir watershed and its geological determining factors

Francisco Moral Martos

[1] Universidad Pablo de Olavide, Ctra. de Utrera, km 1, 41013 – Sevilla. fmormar@upo.es

ABSTRACT

The Guadalquivir watershed, with an area of 57184 km^2, has renewable water resources estimated at 7091 hm^3/year. The concentration of the major ions in the waters of the fluvial network is conditioned mainly by climatic, anthropic and geological factors. However, geological factors determine the high hydrochemical diversity observed in the three main geological regions of this watershed: Sierra Morena, Guadalquivir Depression and Betic Cordillera. The waters of Sierra Morena are characterized by low mineralization (EC ≈ 400 µS/cm) and the predominance of HCO_3, Ca^{2+} and Mg^{2+} ions, although, in some rivers, mining and industrial pollution originates sulphated waters. In the Guadalquivir Depression, the waters are usually brackish (EC ≈ 3000 µS/cm) and sodium-chlorinated. Finally, in the Betic Cordillera the hydrochemical types are very varied, from slightly saline waters of HCO_3-Ca-Mg facies in the Internal and Prebetic zones to water rich in SO_4^{2-} and Ca^{2+} in the intramontane basins and the Subbetic Zone.

Key-words: *Guadalquivir, water salinity, hydrochemical facies, lithology.*

RESUMEN

La cuenca de Guadalquivir, con 57184 km^2 de superficie, posee unos recursos hídricos renovables cifrados en 7091 hm^3/año. La concentración de los iones mayoritarios en las aguas de la red fluvial está condicionada principalmente por factores climáticos, antrópicos y geológicos. No obstante, son estos últimos los que determinan la gran diversidad hidroquímica observada en las tres grandes regiones geológicas de la cuenca: Sierra Morena, Depresión del Guadalquivir y Cordillera Bética. Las aguas de Sierra Morena se caracterizan por su baja mineralización (CE ≈ 400 µS/cm) y el predominio de los iones HCO_3^-, Ca^{2+} y Mg^{2+}, aunque, en algunos ríos, la contaminación minera e industrial origina aguas sulfatadas. En la Depresión del Guadalquivir, las aguas suelen ser de carácter salobre (CE ≈ 3000 µS/cm) y de tipo clorurado-sódicas. Por último, en la Cordillera Bética los tipos hidroquímicos son muy variados, desde aguas poco salinas de facies HCO_3-Ca-Mg en las Zonas Internas y el Prebético a aguas ricas en SO_4^{2-} y Ca^{2+} en las depresiones intramontañosas y el Subbético.

Palabras clave: *Guadalquivir, salinidad del agua, facies hidroquímica, litología.*

Geogaceta, 64 (2018), 71-74
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 23 de enero de 2018
Revisión: 10 de abril de 2018
Aceptación: 25 de abril de 2018

Introducción

La hidrogeoquímica aborda el estudio de la composición de las aguas y sus relaciones con las rocas de la corteza terrestre. En las aguas naturales la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Algunos de estos iones se encuentran presentes casi siempre en el agua y suelen representar casi la totalidad de los iones disueltos. Estos iones, llamados fundamentales o mayoritarios, son el cloruro, el sulfato, el bicarbonato, el sodio, el calcio y el magnesio. La mayor parte de la carga disuelta que transporta un cauce fluvial procede de la disolución de las rocas que afloran en su cuenca vertiente. No obstante, la concentración de los distintos iones presentes en el agua no solo depende de la composición de las rocas, sino que otros factores, como las condiciones climáticas, la permeabilidad de los materiales o las actividades antrópicas, influyen de forma importante, y a veces dominante, en las características químicas del agua (Custodio y Llamas, 1983).

La calidad de las aguas es una variable descriptora fundamental del medio hídrico, tanto desde el punto de vista ambiental, como desde la perspectiva de la planificación y gestión hidrológica, ya que determina la aptitud del agua para mantener los ecosistemas y atender las diferentes demandas (MMA, 2000).

Dentro de las funciones de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir se encuentra el control de la calidad de las aguas continentales. Desde 2007, con la aplicación de la Directiva Marco de Agua (DMA) se han adaptado los sistemas de control de la calidad físico-química y microbiológica de las aguas superficiales con el fin de conseguir el buen estado ecológico y químico de las aguas superficiales. Entre los parámetros medidos en la red DMA del Guadalquivir se encuentra la conductividad eléctrica y la concentración de los seis iones mayoritarios (HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+} y Na^+). Los datos utilizados en este trabajo son los valores medios medidos en 265 estaciones distribuidas por toda la cuenca

durante los periodos 2005-2009 y 2014-2016 (www.chguadalquivir.es).

Con el presente trabajo se pretende, por un lado, caracterizar la diversidad hidroquímica de las aguas de la red fluvial de la cuenca del Guadalquivir y, por otro, relacionar dicha diversidad con la distribución de los distintos tipos de rocas que afloran en la cuenca.

El medio físico

Entre su nacimiento, en la Sierra de Cazorla, y su desembocadura en el Océano Atlántico, el río Guadalquivir presenta un recorrido de 657 km. Sus principales afluentes son los ríos Guadalimar, por la margen derecha, y los ríos Guadiana Menor y Genil, por la margen izquierda (Fig. 1).

Su cuenca, alargada unos 350 km en dirección este-oeste, se extiende por una superficie de 57184 km^2. Ocupa la mayor parte de las provincias de Granada, Jaén, Córdoba y Sevilla y una fracción menor del resto de las provincias andaluzas, así como, de las provincias de Badajoz, Ciudad Real, Albacete y Murcia. La divisoria meridional y oriental, que marca el límite con las cuencas mediterráneas, recorre las cumbres principales de la Cordillera Bética. La divisoria con la cuenca del Guadiana recorre el borde meridional de la meseta castellana.

Desde los puntos de vista geológico (Vera, 2004) y geográfico, en la cuenca se pueden distinguir tres unidades territoriales que, de norte a sur, son Sierra Morena, la Depresión del Guadalquivir y la Cordillera Bética (Fig. 1).

Sierra Morena corresponde al borde meridional del Macizo Ibérico. Más concretamente, de este a oeste, afloran rocas pertenecientes a las zonas Centroibérica, Ossa-Morena y Sudportuguesa. En la primera, predominan las lutitas/pizarras y areniscas (grauvacas y cuarcitas) e incluye al batolito de Los Pedroches, formado por granodioritas y granitos. La serie estratigráfica de la zona de Ossa-Morena está constituida preferentemente por areniscas, pizarras, calizas y rocas volcánicas. En algunos sectores afloran rocas metamórficas, como los gneises, anfibolitas, esquistos y cuarcitas de Sierra Albarrana, o rocas ígneas, como los granitos de El Pedroso. Finalmente, en la zona Sudportuguesa afloran pizarras con intercalaciones de cuarcitas y rocas volcánicas ricas en sulfuros.

El relleno sedimentario de la Depresión del Guadalquivir está constituido mayoritariamente por margas y calcarenitas, cerca del margen ibérico, y por margas, lutitas y evaporitas, cerca del margen bético. Sobre estos materiales, en las zonas más bajas de la cuenca, se observa un fino depósito de aluviones.

Por su parte, la Cordillera Bética puede ser dividida en Zonas Externas (Prebético y Subbético), Zonas Internas y cuencas postorogénicas (Guadix-Baza y Granada). El Prebético del alto Guadalquivir está formado fundamentalmente por calizas, dolomías y margas. En el Subbético, predominan los carbonatos en los núcleos montañosos de la parte oriental (al este de las sierras de Cabra y Gorda) y las margas, lutitas y evaporitas en las zonas más bajas que se sitúan entre estas sierras o en la parte occidental de la cuenca. En las Zonas Internas abundan las dolomías (sierras de Baza, Almijara y Tejeda) y los esquistos (Sierra Nevada). En las cuencas postorogénicas de Granada y Guadix-Baza afloran conglomerados, arenas, limos, arcillas y evaporitas de origen aluvial y lacustre.

Por último, en la cuenca del río Guadalimar se encuentran las areniscas, lutitas, evaporitas y dolomías de la cobertera tabular del Macizo Ibérico.

Desde una perspectiva geográfica, Sierra Morena constituye una zona montañosa que, de forma ininterrumpida, se eleva unos 500-600 metros sobre el valle del Guadalquivir; no obstante, sus cumbres, situadas a una altitud próxima a 1000 metros, apenas sobresalen sobre el relieve de la Meseta. Los ríos principales, con recorridos próximos a los 100 km son el Guadalén, Jándula, Guadiato, Bembézar, Viar y Rivera de Huelva. Estos ríos, profundamente encajados, han formado valles escarpados, con pendientes del 30-50 %, separados por interfluvios relativamente planos (pendientes del 10-25 %).

La Depresión del Guadalquivir es una franja de unos 50 km de anchura que se ex-

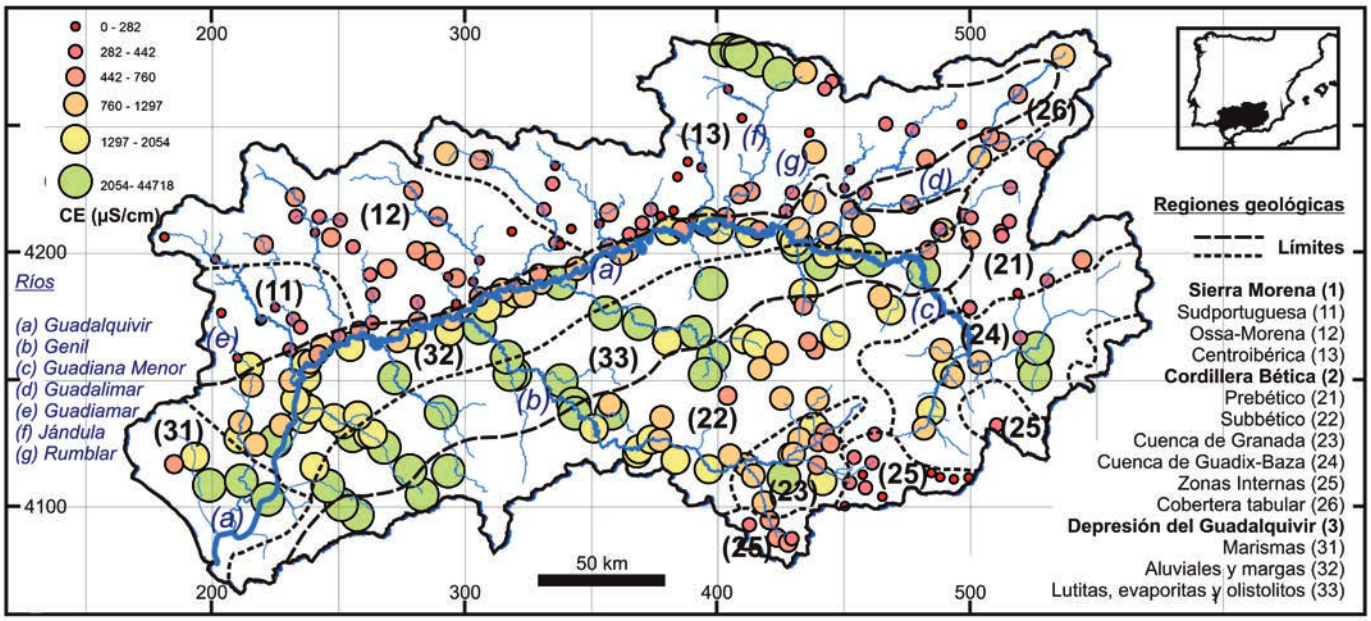

Fig. 1.- Valores medios de conductividad eléctrica del agua en las estaciones de la red DMA de la cuenca del Guadalquivir.

Fig. 1.- Average values of water electrical conductivity in the stations of the DMA network of the Guadalquivir watershed.

tiende entre la costa atlántica y la Sierra de Cazorla. Al norte, el río Guadalquivir recorre un segmento importante del límite con Sierra Morena y, al sur, se encuentra el límite, poco definido, de la Depresión con los relieves béticos. La altitud disminuye paulatinamente hacia el oeste, desde unos 500 metros en los piedemontes béticos hasta el nivel del mar. El relieve se caracteriza por el predominio de cerros de formas erosivas y suaves pendientes (15 %) en la mitad oriental y de llanuras aluviales en la mitad occidental.

La Cordillera Bética ocupa más del 40 % de la parte oriental y meridional de la cuenca. Presenta un relieve más complejo, con núcleos montañosos prominentes separados por corredores o cuencas intramontañosas. Las cumbres más elevadas, de más de 2000 m de altitud, se encuentran en el segmento suroriental de la divisoria hidrológica: Sierra Tejeda, Sierra Nevada, Sierra de Baza y Sierra de María. Inmediatamente al NNO, se sitúan las cuencas intramontañosas de Guadix-Baza, con una altitud próxima a 800-1000 m, y de Granada, a una altitud de 600-700 m. A continuación se encuentran dos sistemas montañosos, separados por el valle del Guadiana Menor, que superan los 2000 m de altitud: al este, las sierras de Alcaraz, Segura, Cazorla y La Sagra, y, al oeste, las sierras de Mágina, Jabalcuz, La Pandera, Parapanda y Cabra. Los relieves béticos de la cuenca, al oeste del río Genil, son mucho más modestos.

Los principales ríos que drenan la Depresión del Guadalquivir y la Cordillera Bética son el Guadalimar, el Guadiana Menor, el Guadajoz, el Genil, el Corbones y el Guadaíra.

La altitud, la orientación del relieve y la proximidad al Océano Atlántico determinan la cuantía y la distribución de las precipitaciones a lo largo del año. La precipitación anual media en la cuenca es de unos 600 mm, con valores máximos próximos a 1000 mm/año en algunas estaciones de Sierra Morena y de la Cordillera Bética y valores mínimos inferiores a 400 mm/año en la cuenca de Guadix-Baza y en algunos valles de la parte oriental de la cuenca. Las precipitaciones se concentran entre los meses de noviembre y febrero y son muy escasas durante los meses de verano. Las lluvias de invierno son relativamente más cuantiosas en las estaciones más lluviosas, mientras que en las comarcas más secas no se observa el máximo de precipitación invernal.

Según el Plan Hidrológico del Guadalquivir (Real Decreto 1/2016), los recursos hídricos renovables de la cuenca del Guadalquivir durante el periodo 1980-2012 ascienden a 7091 hm^3/año, lo que representa una escorrentía media de 124 mm/año.

Regiones geológicas, salinidad del agua y facies hidroquímica

Las aguas de la red fluvial de la cuenca del Guadalquivir presentan una conductividad eléctrica media de 1430 µS/cm y un contenido salino de 1020 mg/L (considerando los seis iones mayoritarios). Los valores medianos son, respectivamente, 779 µS/cm y 618 mg/L. Los valores mínimos de conductividad eléctrica se observan en algunos de los cauces que drenan la vertiente septentrional de Sierra Nevada (53 µS/cm en el río Benéjar y 55 µS/cm en el río Alhorí) y los máximos en algunos pequeños cauces de la Depresión del Guadalquivir (44720 µS/cm en el arroyo Salado de Torrequebradilla y 10320 µS/cm en el arroyo Santiago, al sur de Utrera). En casi un tercio de los 265 puntos controlados las aguas presentan valores de conductividad eléctrica comprendidos entre 200 y 500 µS/cm (Fig. 2).

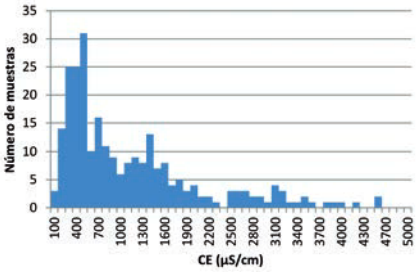

Fig. 2.- Diagrama de frecuencias de la conductividad eléctrica (hasta 5000 µS/cm) de las aguas de la cuenca del Guadalquivir.

Fig. 2.- Frequency diagram of the electrical conductivity (up to 5000 µS/cm) of waters of the Guadalquivir watershed.

En los diagramas de Piper de la figura 3 se observa que la proporción del contenido de los tres aniones principales es muy variable, aunque predominan las facies bicarbonatadas y mixtas. En el caso de los cationes, las facies cálcicas y mixtas son las más comunes, las sódicas son menos frecuentes y las magnésicas muy raras.

En las figuras 1 y 3 se aprecian evidentes diferencias en la salinidad del agua y en las facies hidroquímicas predominantes entre las distintas zonas geológicas de la cuenca del Guadalquivir.

Sierra Morena, en conjunto, presenta las aguas menos salinas de la cuenca. La conductividad eléctrica de las aguas presenta valores próximos a 400 µS/cm y facies hidroquímicas mayoritariamente bicarbonatadas mixtas y cálcicas. Los valores más bajos de conductividad, de unos 100 µS/cm, se observan en el río Yeguas, en cuya cuenca afloran los materiales graníticos del batolito de Los Pedroches. Las aguas de la zona de Ossa-Morena destacan por presentar una facies marcadamente bicarbonatada cálcica. Por otra parte, en algunos puntos se observan valores de conductividad eléctrica superiores a 1000 µS/cm y un predominio de los iones SO_4^{2-} y Na^+ (río Jándula) o SO_4^{2-} y Mg^{2+} (ríos Guadiamar y Rumblar), que puede relacionarse, respectivamente con contaminación industrial en Puertollano y minera en las áreas de Aznalcóllar (Olías *et al.*, 2012) y El Centenillo.

Las aguas de la Cordillera Bética son las que presentan una mayor diversidad hidroquímica. La conductividad eléctrica suele estar comprendida entre 700 y 1000 µS/cm, pero existe un notable contraste entre las aguas de Sierra Nevada (menos de 200 µS/cm) o de las sierras prebéticas del alto Guadalquivir (400-500 µS/cm) y las aguas de la cuenca de Guadix-Baza o de la zona subbética, en las que frecuentemente se miden más de 2000 µS/cm. Las facies hidroquímicas son asimismo muy variadas, encontrándose todos los tipos, en cuanto al contenido aniónico, y, de más a menos abundancia, aguas cálcicas, mixtas y sódicas. En Sierra Nevada, Sierra Tejeda-Almijara y en las montañas prebéticas los iones mayoritarios son HCO_3^-, Ca^{2+} y Mg^{2+}. En cambio en las aguas de la zona subbética los iones más abundantes son SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}y Na^+.

En la Depresión del Guadalquivir, las aguas se caracterizan por su carácter salobre, incluso, salino en algunos puntos. En los cauces que drenan los materiales triásicos arcilloso-evaporíticos presentes en la franja meridional de la Depresión del Guadalquivir, frecuentemente, la conductividad eléctrica del agua supera los 2500 µS/cm y los iones más abundantes son el Cl^- y el Na^+. En cambio, en las margas y depósitos aluviales de la franja septentrional, los valores de conductividad eléctrica suelen variar entre 1000 y 1500 µS/cm y las facies hidroquímicas son de tipo mixto.

Las aguas del río Guadalquivir poseen una conductividad eléctrica comprendida entre 1000 y 1500 µS/cm en la mayor parte

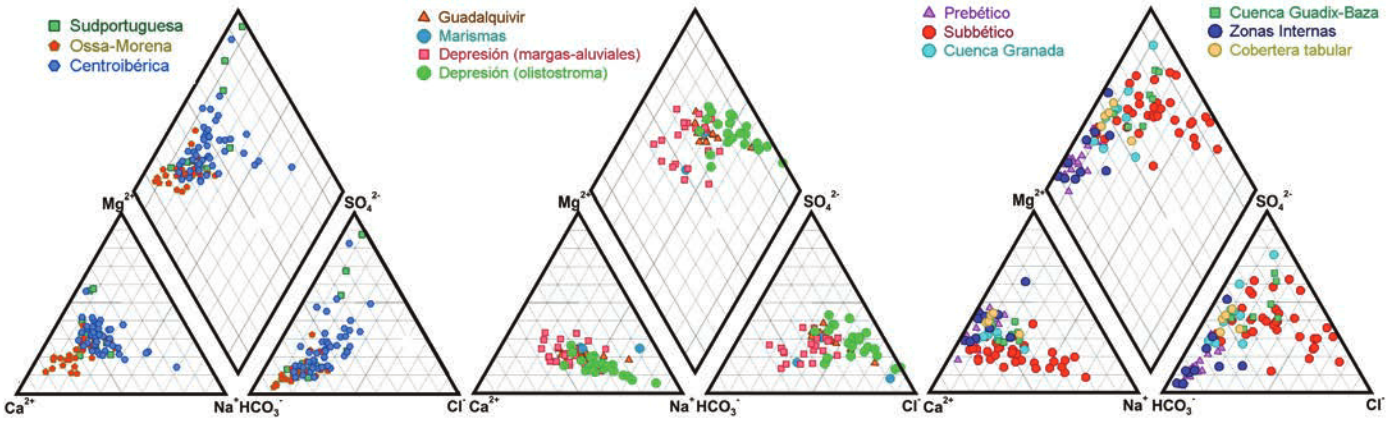

Fig. 3.- Diagramas de Piper de las aguas en las estaciones de la red DMA de la cuenca del Guadalquivir. A la izquierda, Sierra Morena (Macizo Ibérico), en el centro, Depresión del Guadalquivir y, a la derecha, Cordillera Bética.

Fig. 3.- Piper diagrams of waters in the DMA network stations of the Guadalquivir watershed. On the left, Sierra Morena (Iberian Massif), in the center, Guadalquivir Depression and, on the right, Betics.

de su recorrido, desde la desembocadura del Guadiana Menor a las proximidades de Sevilla. En este tramo la facies hidroquímica es mixta, en lo relativo a los aniones, y cálcico-sódica. En cambio, aguas abajo de Sevilla, al igual que en las Marismas, los iones más abundantes son el Cl^- y el Na^+.

Conclusiones

Este trabajo se ha basado en los análisis de iones mayoritarios realizados en 265 estaciones de la red DMA del Guadalquivir, a lo largo de los años 2005-2009 y 2014-2016.

La composición química de las aguas de la red fluvial del Guadalquivir está influenciada principalmente por factores climáticos, antrópicos y geológicos. Así, las bajas tasas de escorrentía implican una mayor mineralización de las aguas en comparación con otras grandes cuencas fluviales que poseen unos mayores caudales específicos (Meybeck *et al.*, 1996). Por otra parte, las actividades mineras de Sierra Morena y las actividades industriales del complejo petroquímico de Puertollano provocan un notable incremento de la concentración de los iones SO_4^{2-}, Na^+ y Mg^{2+} en los ríos Guadiamar, Rumblar y Jándula.

No obstante, la gran diversidad hidroquímica observada en la cuenca del Guadalquivir se relaciona principalmente con las características geológicas (litología, importancia de los flujos subterráneos) de los materiales que afloran en las distintas cuencas vertientes.

Las aguas menos salinas (CE < 200 µS/cm) se encuentran asociadas a los afloramientos de rocas metamórficas y plutónicas (granitos, esquistos, cuarcitas, pizarras), de baja permeabilidad, de Sierra Morena y Sierra Nevada. Se trata de aguas de tipo HCO_3-Ca (zona de Ossa-Morena), HCO_3-Ca-Mg (Sierra Nevada), HCO_3-SO_4-Ca-Mg (zona Centroibérica) o HCO_3-SO_4-Ca-Na (batolito de Los Pedroches).

Los afloramientos de calizas y dolomías originan aguas de baja salinidad (CE = 400-700 µS/cm) y de facies hidroquímica HCO_3-Ca-Mg (zona Prebética), HCO_3-SO_4-Ca-Mg (zona Subbética) o HCO_3-Ca (zona de Ossa-Morena).

Los materiales aluviales de grano medio a grueso se relacionan con aguas de mineralización media (CE = 700-1300 µS/cm) y de tipo HCO_3-SO_4-Ca-Mg (Cobertera Tabular, Vega de Granada) o de facies mixtas (depósitos aluviales del bajo Guadalquivir).

Finalmente, los materiales sedimentarios detríticos de grano fino, generalmente asociados a evaporitas, dan lugar a aguas de elevada salinidad (CE > 2000 µS/cm) y de facies SO_4-Cl-Ca-Mg (cuenca de Guadix-Baza), SO_4-HCO_3-Ca-Mg a SO_4-Cl-Ca-Na (zona Subbética) y Cl-SO_4-Na-Ca (Depresión del Guadalquivir).

Agradecimientos

El autor agradece sinceramente los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos.

Referencias

Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología subterránea.* Ed. Omega, Barcelona, 2350 p.

Meybeck, M., Friedrich, G., Thomas, R. y Chapman, D. (1996). En: *Water Quality Assessment.* (D. Chapman, Ed.). Cambridge University Press, Cambridge, Chapter 6.

MMA (2000). *Libro blanco del agua en España.* Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 637 p.

Olías, M., Moral, F., Galván, L. y Cerón, J.C. (2012). *Environmental Monitoring and Assessment*, doi: 10.1007/s10661-011-2212-6

Vera, J.A. (Ed.) (2004). *Geología de España.* SGE-IGME, Madrid, 884 p.