

Estudio de las fuentes de salinización en el acuífero costero Motril-Salobreña (Granada)

Study of the sources of salinization in the Motril-Salobreña coastal aquifer (Granada)

Francisco José Crespo¹, Manuel López Chicano¹, María Luisa Calvache¹, Juan Pedro Sánchez Úbeda¹, Carlos Duque² y Wenceslao Martín Rosales¹

¹ Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Av/ Fuentenueva s/n, 18071 Granada, España. fcrespo@correo.ugr.es, mlopezc@ugr.es, calvache@ugr.es, jpegeo3@gmail.com, wmartin@ugr.es

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

ABSTRACT

In the central sector of Motril-Salobreña aquifer it was detected a relatively high concentration of chloride. The Cl/Br ratio was applied for identifying the origin of these anomalies due to it remains constant for each salinity source. During the years with regular average rainfall it was observed a Cl/Br molar ratio from 850 to 1000 (close to other sectors of the aquifer), high linear relation between Cl and Br; an unimodal distribution of chloride concentration and Na-HCO₃ hydrochemical facies. Nevertheless during dryer years it was detected that the Cl/Br ratio decreased to 650-800 (close to the seawater), the correlation between Cl and Br was lower; the Cl concentration distribution was bimodal and the hydrochemical facies changed to Na-HCO₃ and Na-Cl. This fact points out to a mixing of water with different salinity in this sector.

Key-words: Coastal aquifer, Cl/Br ratio, salinity, mixing of water.

RESUMEN

En el sector central del acuífero Motril-Salobreña se han observado puntos con contenidos relativamente altos en cloruro. Para identificar el origen de estas anomalías se ha utilizado la relación Cl/Br; dado que se mantiene constante para cada fuente de salinidad. Para los años de pluviometría media se observa: una relación Cl/Br entre 850 y 1000, próxima a la de otros puntos del acuífero; una alta relación lineal entre Cl y Br; una distribución unimodal de la concentración en cloruro; facies hidroquímica Na-HCO₃. En cambio, durante los años más secos se observan: valores de la relación Cl/Br más bajos, en torno a 650 y 800, y próximos a la del agua del mar; mala correlación lineal entre Cl y Br; una distribución bimodal de la concentración en cloruro; facies hidroquímicas Na-HCO₃ y Na-Cl. Estos hechos apuntan hacia la existencia de mezclas de aguas de distinta salinidad en dichos sectores.

Palabras clave: Acuífero costero, relación Cl/Br, salinidad, mezcla de aguas.

Geogaceta, 52 (2012), 137-140.
ISSN 2173-6545

Fecha de recepción: 13 de febrero de 2012
Fecha de revisión: 26 de abril de 2012
Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2012

Introducción

Los acuíferos costeros están sometidos a grandes cambios provocados por el desarrollo, muchas veces insostenible, de estas regiones. El acuífero Motril-Salobreña, situado en la costa de Granada, no está exento de ellos. Se prevé un desarrollo urbanístico de la zona y un cambio de cultivos, con la sustitución de la caña de azúcar por cultivos bajo plástico. Estos dos hechos tendrán como consecuencia un aumento de la demanda de agua y una disminución del retorno de riego y de la recarga.

Además, en Mayo de 2005 entró en funcionamiento la presa de Rules, situada a 20 km de la costa, que interrumpe el flujo de agua tanto superficial como subterráneo

disminuyendo los aportes hídricos aguas abajo.

En este escenario de cambios en la gestión de los recursos hídricos, y dado que se trata de un acuífero costero, es de gran interés reconocer las diferentes fuentes de salinización de las aguas subterráneas. El aumento de salinidad puede deberse a: interacción agua-roca; lavado de depósitos evaporíticos; existencia de aguas congénitas o antiguas; intrusión marina; aerosoles procedentes del mar.

Los iones cloruro y bromuro se comportan como un trazador casi ideal debido a su pequeño radio iónico y a su carácter hidrófilo (Custodio y Llamas, 1983). El valor del índice Cl/Br es indicativo del tipo de fuente que origina el incremento de salinidad. De-

bido a que ambos aniones tienen un comportamiento similar, la relación existente entre estos también es indicativa de los tipos de fenómenos que afectan a las aguas subterráneas.

Contexto hidrogeológico

El acuífero Motril-Salobreña limita al norte con relieves constituidos por materiales carbonáticos y metapelíticos pertenecientes al dominio Alpujarride de las zonas internas de la Cordillera Bética y al sur con el Mar Mediterráneo (Fig. 1). Está formado por materiales detríticos de edad cuaternaria con una conductividad hidráulica que oscila entre 5 m/d y 200 m/d y transmisividades que van desde 10.000 m²/d a 100 m²/d

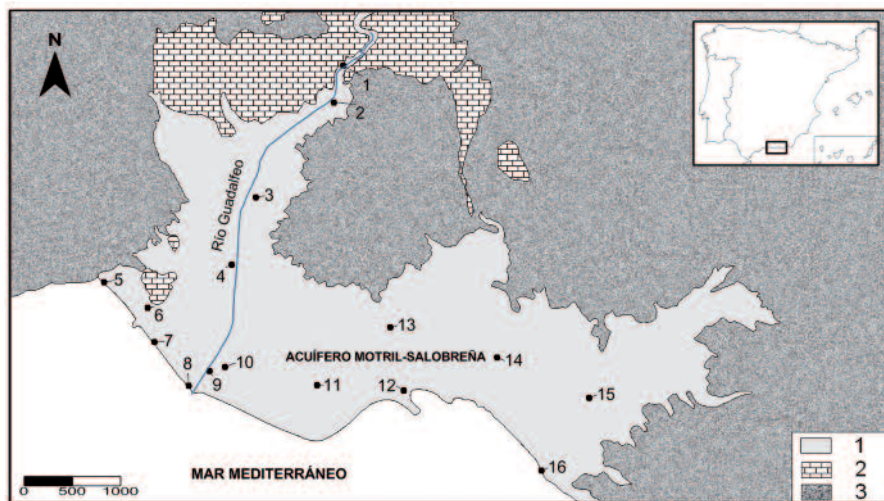


Fig. 1.- Localización geográfica y puntos de muestreo de agua subterránea. 1, materiales detríticos (acuífero Motril-Salobreña); 2, carbonatos; 3, metapelitas.

Fig. 1.- Geographic location and groundwater sampling points. 1, detrital materials (Motril-Salobreña aquifer); 2, carbonates; 3, schists and filites.

(Castillo y Rubio, 1978; Duque, 2009). Los valores máximos de estos parámetros hidráulicos corresponden al sector occidental (eje del río Guadalfeo), mientras que los valores más bajos son típicos del sector oriental del acuífero.

En lo que se refiere al balance hídrico, las entradas más importantes corresponden a la infiltración del río Guadalfeo y al retorno de riegos (Duque y Calvache, 2010). Ambas sufren variaciones como consecuencia del almacenamiento en el embalse de Rules y del cambio en los cultivos y sistemas de riego.

El nivel freático se encuentra a poca profundidad, menos de 30 m en cualquier caso y disminuyendo hacia la costa. No supera la decena de metros de oscilación en años de pluviometría media, ya que las salidas mediante bombeos no son muy importantes.

La conductividad eléctrica del agua no es superior a los 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la facies hidroquímica dominante es la bicarbonatada cálcica; esto evidencia el buen estado de la calidad de las aguas subterráneas del acuífero (Calvache *et al.*, 2003).

Metodología

Se han realizado tres campañas de muestreo hidroquímico en los años hidrológicos 2001-02, 2005-06 y 2007-08, con periodicidad mensual, en una veintena de puntos de agua de diversa naturaleza, distribuidos por la superficie del acuífero: 10 sondeos o pozos en explotación; un ma-

nantial, un piezómetro surgente; 4 pozos o piezómetros no instalados. En algunos muestreos se han tomado también muestras de agua de mar, de lluvia y del río Guadalfeo. En total se han tomado más de 650 muestras de agua. El año más seco de todo el periodo de estudio fue 2007-08 (40 % por debajo de la precipitación media anual).

Las muestras de agua recogidas han sido analizadas por el laboratorio ACMELAB (Vancouver, Canadá), mediante el método ICP-MS. Los datos analíticos pueden consultarse en Crespo (2011).

Se han usado los elementos mayoritarios para caracterizar las aguas de cada punto muestreado según su facies hidroquímica. Seguidamente se ha estudiado la distribución -tanto temporal como espacial- del ion cloruro y se ha analizado la relación existente entre este y el ion bromuro.

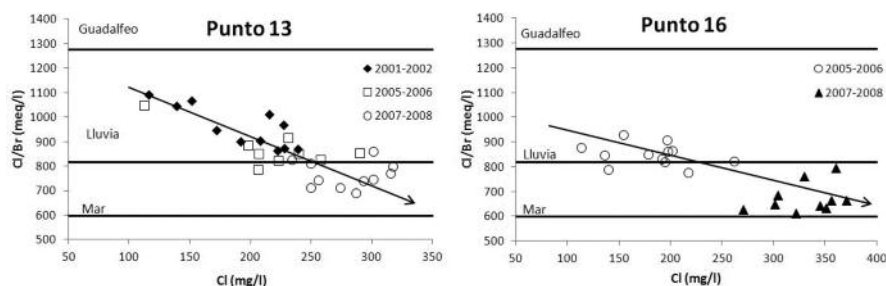


Fig. 2.- Relación Cl/Br (calculada en meq/l) frente a la concentración de Cl (mg/l) para los puntos de muestreo 13 y 16. Las líneas horizontales indican los valores medios de la relación Cl/Br para el agua del río, del mar y de la precipitación. Las flechas indican la tendencia temporal.

Fig. 2.- Cl/Br molar ratio against concentration of chloride (mg/l) for the sampling points 13 and 16. The horizontal lines indicate Cl/Br average values for river water, sea and rain. The arrows indicate the time trend.

Resultados

Analizando estadísticamente la distribución espacial del ion cloruro en el acuífero, Crespo (2011) obtuvo que para las campañas 2001-02 y 2005-06 la distribución es normal, mientras que para el muestreo 2007-08 deja de serlo. Esto se debía a que los puntos 13 y 16 se enriquecían anormalmente en cloruro con respecto a los demás: 273,8 mg/l para el punto 13 y 326,3 mg/l para el punto 16. El resto de puntos tiene valores de concentración que oscilan entre 49 y 179 mg/l.

Se ha representado la razón Cl/Br (calculada en meq/l) frente al Cl (mg/l) en los puntos 13 y 16 para las tres campañas además de los valores medios obtenidos para las muestras disponibles del agua del río Guadalfeo, del mar y de la lluvia (Fig. 2). No se tienen datos sobre el punto 16 para el muestreo 2001-02, ya que se incorporó posteriormente a la red de muestreo.

Existe por tanto una marcada evolución temporal para estos dos puntos anómalos, más evidente en el punto acuífero 13, que no se aprecia en el resto de las muestras (Fig.3).

Desde el año hidrológico 2001-02 hasta el 2007-08 el valor de la relación Cl/Br ha disminuido desde 1000 a 700 en el punto 13 y desde 900 a 600 en el punto 16 (entre 2005-06 y 2007-08 en este caso); es decir, el índice Cl/Br parece acercarse al valor marino. El valor de este índice para agua de mar sin contaminar es igual a 655 ± 25 (Custodio y Alcalá-García, 2003; Davis *et al.*, 1998). En el resto de puntos de muestreo el valor medio de la razón Cl/Br para las tres campañas de muestreo realizadas está comprendido entre 800 y 1200

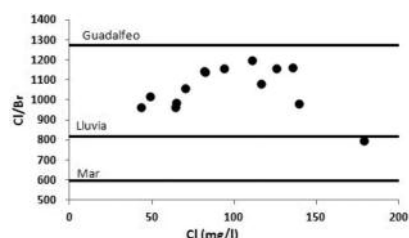


Fig. 3.- Relación Cl/Br versus Cl (mg/l) para todos los puntos de muestreo exceptuando el 13 y el 16.

Fig. 3.- Cl/Br molar ratio versus Cl (mg/l) for all sampling points except 13 and 16.

con valores de ion cloruro que no superan los 200 mg/l (Fig. 3). Este rango de valores es típico para aguas subterráneas en climas costeros semiáridos (Custodio y Alcalá-García, 2003).

Se han representado las concentraciones en meq/l del ion cloruro y del ion bromuro para los puntos anómalos 13 y 16 (Fig.4). En los muestreos de los años hidrológicos 2001-02 y 2005-06 existe una clara relación lineal entre ambos aniones con valores de R^2 muy elevados, superiores a 0,95. En cambio, para la campaña 2007-08, la relación entre estos dos iones deja de ser lineal y, por tanto, el valor de R^2 disminuye considerablemente (Fig. 4). Una posible explicación a esta mala correlación podría ser la mezcla de aguas de distinto origen o diferente evolución hidrogeoquímica.

Los elementos mayoritarios han servido para clasificar las muestras de agua de los puntos 13 y 16 según sus facies hidroquímicas. En los muestreos mensuales de los años hidrológicos 2001-02 y 2005-06 las facies que aparecen son bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas mientras que en la campaña 2007-08 aparecen facies bicarbonatadas sódicas y otras cloruradas sódicas, que no aparecieron en campañas anteriores. Un análisis de la distribución para el ion cloruro refleja que para el muestreo 2007-08 aparecen los datos agrupados en torno a dos valores: 7 meq/l y 9,5 meq/l para el punto 13 y 8,7 meq/l y 10 meq/l para el punto 16; es decir, las distribuciones son bimodales (Fig. 4). Esto parece indicar la aparición de dos tipos de aguas que corresponderían a las facies bicarbonatadas cálcicas y a las facies cloruradas sódicas. En las campañas 2001-02 y 2005-06 la función de distribución que sigue el ion cloruro es unimodal en los dos puntos referidos.

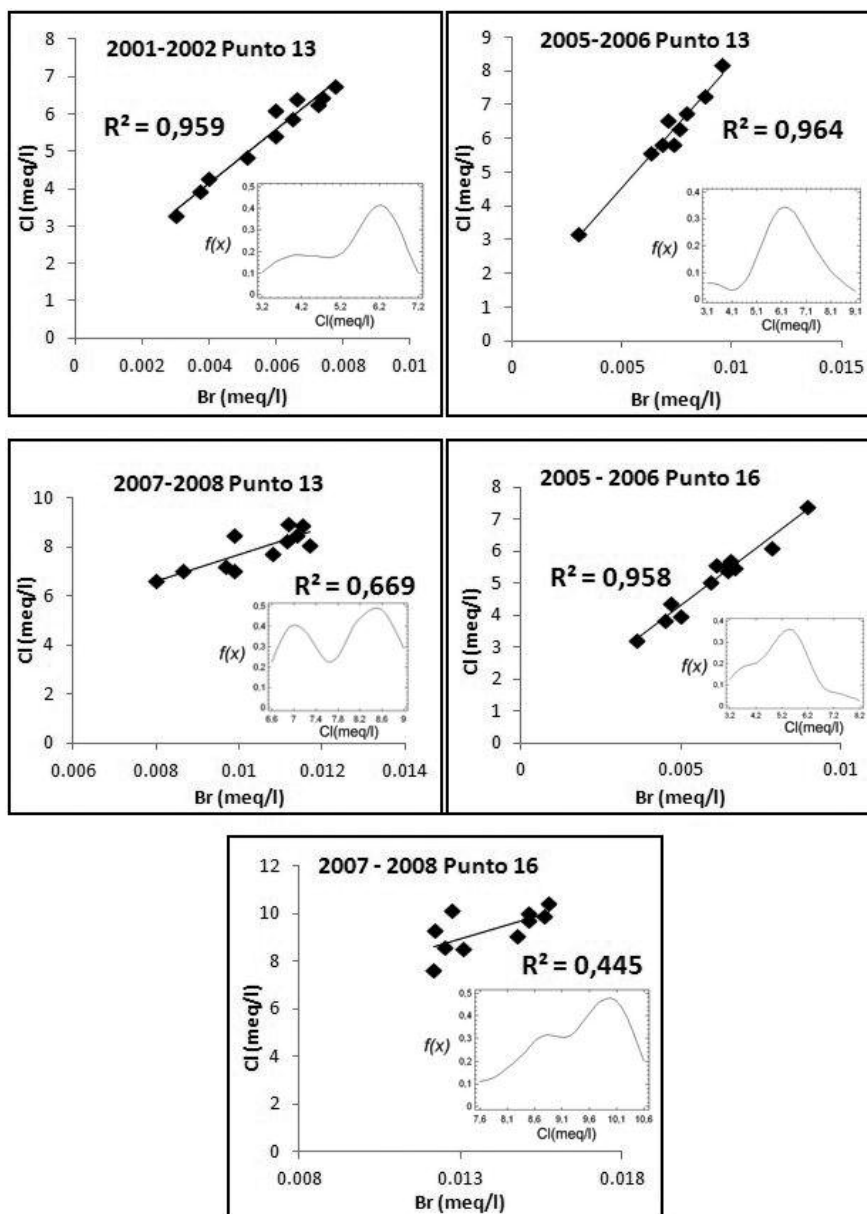


Fig. 4.- Relación entre los iones cloruro y bromuro para los puntos 13 y 16 y función de distribución de probabilidad del cloruro $f(x)$.

Fig. 4.- Relationship between chloride and bromide ions for points 13 and 16 and probability density function of chloride $f(x)$.

Discusión

Los puntos de agua 13 y 16 del acuífero Motril-Salobreña, aún teniendo mineralizaciones totales relativamente bajas (conductividad eléctrica inferior a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), parecen mostrar una cierta anomalía hidroquímica respecto al resto de los puntos muestreados en el acuífero. Los tratamientos estadísticos parecen indicar la existencia de aguas más salinas que adquieren relevancia durante los años más secos y, por tanto, con menor recarga. En las campañas anteriores al año 2007-08 (el más seco del

periodo de estudio), este fenómeno de aumento de salinidad en los puntos 13 y 16 no se observa. Por ejemplo, mientras que la concentración de ion cloruro en los puntos 13 y 16 aumenta en las sucesivas campañas, en otros puntos cercanos y situados más o menos en las mismas líneas de flujo (12 y 15, respectivamente), esta se mantiene aproximadamente constante a lo largo del tiempo (Fig. 5).

El punto 13 es un sondeo casi totalmente penetrante, con 70 m de profundidad (bomba situada a 36 m), que se utiliza esporádicamente para el abastecimiento de

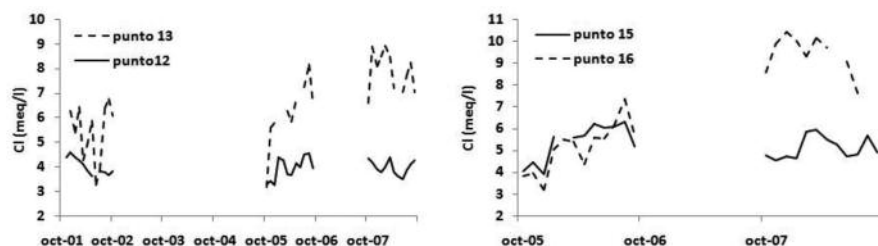


Fig. 5.- Evolución de la concentración de cloruros (meq/l) en los puntos 12, 13, 15 y 16.

Fig. 5.- Evolution of the concentration of chloride (meq/l) in points 12, 13, 15 and 16.

la población de Motril. El punto 16 es un pozo excavado de gran diámetro y menos de 3 m de profundidad, no instalado y situado a unos 100 metros de la línea de costa. El hecho de que en ambos pozos la razón Cl/Br tome valores muy próximos al marino para la campaña 2007-08 podría hacernos pensar que las aguas salinas tienen su origen en un proceso de intrusión marina actual. Sin embargo, aplicando la fórmula de Ghyben-Herzberg (Custodio y Llamas, 1983), el espesor del acuífero en el punto 13 no sería suficiente para permitir la presencia de la cuña de agua salada. No sería este el caso del punto 16, aunque la explotación que se realiza en el entorno de este punto no parece suficiente como para generar un proceso de salinización por intrusión marina. Cabe la posibilidad de que en este punto exista cierta afección antrópica, quizás de origen agrícola, que aumenta las concentraciones en Br, disminuyendo el valor de la relación Cl/Br en este punto y enmascarando el origen de la salinidad (Vengosh and Pankratov, 1998). Esta posibilidad viene sugerida por las concentraciones relativamente altas en nitratos (en torno a 42 mg/l) que se dan en este pozo, no obstante, su comprobación necesitaría estudios complementarios.

Al menos para el caso del punto 13, se podría pensar quizás en la existencia de aguas relativamente profundas y salinas atrapadas con anterioridad durante el proceso de sedimentación y formación del acuífero, o en aguas estratificadas en profundidad, con escasa renovación, relativa-

mente antiguas y ligadas a un flujo más profundo y lento, con mayor tiempo de contacto agua-roca y mayor posibilidad de lavado de sedimentos marinos de la base del acuífero. En aguas de recarga reciente existe una buena relación lineal entre los iones cloruro y bromuro, ya que estos tienen unas características muy similares, además de un origen común; sin embargo, para aguas que han estado más tiempo en contacto con el medio poroso, la relación deja de ser lineal debido a que los iones pueden ser cedidos por el terreno o incorporados al mismo de forma diferente (Romero *et al.*, 2001).

En el sector costero donde se encuentra el punto 16, debe existir una componente vertical del flujo que haga ascender estas hipotéticas aguas más profundas, situación que es posible habida cuenta de que dicho borde constituye una zona de descarga natural del acuífero hacia el mar (Duque, 2009).

Conclusiones

Mediante la relación Cl/Br se pueden discriminar las posibles fuentes que aportan sales a las aguas subterráneas. Esta relación se aproxima al valor marino, 655 ± 25 . Gracias a la utilización de dicha relación, en el acuífero Motril-Salobreña se aprecian dos puntos anómalos, en los que -especialmente en el punto 13 de abastecimiento complementario a Motril- parece evidenciarse la existencia de aguas relativamente profundas, enriquecidas en ión cloruro que

adquieren cierto protagonismo en años de escasez de lluvias.

Considerando los valores de la salinidad de las aguas y, dado que se trata de un acuífero costero, el proceso que puede ser más significativo es la presencia de aguas salobres atrapadas en los depósitos sedimentarios que presentan una relación Cl/Br incluso más baja que la del agua de mar. Su movilización y mezcla con el agua del acuífero puede justificar el descenso de la relación Cl/Br en las aguas muestreadas.

Agradecimientos

El estudio se realizó gracias al soporte económico del proyecto GCL2008-05016 financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Se agradecen los comentarios de los dos revisores anónimos que ayudaron a mejorar la calidad final del trabajo.

Referencias

- Custodio, E. y Alcalá-García, F.J. (2003). En: TIAC-03, 401-412.
- Calvache, M.L., Rubio, J.C., López-Chicano, M., González Ramón, A., Cerón, J.C., Ibáñez, S., Martín-Rosales, W., Soler, R., Díaz-Losada, E. y Peinado Parra, T. (2003). En: TIAC-03, 77-86.
- Castillo, E. y Fernández Rubio, R. (1978). *Boletín Geológico y Minero*, 89, 39-48.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrogeología subterránea*. Editorial Omega, 2350 p.
- Crespo, F.J. (2011). *Estudio de las fuentes de salinización en el acuífero Motril-Salobreña. Utilización de la relación rCl/rBr*. Tesis de Máster, Univ. de Granada, 51 p.
- Davis, S.N., Whittemore, D.O. y Fabryka-Martin, J. (1998). *Ground Water*, 36, 338-350.
- Duque, C. (2009). *Influencia antrópica sobre la hidrogeología del acuífero Motril-Salobreña*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 194 p.
- Duque, C. y Calvache, M.L. (2010). *Geogaceta*, 48, 119-122.
- Romero, E., González, A., Garrido, R., Orihuela, D.L. y Fidelibus, M.D. (2001). En: V Simposio sobre el agua en Andalucía, 261-270.
- Vengosh, A. y Pankratov, I. (1998). *Ground Water*, 36, 815-824.