

La problemática del establecimiento de condiciones de referencia en aguas superficiales dependientes de las aguas subterráneas. El caso de las áreas semiáridas en el SE de España.

Francisco Sánchez Martos, Juan Gisbert Gallego, Luis Molina Sánchez Y Angela Vallejos Izquierdo

Grupo de Investigación “Recursos Hídricos y Geología Ambiental”, Universidad de Almería. Campus Universitario, 04120 Almería. España.

RESUMEN

Conocer relación agua superficial-subterránea es necesario para establecer las demandas ambientales de las masas de agua subterránea, garantizar el mantenimiento de los ecosistemas dependientes de ellas y definir las condiciones de referencia de las aguas superficiales. En el río Andarax los efectos de esta interacción tienen diferente magnitud y signo. En el río Andarax es especialmente significativo en las áreas de cabecera y en la cuenca baja donde se elevan notablemente la salinidad. En los humedales de Punta Entinas-Cerrillos la calidad de las aguas está relacionada el origen marino, las sales presentes en el sustrato y en algunos sectores se ha detectado una influencia subterránea. El conocimiento de todos los procesos ligados a la interacción agua subterránea-superficial en áreas semiáridas es importante puesto que la presencia de diferentes tipos de agua actúa como agente para favorecer la biodiversidad y deben considerarse a la hora de interpretar los indicadores de calidad de las aguas superficiales.

Palabras clave: dependencia aguas superficiales-subterráneas, humedales, ríos temporales.

1. Introducción

En las áreas semiáridas es frecuente el desarrollo de zonas húmedas y ríos temporales asociados con descargas de agua subterránea, lo que condiciona su grado de permanencia y muestra la dependencia agua superficiales-subterráneas en estas áreas (Stei et al., 2004, Rodríguez et al., 2006, Kohfahl et al., 2008 Carol et al., 2010 entre otros). Por lo que lo tanto, a la hora de considerarse las necesidades ambientales de estos ecosistemas es necesario considerar su grado de dependencia de las aguas subterráneas (Tomlinson y Boulton, 2010) y dado que la interacción aguas superficiales-subterráneas puede ser muy significativas (Schot y Winter, 2006) es necesario tener un marco conceptual que considere adecuadamente la interacción aguas superficiales-subterráneas para la correcta gestión y conservación de los humedales (van der Kamp & Hayashi, 2009; Rodríguez y Benavente, 2008). Esta visión se incluye en la Directiva Marco del Agua (DMA. Directiva 2000/60/EC), donde se considera necesario definir la existencia de ecosistemas directamente relacionados con las aguas subterráneas, además los objetivos de calidad de las masas de agua subterráneas están ligados al mantenimiento de las demandas ambientales de estos ecosistemas terrestres dependientes de las aguas subterráneas. Los parámetros físico-químicos se ven afectado por variables tanto bióticos y abióticos, que pueden cambiar en el espacio y el tiempo (Munné y Prat, 2011; Bernal et al., 2013). Estos cambios son significativos en el área mediterránea, donde las masas de aguas superficiales presentan un patrón estacional muy marcado desde el punto de vista hidrológico, biológico y de los procesos geoquímicas que podrían afectar a las condiciones de referencia físico-químicas (Sánchez Montoya et al., 2009).

A partir de este enfoque general y considerando la singularidad de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en las áreas semiáridas se ha planteado este trabajo. Para ello se presentan dos ejemplos de masas de aguas (ríos temporales y humedales costeros) sobre los que se ha identificado la influencia de las aguas subterráneas, y que representan dos en áreas muy próximas en el espacio pero con procesos totalmente diferentes y con una variabilidad temporal significativa.

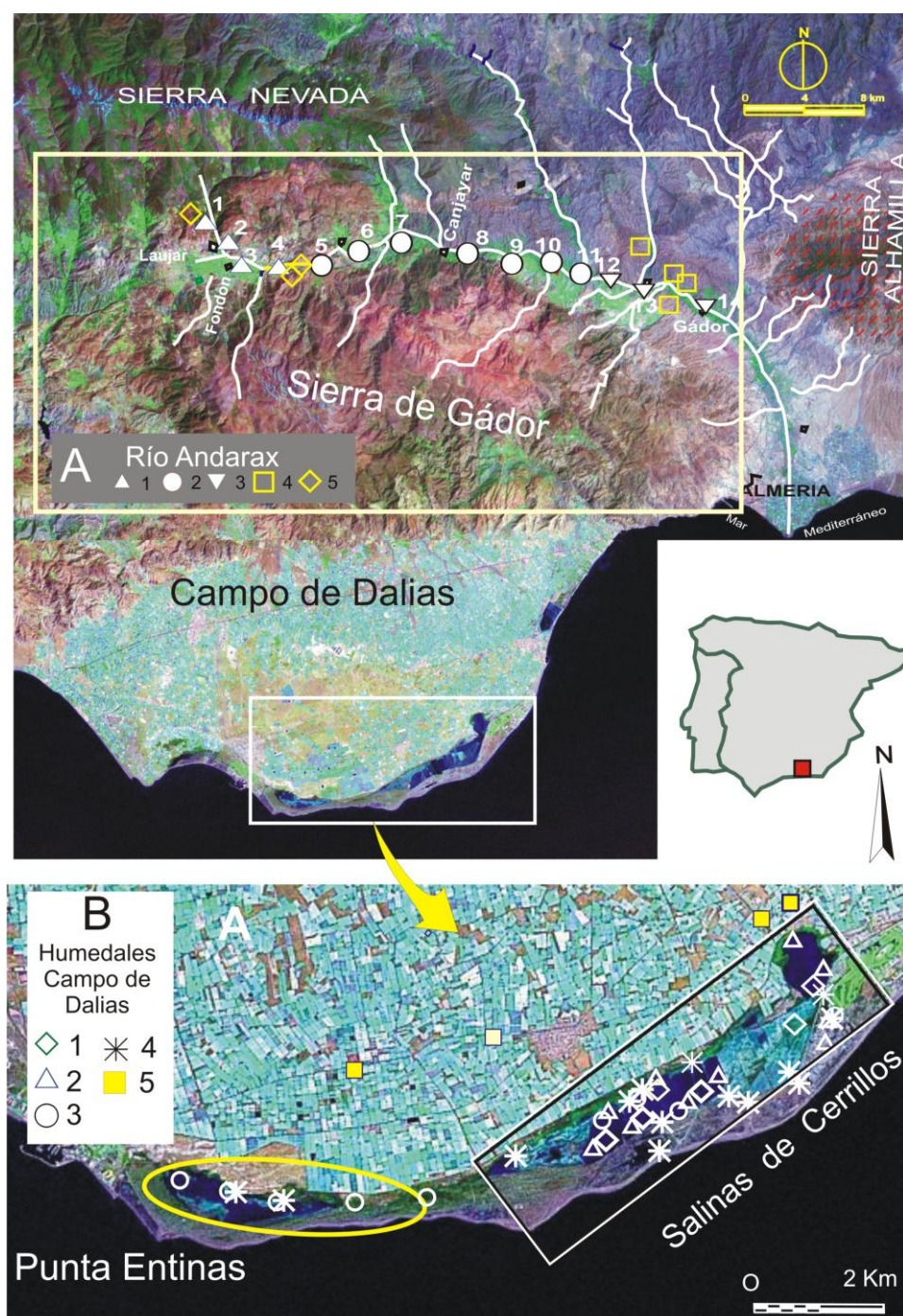


Figura 1.- A) Situación de los puntos muestreado en el río Andarax. Aguas superficiales: Río Andarax (1:

área de cabecera, 2: área central, 3: área final). Aguas subterráneas: 4: Acuífero Detrítico, 5: Acuífero Carbonatado). B) Localización del Campo de Dalías y situación de los puntos de muestreo de aguas superficiales en las series de datos utilizados (1:1985; 2: 1996; 3: Septiembre 2005, 4: Mayo 2009). Se indica los dos puntos acuíferos muestreados representativos de la composición de las aguas subterráneas (5).

2. El area

2.1 Río Andarax

El río Andarax (figura 1) es un cauce típicamente mediterráneo y se caracteriza por la gran variabilidad interanual de su caudal ya que las aportaciones medias se han estimado entre 15 - 19 hm³/año (Carrasco et al. 1984), aunque durante el periodo 1982-1992 oscilan entre valores mínimos de 2.6 y 43.3 hm³/año (Sánchez Martos 1997). Únicamente presenta circulación superficial en Canjáyar durante el periodo Octubre-Junio y los caudales mensuales máximos se producen Febrero, Abril y Mayo lo que refleja un cierto régimen nival (Martín Vivaldi, 1983). Además se presentan todas las variedades de corrientes de agua (continuas, temporales y efímeras) en los diferentes tramos de su cauce y a distintas escalas temporales. Desde el punto de vista hidrogeológico se diferencian dos grandes acuíferos. El acuífero carbonatado está integrado por materiales calizo-dolomíticos aflorantes a lo largo del borde de la Sierra de Gádor. El acuífero detrítico se extiende a lo largo de todo el sector central del valle e incluye a los materiales aluviales y deltáicos, junto a los conglomerados arenoso-limosos deltáicos (Sánchez Martos, 1997).

2.2 Humedales de Punta Entinas-Cerrillos

Los Humedales de Punta Entinas Cerrillos están situados en el borde costero del Campo de Dalías (figura 1). El área de Punta Entinas corresponde a dos albuferas semicolmatadas, separadas del mar por una barra de arenales y dunas. El nivel de inundación superficial es variable, hay dos charcones de aguas permanentes y el resto del espacio costero presenta agua de forma temporal en pequeñas charcas dependiendo de las precipitaciones estacionales. Las Salinas de Cerrillos tienen casi 700 ha de zonas inundables. La paralización de la actividad salinera, a finales de la década de los 80, provocó la pérdida de más de un 70% de la superficie que procedía de agua bombeada desde el mar y actualmente solamente dos charcones mantienen una superficie de con lámina de agua continua a lo largo del ciclo anual. La unidad hidrogeológica Balerna - Las Marinas aflora en el borde meridional de los humedales y su litología está compuesta de calcarenitas, arenas y arenas margosas y se encuentra próxima a los humedales (Molina, 1998). Así desde Punta Entinas hasta cerca de Cerrillos, existen afloramientos de calcarenitas recubiertos localmente por terrazas marinas, cuya potencia disminuye con la proximidad al mar. En el área oriental la fracturación que afecta a las calcarenitas pliocenas puede favorecer un flujo subterráneo hacia el charcón del Hornillo como lo demuestra la dirección del flujo de las curvas isopiezas (Molina y Sánchez, 1996). La escorrentía superficial es escasa, ya que su cuenca está poco jerarquizada por la escasa pendiente y la alteración morfológica provocada por la construcción de invernaderos.

3. Datos

Los datos considerados en el río Andarax se han centrado en con una corriente temporal superficial (situación en figura 1). Se tienen datos de 14 puntos distribuidos a lo largo de 35 kilómetros de cauce, obtenidos en cuatro muestreos durante un ciclo anual. Se han tratado datos de aguas subterráneas en el acuífero carbonatado de Sierra de Gádor (3 puntos) y en el acuífero detrítico (4 puntos) (situación en figura 1). En los humedales Punta Entinas-Cerrillos se han utilizado datos de cuatro periodos diferentes que cubren un amplio intervalo de tiempo. Los datos más antiguos corresponden a 1985 (Dronkert, 1985) con 15 puntos en la etapa final de explotación salinera. En el segundo muestreo realizado en 1996 (Molina y Sánchez Martos, 1996) se muestrearon 10 situados en el área de Cerrillos y se analizó su evolución anual. Los datos más recientes se han tomado en Septiembre de 2005 y Mayo de 2009, en el que se han muestreado 9 puntos distribuidos en el área de Punta Entinas y las Salinas de Cerrillos. Además se han utilizado datos de cuatro puntos acuíferos situados en la unidad acuífera de Balerna – Las Marinas, que rodea al área en su zona continental. Información más detallada de los datos se encuentra en (Sanchez Martos et al., 2013a y 2013b)

4. Resultados y Discusión

4.1 Río Andarax

Las aguas superficiales del río Andarax experimentan un enriquecimiento salino a lo largo del cauce con una evolución desde facies bicarbonatada hasta sulfatada. Esta evolución no es gradual, sino que existen tres variaciones significativas de la salinidad con diferente signo (figura 2).

En la zona de cabecera (A en la figura 2) las aguas tienen baja salinidad y localmente experimentan un rápido incremento de conductividad hasta alcanzar $650 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y de contenido en NO_3^- ($14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) con respecto a los valores medios del área.

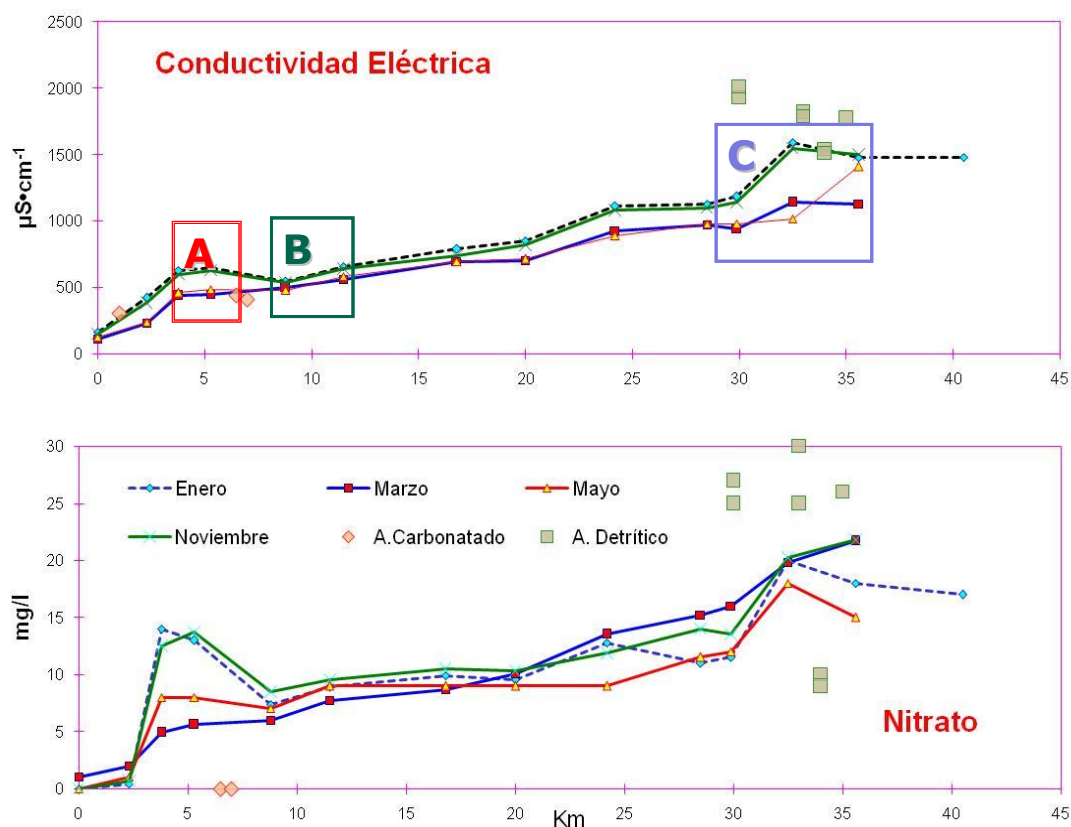


Figura 2 - Evolución longitudinal de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), y NO_3^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en las aguas superficiales del río Andarax.

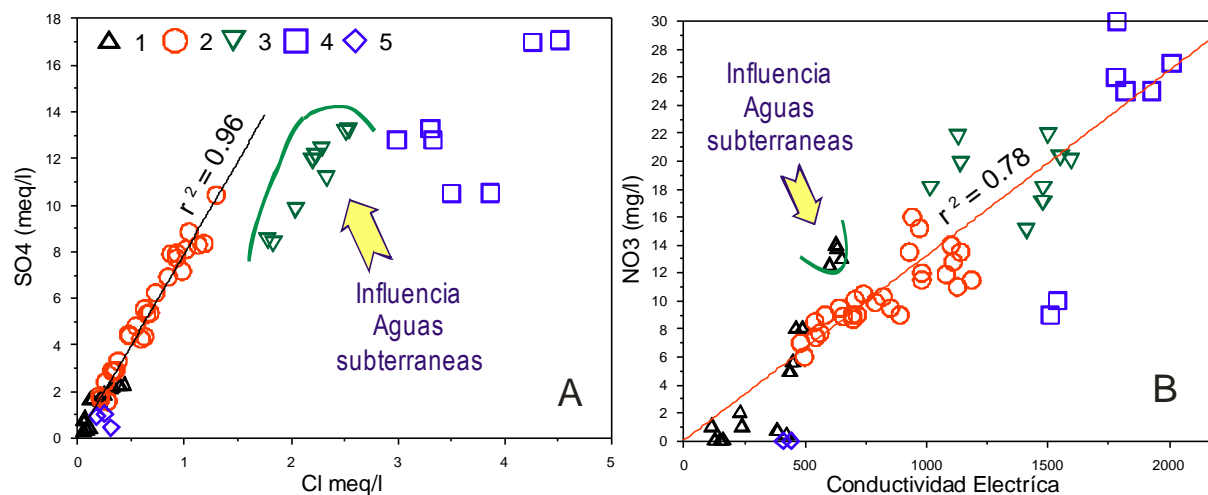


Figura 3 - A) Distribución de los contenidos en SO_4^{2-} y Cl^- . (b) Distribución de los contenidos en NO_3^- con respecto a la conductividad eléctrica. Aguas superficiales (1: cabecera, 2: tramo medio, 3: tramo bajo) y aguas subterráneas (4: acuífero detrítico, 5: acuífero carbonatado).

En la cuenca media (B en figura 2) las aguas superficiales presentan una estabilización de la conductividad eléctrica ($450 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y contenidos iónicos en un pequeño tramo del río En

este sector el río discurre en contacto directo con los materiales carbonatados de Sierra de Gádor. El flujo subterráneo desde el Acuífero Carbonatado hacia el propio río favorece esta disminución de la salinidad, que mantiene una homogeneidad de sus parámetros físico químicos a lo largo de todo el periodo anual de muestreo (Sánchez Martos et al., 2004). En el tramo bajo (C en figura 2) la corriente es temporal y discontinua. Su conductividad se eleva notablemente (1100 - 1650 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) presenta un amplio rango de variación y se alcanzan los contenidos iónicos más altos.

Para analizar más detalladamente esta anomalía sobre el modelo general se ha representado la relación entre los iones Cl^- y SO_4^{2-} (figura 3A). En los puntos situados aguas arriba de la confluencia río Andarax-río Nacimiento estos dos iones muestran una relación directa en las aguas superficiales, que puede considerarse representativa del modelo de enriquecimiento salino de las aguas superficiales del río Andarax. En el área final, al sur de la confluencia río Andarax – río Nacimiento la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ disminuye con respecto a los puntos situados aguas arriba en las áreas de cabecera y central. La influencia de las aguas subterráneas se ha identificado como el factor fundamental para explicar el aumento del contenido en Cl^- en esta área, ya que las aguas del Acuífero Detrítico presentan un mayor contenido en Cl^- como consecuencia de la influencia de los materiales margosos, que constituyen la base del Acuífero Detrítico en esta zona. Esta influencia es más intensa durante el estiaje, cuando el caudal del río disminuye y la corriente es discontinua (Sánchez Martos et al., 2004).

Un aspecto especialmente significativo es el aumento del contenido en NO_3^- en el área de A. Al considerar los contenidos en NO_3^- de las aguas superficiales con respecto a la conductividad eléctrica se observa que están directamente correlacionados ($r^2 = 0.78$) (figura 3B). Sin embargo tres puntos del área de cabecera están alejados de la línea de ajuste, por lo que debe existir alguna influencia local que favorece el incremento del contenido en NO_3^- y la salinidad. Estos puntos se encuentran en la depresión de Laujar de Andarax, donde existe una intensa actividad agrícola tradicional. Estos máximos valores pueden relacionarse directamente con el lavado del NO_3^- que se infiltran en el acuífero como consecuencia de las actividades agrícolas y posteriormente se moviliza hasta alcanzar las aguas superficiales del río Andarax, un proceso identificado en diferentes áreas templadas (Duff y Triska 2000; Lamontagne et al. 2005).

4.2 Humedales Punta Entinas-Cerrillos

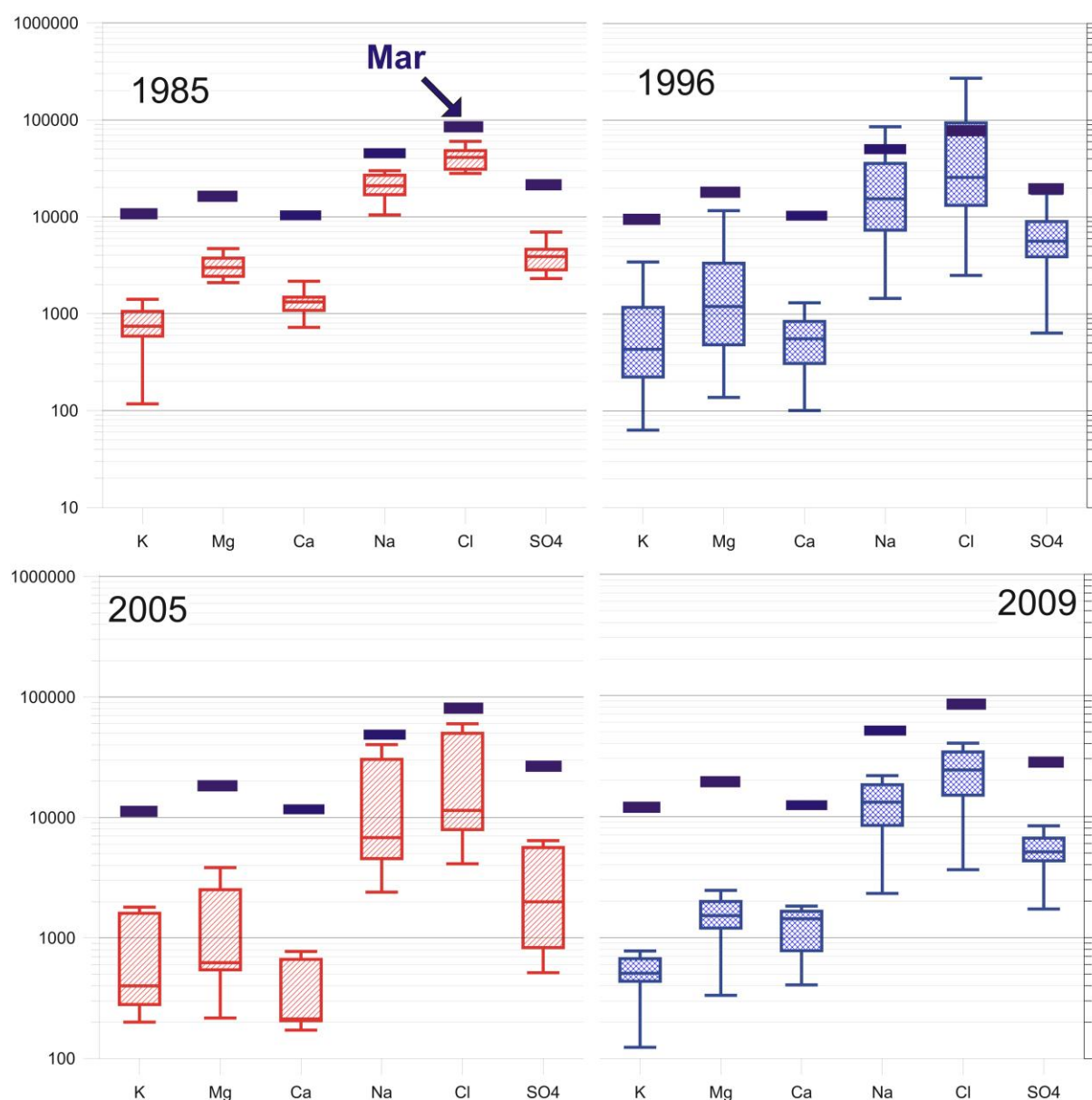


Figura 4.- Diagrama de box-plots de los datos utilizados según los series de datos (1985, 1996, Septiembre 2005 y Mayo 2009). Se ha representado la amplitud mediante una línea, los percentiles del 25 % y 75 % así como los valores medios. Se indica la referencia del agua de mar mediante una trama negra.

En los humedales de Punta Entinas Cerrillos se tienen datos hidroquímicos desde el 1985 hasta 2009, lo que permite detectar las posibles modificaciones en la calidad de sus aguas en un amplio intervalo de tiempo. La salinidad oscila entre en un amplio rango ($8.000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ - $160.000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) lo que refleja los diversos factores que actúan sobre las aguas. En la figura 4 muestra la variabilidad temporal de los contenidos iónicos en las aguas superficiales de los humedales y reflejan la evolución descendente general de la salinidad, como consecuencia de la diferentes condiciones ambientales y los efectos antrópicos sobre su uso: En la figura 4 A los parámetros tienen la menor variabilidad ya que el muestreo se efectuó en la fase final de la explotación salinera y existía una conexión directa con el mar. En la figura 4B presentan los

valores medios más bajos y una mayor dispersión. Esta serie de datos corresponden a un periodo en el que la explotación salinera había cesado y se realizaron cuatro muestreos durante un año, por lo que estos datos representan unos valores medio anuales. Los datos presentados en la figura 4C y 4D son más homogéneos y ligeramente más bajos que la serie de datos anteriores.

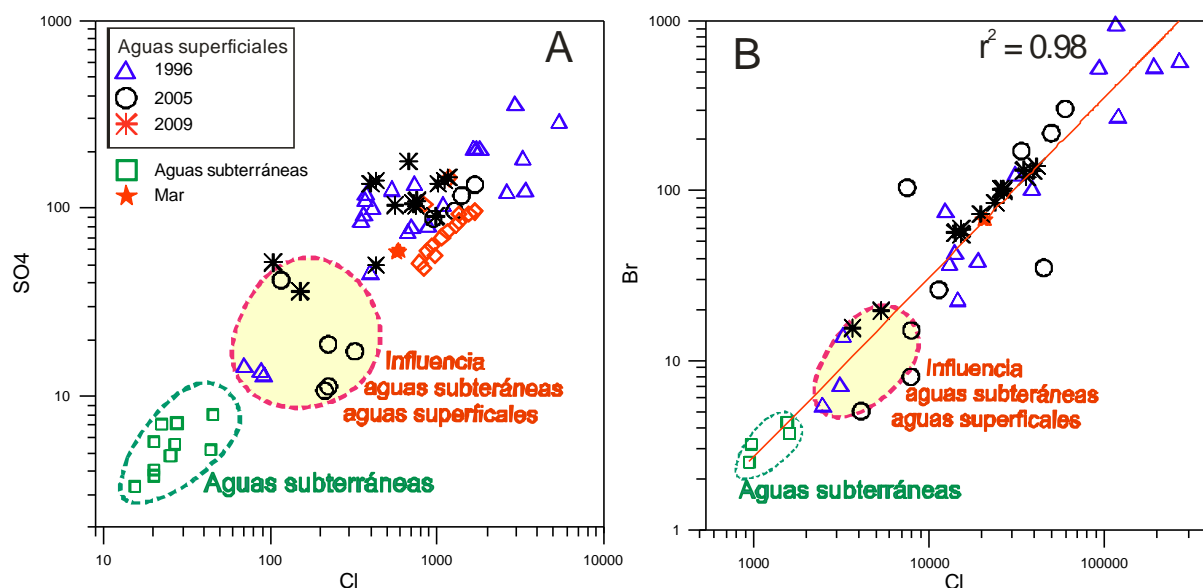


Figura 5.- A) Distribución de los contenidos en SO₄ con respecto al Cl. B) Distribución de los contenidos en Br con respecto al Cl (mg·L⁻¹).

Al representar la distribución relativa entre los iones SO₄²⁻, Cl⁻ y Br⁻ (figura 5) se observa el modelo general de evolución de la salinidad de las aguas de los humedales Punta Entinas Cerrillos que tienen una elevada variabilidad química con la presencia de puntos que tienen una salinidad inferior al agua de mar y otros que la duplican ampliamente. La distribución relativa entre SO₄²⁻ y Cl⁻ presenta el modelo general: las aguas más salinas están situadas en las salinas de Cerrillos y tiene los contenidos iónicos más elevados que el agua de mar. Los puntos están dispersos ya que la mineralización de las aguas está influenciada por la concentración salina ligada a la evaporación directa del agua de mar y por disolución de sales presentes en el substrato de las charcas. Además existen una serie de puntos, con contenidos inferiores al agua de mar, que muestran la influencia de las agua subterráneas sobre las agua superficiales (Sánchez Martos et al., 2013a). Estos iones tienen una diferente afinidad con el proceso de evaporación del agua de mar, ya que el Cl⁻ tiene disposición a formar sales y el Br⁻ se acumula en la salmuera residual, por lo que se ha utilizado ampliamente para estudiar el proceso de evaporación y salinización de las aguas (Richter y Kreitler, 1993). La relación entre Cl⁻ y Br⁻ (figura 5b) muestra el buen ajuste que tienen estas dos variables ($r^2 = 0.98$) como consecuencia del origen marino de estas aguas. Además hay una serie de puntos que están en una situación intermedia entre el mar y las aguas subterráneas del acuífero de Balerna-Las Marinas que rodea a los humedales en su parte meridional. Estos puntos tienen menos salinidad y están en la zona de los humedales más cercano al acuífero; incluso en algunos sectores la lámina de agua está en contacto directo con las calcarenitas pliocenas y las costras carbonatadas que cubren las terrazas marinas cuaternarias aflorantes en el extremo sur del

campo de Dalias.

Consideraciones Finales

La Directiva Marco del Agua considera la relación que existe entre los cuerpos de agua superficial y el agua subterránea. Una de las condiciones necesarias para establecer las demandas ambientales en las masas de agua subterránea es garantizar el mantenimiento de los ecosistemas dependientes. En el SE de España existen buenos ejemplos de masas de agua superficiales donde la influencia de las aguas subterráneas es significativa. En estas áreas se pone de manifiesto la dificultad para definir unas condiciones de referencia tal y como requiere la DMA.

Los ríos en áreas semiáridas poseen una elevada variabilidad temporal tanto en lo relativo a su cantidad y calidad del agua con oscilaciones de salinidad notables. Todo ello se relaciona con su climatología y con su grado de dependencia de las aguas subterráneas. El río Andarax es un buen ejemplo de la variedad de tipologías presente en las áreas semiáridas. Es un río continuo en el área de cabecera, temporal en su zona media y efímero en la zona baja. El conocimiento detallado de la dependencia agua superficial- subterránea es esencial para la gestión adecuada del agua. Esta influencia puede actuar en diferente sentido, aumentando o disminuyendo notablemente la salinidad las aguas superficiales sobre lo que además actúan los efectos antrópicos. Por tanto el mantenimiento del buen estado ecológico está condicionado por la influencia de esas aguas subterráneas y deberá considerarse a la hora de definir las condiciones de referencia.

Las aguas presentes en los humedales costeros de Punta Entinas-Cerrillos tienen una notable variabilidad como consecuencia de un conjunto de factores diversos: activa dinámica geológica, la naturaleza permeable de estos materiales permite el contacto entre las aguas subterráneas y el mar, uso antrópico de espacio, a través de la explotación salinera, lo que ha modificado fuertemente en algunos sectores la dinámica hidrológica natural. Todos estos factores afectan notablemente al establecimiento de las condiciones de referencia para definir el buen estado de las aguas superficiales. A partir de herramientas hidrogeoquímicas se ha detectado que la salinidad de las aguas está relacionada con las sales presentes en el sustrato de cada una de las charcas; mayoritariamente de origen marino, pero con influencia subterránea en algunos sectores y finalmente actúa sobre todo esto la evaporación directa.

A la hora de definir las condiciones de referencia para las aguas superficiales deberá tenerse en cuenta los cambios en los parámetros físico-químicos que se ven afectados por el grado de dependencia de los ecosistemas acuáticos de las aguas subterráneas. Estos cambios detectados en los dos casos aplicados son de diferente magnitud y en algunos casos de signo contrario. En unos casos implica una disminución de la salinidad de las aguas superficiales, mejorando su calidad y en otros casos provoca un aumento, empeorando notablemente la calidad. Esto es especialmente significativo en las áreas de cabecera del río Andarax donde la salinidad es muy baja.

Finalmente es necesario resaltar la importancia que tiene el conocimiento de todos los procesos ligados a la interacción agua subterránea-superficial en áreas semiáridas, puesto que

la presencia de diferentes tipos de agua, actúa como agente para favorecer la biodiversidad y deben considerarse a la hora de interpretar los indicadores de calidad de las aguas superficiales. Desde este punto de partida es necesario cuantificar la influencia de esta interacción sobre la cantidad y calidad del agua, estudiando los impactos antrópicos y su relación con los ecosistemas dependientes. Aspecto necesario para buscar y validar indicadores aplicables al control de las masas de agua temporales que puedan integrarse en estrategias y modelos de gestión.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto P11-RNM-8115 financiado por la Junta de Andalucía

Referencias Bibliográficas

- Bernal, S. Schiller, D. Sabater, F. y Martí, E. (2013): Hydrological extremes modulate nutrient dynamics in mediterranean climate streams across different spatial scales. *Hydrobiologia* vol:719, 31-42.
- Carol, S.E. Kruse, E.E. y Pousa, J.L. (2010): Eco-hydrological role of deep aquifers in the Salado sedimentary basin in the Province of Buenos Aires, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, vol. 60,749–756
- Dronkert, H. (1985): Evaporite models and sedimentology of messinian and recent evaporites. *GUA papers of geology, Series 1*, nº 24,30-48.
- Duff, J.F. y Triska, F.J. (2000): Nitrogen Biogeochemistry and Surface-Subsurface Exchange in Streams. In J.B. Jones and P.J. Mulholland, eds., *Streams and Ground Water*, pp. 197-220. Academic Press, San Diego, USA.
- Kohfahl, C. Rodríguez, M. Fenk, C. Menz, C. Benavente, J. Hubberten, H. Hanno Meyer, H. Paul, L. Knappea, A. Lopez-Geta, J.A. y Pekdeger, A. (2008): Characterizing flow regime and interrelation between surface-water and ground-water in the Fuente de Piedra salt lake basin by means of stable isotopes, hydrogeochemical and hydraulic data. *Journal of Hydrology*, nº 351,170–187.
- Lamontagne, S. Leaney, F.W. y Herczeg, A.W. (2005): Groundwater–surface water interactions in a large semi-arid floodplain: implications for salinity management. *Hydrological Processes*, vol, 19, 3063–3080
- Molina Sánchez, L. (1998); *Hidroquímica e intrusión marina en el Campo de Dalías (Almería)*. Tesis Doctoral. Univ. of Granada. 340 pp.
- Munné, A. y Prat, N. (2011): Effects of Mediterranean climate annual variability on stream biological quality assessment using macroinvertebrate communities, *Ecological Indicators*, vol: 11, 651–662, 2011.
- Richter, B. C. y Kreitler, C. W. (1993): *Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization*. CRC press Inc. 258 pp.
- Rodríguez-Rodríguez, M. Benavente, J. Cruz-San Julián, J.J. y Moral Martos, F. (2006): Estimation of groundwater exchange with semiarid playa lakes (Antequera region, southern Spain). *Journal of Arid Environment*, vol: 66, 272-289.

- Rodríguez-Rodríguez, M. y Benavente, J. (2008): Definition of Wetland Typology for Hydro-morphological Elements Within the WFD. A Case Study from Southern Spain. *Water Resources Management*, vol. 22, 797-821
- Sánchez Martos, F. (1997): Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería). Tesis doctoral, Universidad de Granada
- Sánchez-Martos, F. Pulido-Bosch, A. Vallejos Izquierdo, A. Gisbert Gallego, J. Fernández Cortés, A. (2004): Consideraciones sobre la evolución hidrogeo-química de las aguas superficiales en el río Andarax (Almería). *Geotemas* vol 6, nº 4, 185-188
- Sánchez-Martos, F. Gisbert Gallego, J. Molina Sánchez, L. y Pulido-Bosch, A. (2013a): Influence of Interactions of Surface Waters-Groundwaters on the Chemistry of Surface Waters in the River Andarax Catchment (Almería, SE Spain). In: *Management of Water Resources in Protected Areas*. Hermes Farfán González, José Luis Corvea Porras, Irene de Bustamente Gutiérrez, James W. LaMoreaux (eds) Springer Berlin Heidelberg, 285-291.
- Sánchez Martos, F. Molina-Sánchez, L. y Gisbert-Gallego, J. (2013b): Groundwater-wetlands interaction in coastal lagoon of Almería (SE Spain). *Environmental Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s12665-013-2695-2
- Sánchez-Montoya, M.M. Vidal-Abarca, M. Puntí, T. Poquet, J.M. Prat, N. Rieradevall, M., Alba-Tercedor, J. Zamora-Muñoz, C. Toro, M. Robles, S. Álvarez, M. y Suárez, M.L. (2009): Defining criteria to select reference sites in Mediterranean streams. *Hydrobiologia*. Vol, 619, 39-54.
- Schot, P. y Winter, T. (2006): Groundwater-surface water interactions in wetlands for integrated water resources management. *Journal of Hydrology*, nº 320, nº (3-4), 261-263
- Sophocleous, M.A. (2002): Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, vol, 10, 52-67
- Stei, E.D. Mattson, M. Fetscher, A.E. y Halama, K.J. (2004): Influence of geologic setting on slope wetland hydrodynamics. *Wetlands*, vol. 24, nº 2, 244-260
- Tomlinson, M. y Boulton, A. (2010): Ecology and management of subsurface groundwater dependent ecosystems in Australia. *Marine and Freshwater Research*, vol, 61, nº 8, 936-949
- van der Kamp, G. y Hayashi, M. (2009): Groundwater-wetland ecosystem interaction in the semiarid glaciated plains of North America. *Hydrogeology Journal*, vol: 17, 203-214.