Origen de la salinidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero costero de Torrevieja: Aspectos Hidroquímicos

Origin of groundwater salinity of the coastal aquifer system of Torrevieja: Hydrochemical considerations.

José Manuel Gómez Fontalva, María Luisa Calvache y Carlos Duque

Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada. Avda. Fuentenueva, s/n, 18071, Granada. chemagomez@ugr.es

ABSTRACT

The aquifer system of Torrevieja (SE Spain) is under a process of seawater intrusion. However, there are uncertainties about the origin of abnormally high salinity values detected in boreholes located 15 km from the coastline. Also there are two hypersaline lagoons over the aquifer that could be related to groundwater. The salinity sources have been determined with hydrochemical analysis of groundwater, electric conductivity logs, major-minor ions relationships and hydrochemical indexes rNa/rCl, rNa/rK, rSO_4/ rCl, rSO_4 and rCa. In this paper we propose an interpretation for the salinity differences and the relation between the lagoons and the aquifer.

Key words: *Hydrochemistry, seawater intrusion, coastal aquifers, ionic relations, bromide.*

Geogaceta, 48 (2010), 127-130
ISSN: 0213-683X

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2010
Fecha de revisión: 21 de abril de 2010
Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2010

Introducción

Actualmente, el sistema acuífero costero de Torrevieja se considera sometido a un proceso de intrusión marina debido a su conexión hidráulica con el mar (Mediavilla *et al.,* 2007). Próximas a la costa existen dos lagunas hipersalinas (Laguna de Torrevieja, al S, y Laguna de la Mata, al N), que se utilizan para la explotación de sales. La conexión de estas lagunas con el sistema acuífero no parece muy probable por encontrarse situadas sobre materiales impermeables, aunque hay autores que abogan por su influencia sobre las aguas subterráneas (Rodríguez, 2003). Sin embargo, además de estas dos fuentes de salinidad, puede existir otro origen, ya que se han detectado altas concentraciones de cloruros en algunas muestras de agua subterránea localizadas a 15 km de la costa, en el sector occidental, que hacen difícil su justificación a partir de un proceso de intrusión y requiere un estudio detallado. Con el análisis hidroquímico de las muestras de agua disponibles, se plantea la posibilidad de determinar las fuentes de salinidad del sistema, ya sea de procedencia marina, de sedimentos marinos antiguos, de las lagunas hipersalinas o de otros acuíferos. Para ello se analizará la distribución de conductividad eléctrica, las relaciones de iones mayoritarios y minoritarios y los índices hidrogeoquímicos rNa/rCl, rNa/rK, rSO_4/rCl, rSO_4 y rCa, utilizando una clasificación de los puntos de agua por acuíferos independientes realizada por Gómez y Calvache, 2009 (Fig. 1).

Contexto Geológico

El sector de estudio se localiza en el extremo suroccidental de la provincia de Alicante. Desde el punto de vista geológico, pertenece al grupo de cuencas sedimentarias Neógeno- Cuaternarias de la Cordillera Bética, concretamente a la cuenca del Bajo Segura (Soria *et al.*, 2007).

El relleno sedimentario se produjo desde el Tortoniense hasta el Cuaternario, presentando una amplia variedad de facies continentales, marinas someras y de plataforma profunda en relación a variaciones del nivel del mar ligadas a la tectónica.

La serie estratigráfica detrítica comienza con un potente paquete de margas y yesos de edad Tortoniense-inicio del Messiniense seguido de unas calcarenitas también messinienses, con un espesor que varía entre los 10 y 110 m. Por sus rasgos sedimentarios se asocian a un ambiente de plataforma somera.

Sobre estos materiales, descansa una unidad de lutitas del Messiniense terminal constituida por margas y limos rojos depositadas en ambiente de plataforma marina profunda que hacia el W aparecen acompañadas de facies continentales con arcilla. (Mediavilla *et al.*, 2007). La potencia de este nivel puede variar desde más de 100 m a desaparecer, tal y como se observa en el borde SW de la zona de estudio, próximo a la localidad de San Miguel de Salinas. Las variaciones de potencia están relacionadas con una disconformidad en el techo del Messiniense que produjo una superficie erosiva sobre estos materiales (Soria *et al.*, 2007). A continuación, aparecen areniscas y calcarenitas de edad Pliocena con una potencia media de 20 m, aunque pueden alcanzar los 85 m puntualmente. La serie culmina con un paquete de hasta 60 m de espesor de margas blancas de la misma edad y limos del Plio-Cuaternario y Cuaternario.

Caracterización Hidrogeológica

El conjunto de acuíferos detrítico-costeros de Torrevieja, está constituido fundamentalmente por dos niveles formados, en primer lugar por las calcarenitas de edad Messiniense, más profundas, y por otro por las arenas y areniscas de edad Plioceno, más someras. Ambos tienen carácter confinado, ya que se encuentran bajo los niveles lutíticos impermeables anteriormente descritos, excepto las estrechas zonas donde el acuífero del Plioceno aflora (Fig. 1).

Existe cierta controversia acerca de la existencia del acuífero más profundo, aunque en estudios estratigráficos recientes (Santisteban *et al.*, 2006, Soria *et al.*, 2007;

Copyright © 2010 Sociedad Geológica de España / www.geogaceta.com

Gómez y Calvache, 2009) se distinguen los dos niveles, manteniendo una geometría compleja, con un espesor muy variable e importantes cambios laterales de facies.

Los límites del sistema son cerrados en su totalidad, excepto en el borde oriental, que se encuentra conectado con el mar Mediterráneo. Su extensión abarca 157 km^2, de los que 16 km^2 son afloramientos del acuífero del Plioceno y el resto tiene un comportamiento confinante.

Resultados

Con el fin de analizar la distribución de las aguas, se ha realizado un análisis de la conductividad eléctrica de todos los sondeos disponibles desde 1972 hasta 2005 utilizando el inventario de puntos de agua clasificado por acuíferos (Gómez y Calvache, 2009).

Se han obtenido los valores medios para los dos acuíferos principales, siendo para el Plioceno, 4300 mS/cm, y para el Messiniense, 7000 mS/cm. Los puntos con mayor conductividad se han localizado en la zona Occidental y Sur, donde la mayor parte de sondeos corresponden al acuífero del Messiniense.

Durante una campaña de muestreo (Rodes y Rodes, 2003) se realizaron perfiles de conductividad eléctrica del agua subterránea en 12 sondeos, resultando en la mayoría de las columnas valores bastante constantes, en torno a 4000 mS/cm.

Sin embargo, en los puntos que captan los dos niveles permeables principales (Fig. 1), se observa un salto de conductividad muy neto entre las cotas 10 y -15 m.s.n.m., en el sector occidental y oriental respectivamente, alcanzándose valores próximos a 15000 mS/cm, hecho que apoya la mayor conductividad de las aguas del acuífero del Messiniense.

A partir de los datos de análisis químico de agua en los sondeos clasificados por acuíferos, se observa que la facies predominante para el acuífero del Messiniense es la clorurada-sulfatada sódica y para el acuífero del Plioceno clorurada sódica (Gómez y Calvache, 2009).

Considerando conjuntamente todos los datos, se analiza la distribución y concentración de algunos iones mayoritarios para caracterizar la posible salinización en zonas costeras. En la figura 2A, se ha representado la relación Cl vs Na de las muestras de agua de los dos acuíferos y del mar y se ha ajustado una línea de tendencia cuyo coeficiente de correlación es de 0.94.

Sin embargo, si se observa con más detalle (Fig. 2B) esta relación presenta diferencias entre los dos acuíferos principales. Se pone de manifiesto, por un lado, que los valores de Cl y Na en el Messiniense son, por lo general más altos, y por otro, que en el caso del acuífero del Plioceno, la relación se separa ligeramente de la línea de mezcla con agua de mar, presentando un contenido en Na más elevado.

El ión sulfato puede aportar información sobre la procedencia de la salinidad. En la figura 2C se ha representado el SO_4 y Cl distinguiéndose dos grupos de aguas.

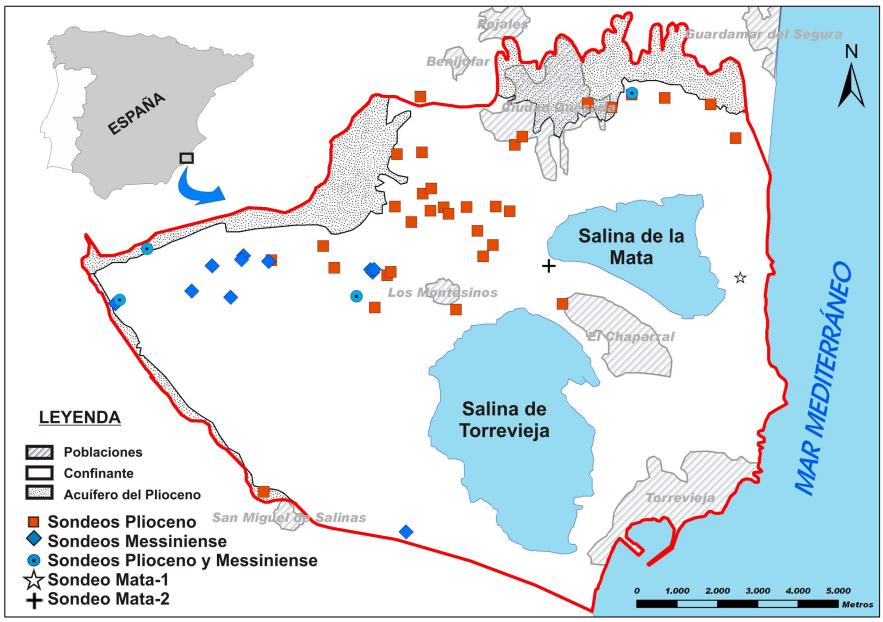

Fig. 1.- Situación del sistema acuífero de Torrevieja indicando los puntos de muestreo utilizados.

Fig. 1.- Situation of aquifer system of Torrevieja indicating the aquifer sampling points.

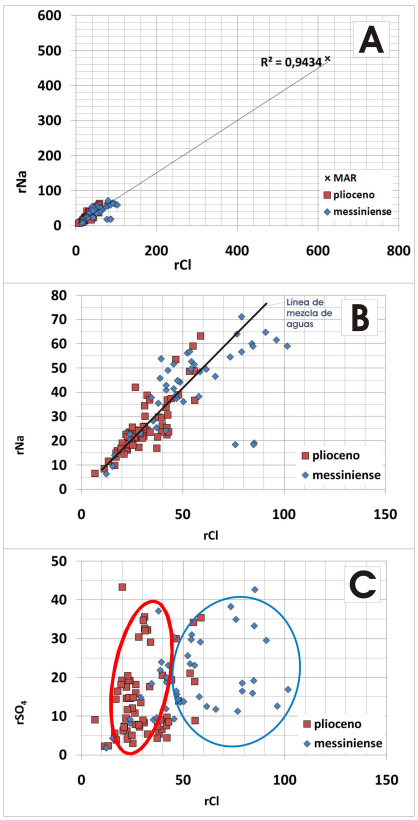

Fig. 2.- Relación entre los iones Cl, SO_4 y Na.

Fig. 2.- Relation between ions Cl, SO_4 and Na.

Destaca que un número importante de muestras del acuífero del Plioceno contienen concentraciones de sulfato más altas en relación al contenido en cloruro. La dispersión del cloro es importante, sobre todo en las aguas del Messiniense que debe estar determinada por una serie de factores que incrementan el porcentaje de cloro con respecto a otros aniones.

El valor del índice hidrogeoquímico rNa/rCl está asociado a la existencia de procesos de cambio de bases, debido a que el ión cloruro no es afectado por la retención en el terreno, a diferencia del ión sodio que sí lo es. También el valor de esta relación puede verse alterado por la meteorización que afecta a algunos silicatos, los cuales podrían liberar sodio. En el agua del mar esta relación tiene un valor aproximado de 0.82 (Herrera, 2001). En la figura 3A se representa este índice respecto a la concentración de cloruro (rCl), donde se observa que la tendencia de las muestras se ajusta a los valores marinos, aunque con cierta dispersión. Entre los valores de las muestras de agua del acuífero del Plioceno y del Messiniense se pueden observar dos grupos de aguas y una zona de mezcla entre ambos. Destaca que las aguas del acuífero del Messiniense,

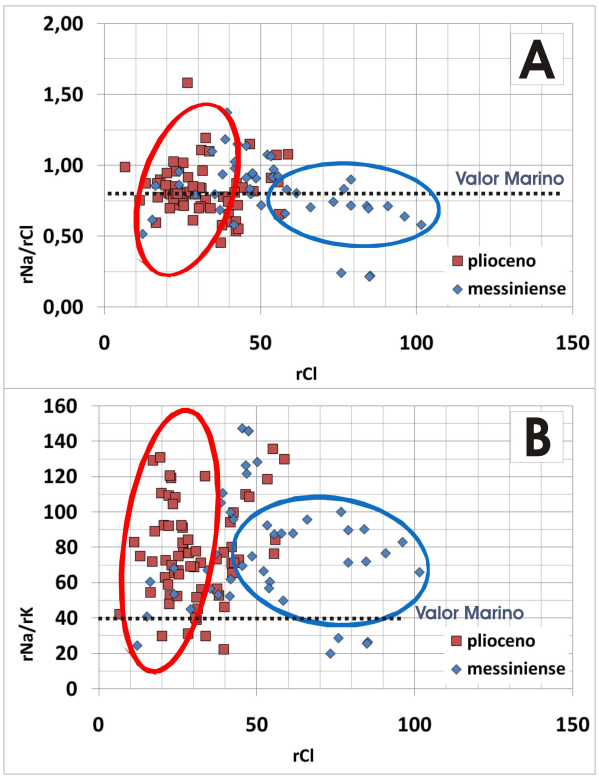

Fig. 3.- Índices Hidroquímicos rNa/rCl y rNa/rK vs rCl.

Fig.3.- Hydrochemical index rNa/rCl and rNa/RK vs rCl.

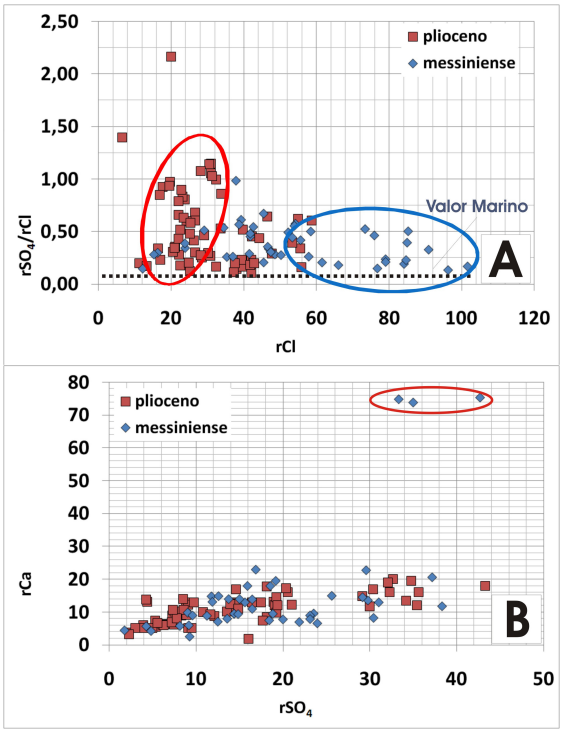

Fig. 4.- Índices Hidroquímicos rSO_4/rCl y rSO_4/rCa vs rCl.

Fig.4.- Hydrochemical indexes rSO_4/rCl y rSO_4/rCa vs rCl..

por regla general, mantienen valores más elevados de cloruros y muchos puntos presentan una rNa/rCl especialmente baja, que indica un enriquecimiento en Cl.

Respecto al índice rNa/rK, en el agua dulce los valores más frecuentes suelen estar comprendidos entre 3 y 250, mientras que en el agua marina varía entre 40 y 50 (Custodio, 2003). En la figura 3B se observa una gran variabilidad de esta relación sin diferenciarse claramente los valores de cada acuífero. No obstante las muestras tomadas en el Plioceno muestran una tendencia a aumentar el índice a medida que aumenta la salinidad, hecho que no ocurre en las muestras tomadas en el Messiniense.

El índice rSO_4/ rCl se puede utilizar para caracterizar aportes suplementarios de sulfato ajenos al origen marino. En general, se observan para esta relación valores similares o por encima del correspondiente al agua de mar (0.11) (Herrera, 2001) aunque existe mucha dispersión, sobre todo en aguas del acuífero del Plioceno (Fig. 4 A). En este caso se encuentran valores de hasta 2, que indican un origen para el sulfato adicional al marino, que podría relacionarse con aguas congénitas con algún contenido en yesos, observados localmente en las facies más continentalizadas.

La relación rSO_4 vs rCa también tiene como objetivo establecer posibles orígenes del sulfato en el agua subterránea (Herrera, 2001). La figura 4B muestra una estrecha relación entre ambos iones en la mayoría de las muestras. Sin embargo, existen tres muestras del Messiniense, que corresponden a uno de los sondeos más marginales del sector occidental, que indican un origen diferente al resto de muestras dada su alta concentración en calcio.

El uso de iones mayoritarios no supone una herramienta usual para el análisis de procesos de salinización debido a que quedan fácilmente expuestos a otros procesos activos que pueden modificar sus contenidos. Por este motivo y con el fin de analizar el origen de la salinización en mayor detalle, se consideran los contenidos en bromuro, como ión minoritario, obtenidos durante una campaña de muestreo (RODES, 2005). Se incluyeron en ésta campaña una muestra de cada laguna, dos piezómetros junto a éstas (sondeos Mata-1 y Mata-2) (Fig. 1).

El uso del bromuro resulta de gran interés, ya que la diferencia entre el contenido del agua del mar y agua dulce, junto a su baja actividad química, lo convierten en buen indicador de intrusión marina frente a otros orígenes de salinidad. El comportamiento es parecido al del cloruro y su correlación suele ser muy elevada, de modo que desviaciones mínimas pueden alertar sobre la existencia de otros orígenes de la salinidad (Castillo y Morell, 1988).

Para estudiar la salinización de las aguas muestreadas en esta campaña, se han utilizado conjuntamente el Br y Cl (Fig. 5A), observándose que existe una relación directa eliminando los puntos hipersalinos influenciados por aguas evaporíticas (lagunas y piezómetro Mata-2 en los que ha tenido lugar la explotación de halita durante muchas décadas) resultando un coeficiente de correlación de 0.99.

La detección de aportes anómalos de bromuro puede hacerse mediante la utilización de la relación rCl/rBr, ya que suele mantenerse en torno a 655 (Custodio, 2003) cuando la procedencia es marina. En la figura 5B se aprecia que en la mayor parte de las muestras la relación no se aleja de este valor, lo que indica que el proceso de enriquecimiento en Cl de las aguas subterráneas es debido a la intrusión de agua marina o bien a la presencia de sedimentos marinos mal lavados, observándose las mismas tendencias que en las relaciones de iones mayoritarios.

Sin embargo, existen valores muy por debajo inducidos por altas concentraciones relativas de Br en el sector de las lagunas debido a que en las zonas de evaporación, el Br no se fija en la halita y se mantiene conservativo, a diferencia del Cl. Éste hecho confirma la desconexión de las lagunas con las aguas subterráneas, exceptuando el sondeo Mata-2, que debe captar un nivel permeable desconectado del sistema de acuíferos principales y cercano a la superficie, de escasa importancia.

Para estudiar conjuntamente los aniones Br, Cl y SO_4 se ha utilizado un diagrama triangular (Fig. 6) donde se consideran valores porcentuales (exagerado 100 veces en caso del Br dada la diferente magnitud de la concentración, que permite conseguir una dispersión mayor de

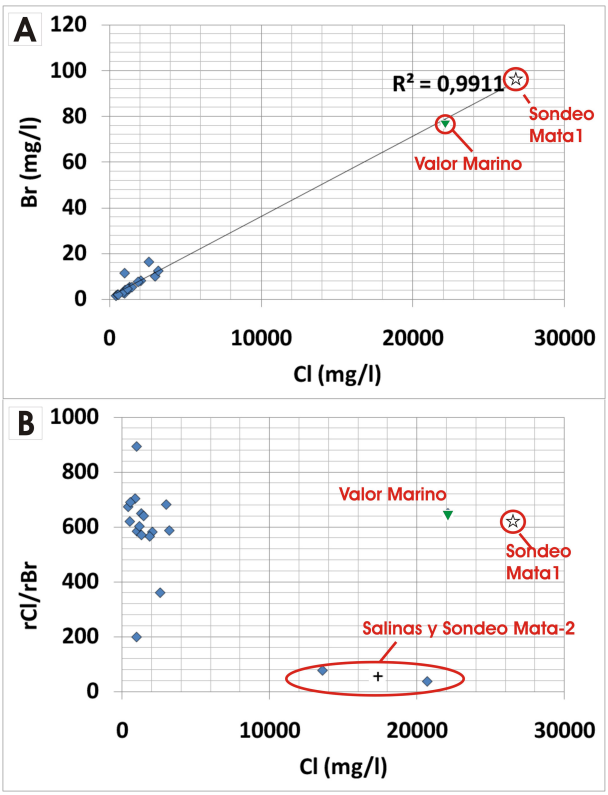

Fig. 5.- (A) Relación Cl vs Br;(B) Índice rCl/rBr.

Fig.5.- (A) Relation Cl vs. Br;(B) Idex rCl/rBr.

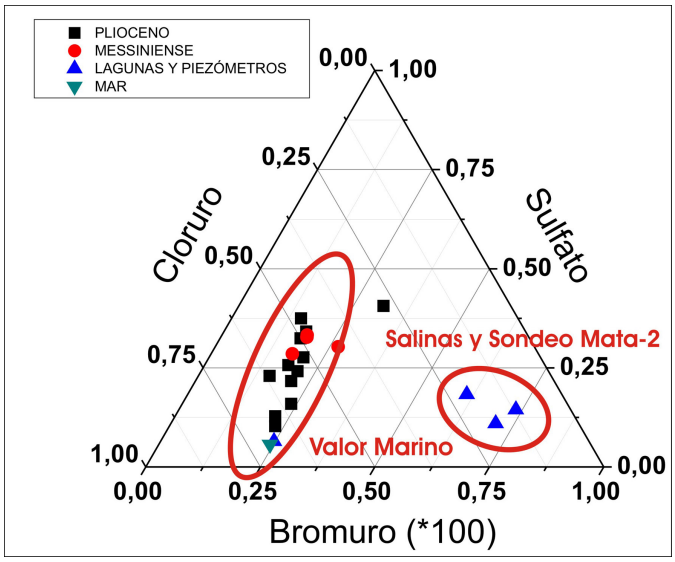

Fig. 6.- Diagrama triangular Br, Cl y SO_4

Fig.6.- Triangular Br, Cl, SO_4 anion diagram

los puntos manteniendo las proporciones). Las aguas representadas muestran dos grupos bien diferenciados: por un lado las muestras que tienden al vértice del Cl y cuyo porcentaje de bromuro es del mismo orden que el valor marino en prácticamente todos los puntos y por otro, las que tienden al vértice del Br, cuyo porcentaje de Br es mayor que el marino. Este segundo grupo incluye las aguas más salinas de todas las muestras, (Lagunas y el piezómetro Mata-2).

Conclusiones

A partir de la distribución de las muestras de agua clasificadas en recientes estudios para dos acuíferos independientes, y analizando la conductividad eléctrica de todas ellas, se observa que el acuífero del Messiniense, cuyas muestras se localizan fundamentalmente en el sector más alejado de la costa, presenta valores más elevados y saltos importantes en los registros continuos de algunos sondeos que captan los dos acuíferos, poniendo de manifiesto que el inferior presenta mayor salinidad.

Mediante el análisis de las relaciones iónicas y los índices hidrogeoquímicos rNa/rCl, rNa/rK, rSO_4/ rCl, rSO_4 vs rCa queda patente que la principal procedencia de la salinidad de las aguas subterráneas es marina (actual o congénita). Generalmente se observan mezclas de dos tipos de agua correspondientes a los dos acuíferos principales.

La identificación de la costra salina que constituyen los materiales cuaternarios lagunares tanto en subsuelo como en superficie y su baja permeabilidad hace poco probable que aguas procedentes de las lagunas salinas suprayacentes contaminen los niveles inferiores. Mediante el uso de bromuro, se demuestra la desconexión de las lagunas con las aguas subterráneas y se confirma que el origen del mismo en la mayor parte de las muestras es de procedencia marina.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado en el marco del convenio entre el IGME, el Dpto. Ciclo Hídrico de la Diputación de Alicante y la UGR durante 2009 siendo los directores del mismo D. José Manuel Murillo Díaz (IGME) y Dª María Luisa Calvache Quesada (UGR).

Adicionalmente se agradece la colaboración de J. Hornero (IGME), J. Soria (UA), M. Fdez. Mejuto (DPA), L. Rodríguez (DPA) y del revisor de este trabajo.

Referencias

Castillo Pérez, E. y Morell, I. (1988). *La Hidroquímica en los estudios de intrusión Marina en los acuíferos españoles*. TIAC'88, 19-73.

Custodio, E. y Alcalá-García, F. J. (2003). *El potencial de la relación Cl/Br como indicador del origen de la salinidad de los acuíferos costeros españoles*. TIAC'03, 401-412.

Gómez Fontalva, J.M. y Calvache, M.L. (2009). *Investigación y evaluación de procesos de intrusión marina mediante la aplicación de un modelo matemático de flujo: Acuífero costero de Torrevieja (Alicante)* UGR–IGME-DPA. 121 p.

Herrera Lameli, C. (2001). *Caracterización hidrogeoquímica del macizo de Betancuria. Fuerteventura, Archipiélago de Canarias.* Tesis Doctoral. Univ. Politécnica de Cataluña. 223 p.

Mediavilla, R., Murillo, J.M. y Santisteban, J.I. (2007). *Boletín Geológico y Minero,* 118, 709-724.

Rodes Amorós, J.J. y Rodes Martínez, J.J. (2003). *Experiencia en la campaña piezométrica y de calidad en los acuíferos costeros de Torrevieja y cabo Roig enfocada a la ejecución de modelos tridimensionales de intrusión.* TIAC'03, 667-671.

RODES (2005). T*oma de muestras en pozos del acuífero Torrevieja. Rodes, minería y aguas*, c.b.

Rodríguez Estrella, T. (2003). *Situación de la intrusión marina en la Cuenca del Segura: evolución desde el TIAC'88*. TIAC'03, 499-507.

Santisteban, J.I. y Mediavilla, R. (2006). *El acuífero de Torrevieja: Estudio estratigráfico e implicaciones hidrogeológicas*. IGME. Madrid. 16 p.

Soria, J.M., Caracuel, J.E., Corbí, H., Dinarès-Turell, J., Lancis, C., Tent-Manclús, J.E., Viseras, C. y Yébenes, A. (2007). *Sedimentary Geology,* 203, 267-288.