

Aguas subterráneas fósiles ligadas a acuíferos costeros

Fossil groundwater linked to coastal aquifers

Fernando Sola¹, Luis Molina¹ y Ángela Vallejos¹

¹ Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Dpto. Biología y Geología. Universidad de Almería. Carretera Sacramento s/n, 04120, Almería. fesola@ual.es; lmolina@ual.es; avallejo@ual.es.

ABSTRACT

Two aquifers have been studied, the coastal plain of Cabo de Gata and the Andarax river delta, on the Almería coast. The apparent age of its waters has been determined, which has made it possible to differentiate four water bodies in each of these aquifers: freshwater, interface, seawater and paleoseawater. The fresh and marine water bodies have been dated as recent, registering the paleoseawater values around 10 ka. The interface shows an intermediate age. In the plain of Cabo de Gata, the paleowater has a salinity higher than seawater, while in the Andarax delta the salinity is identical to current seawater. The contrast of densities between the different water bodies conditions the geometry and the level of advance of these bodies in the aquifer. Paleogeographic evolution has played an important role in the current configuration of these aquifers.

Key-words: Coastal aquifer, radioisotopes, Cabo de Gata, Andarax river delta.

RESUMEN

Se han estudiado dos acuíferos, llanura costera de Cabo de Gata y delta del río Andarax, en el litoral almeriense. La edad aparente de sus aguas ha sido determinada, lo que ha permitido diferenciar cuatro cuerpos de agua en cada uno de estos acuíferos: agua dulce, interfase, agua marina y paleoagua de mar. Los cuerpos de agua dulce y marina han sido datados como recientes, registrando el paleoagua de mar valores en torno a 10 ka. La interfase muestra una edad intermedia. En la llanura de Cabo de Gata, el paleoagua presenta una salinidad superior al agua de mar, mientras en el delta del Andarax la salinidad es idéntica al agua de mar actual. El contraste de densidades entre los diferentes cuerpos de agua condiciona la geometría y el grado de avance de estos cuerpos en el acuífero. La evolución paleogeográfica ha jugado un papel importante en la configuración actual de estos acuíferos.

Palabras clave: Acuífero costero, radioisótopos, Cabo de Gata, delta del río Andarax,

Geogaceta, 71 (2022), 43-46
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 15/07/2021
Fecha de revisión: 29/10/2021
Fecha de aceptación: 26/11/2021

Introducción

Aquellos acuíferos en los que uno de sus bordes está limitado por una masa de agua superficial, como lo pueden ser los acuíferos costeros, representan áreas con cierta complejidad hidrogeológica, especialmente si existe un fuerte contraste de densidades entre el agua subterránea y la superficial. En los acuíferos costeros, la carga hidrostática de la masa de agua marina favorece la infiltración de esta en el acuífero a través del lecho marino. El agua marina al ser más densa que el agua dulce del acuífero se aloja bajo esta, penetrando en forma de cuña tierra adentro, en ocasiones hasta decenas de kilómetros.

El grado de penetración de la cuña salina, en una escala temporal más amplia, puede variar también de manera significativa como consecuencia de las fluctuaciones relativas del nivel del mar. Estas variaciones han sido especialmente intensas a lo largo del Cuaternario. Así, en los últimos 16 ka el nivel eustático ha ascendido 120 m, lo que ha reconfigurado completamente la hidrodinámica de todos los acuíferos costeros alrededor del mundo (Lee *et al.*,

2016). Como consecuencia de estas variaciones, masas de agua salina pueden quedar desconectadas del régimen de flujo actual por miles de años, convirtiéndose en aguas "fósiles". Existen distintas técnicas geoquímicas que nos permiten datar la edad relativa de infiltración de esas masas de agua como puede ser la concentración en radioisótopos como ¹⁴C, ⁸¹Kr y ³H, o mediante la presencia de moléculas de origen antrópico en las aguas subterráneas tales como los CFCs (Han *et al.*, 2012; Yokochi *et al.*, 2021). Así, se han detectado masas de aguas salinas correspondientes a paleointrusiones marinas en distintas partes del mundo (Yechieli *et al.*, 2001; Han *et al.*, 2012).

En este trabajo se estudian dos acuíferos de la costa sur de la provincia de Almería con objeto de identificar las características y edades de los distintos cuerpos de agua que albergan, y de este modo, poder inferir la evolución hidrogeológica que pueden haber sufrido.

Contexto hidrogeológico

La cuenca de Almería-Níjar es una depresión tectónica limitada por los relie-

ves de Sierra Alhamilla al norte, Sierra de Gádor al oeste y Sierra de Cabo de Gata al este, estando al sur limitada por el mar Mediterráneo (Fig. 1). El área se caracteriza por un clima mediterráneo seco con valores medios de precipitación anual que no superan los 200 mm.

Desde el punto de vista hidrogeológico pueden distinguirse dos sistemas acuíferos principales: el Campo de Níjar y el Bajo Andarax. El acuífero del Campo de Níjar está formado por materiales pliocuaternarios. Este acuífero está compartimentado por la zona de falla de Carboneras, dejando en su parte oriental una pequeña subunidad acuífera conocida como Hornillo-Cabo de Gata, cuya franja litoral forma parte de este estudio (zona 1). En esta franja litoral los espesores del material acuífero rondan los 100 m y están constituidos por arenas y gravas pliocenas depositadas en un medio deltaico y conglomerados cementados, depósitos de playa pleistocenos.

El acuífero detrítico del Bajo Andarax engloba materiales de distinta granulometría que afloran a lo largo de todo el valle del río Andarax. En él se incluyen depósitos pliocenos arenoso-conglomeráticos

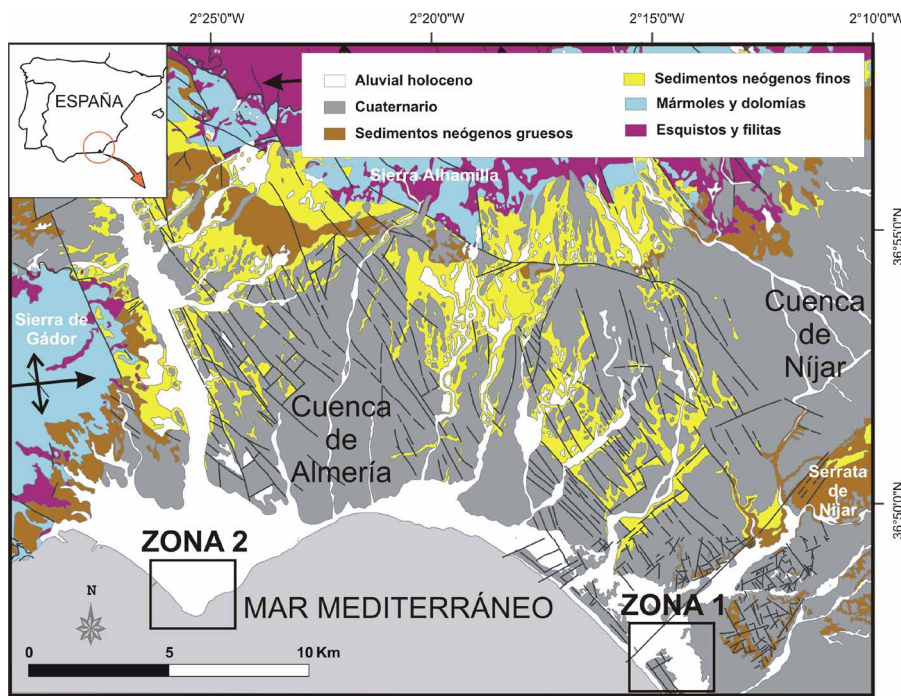


Fig. 1.- Mapa geológico simplificado de la cuenca Almería-Níjar en el que se indican las dos zonas de estudio (zona 1: franja litoral de Cabo de Gata y zona 2: delta del río Andarax). Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Simplified geological map of the Almería-Níjar basin in which the two study areas are indicated (zone 1: coastal strip of Cabo de Gata and zone 2: delta of Andarax river). See color figure in the web.

de facies fluvio-deltaicas junto con materiales aluviales del río y delta actual. Los depósitos deltaicos superan los 200 m de espesor en algunos puntos, disminuyendo paulatinamente de potencia hacia el sur, donde predominan las facies arenoso-limosas. Por su parte, los depósitos aluviales del río lo constituyen materiales detríticos groseros con elevada permeabilidad y un espesor medio de 30-40 m. Finalmente, los materiales holocenos del delta en continuidad lateral con los materiales aluviales constituyen una capa decamétrica de limos grises de la llanura de inundación,

que progradan sobre depósitos groseros. Estos tres conjuntos de depósitos conforman un mismo acuífero en el delta del río Andarax (zona 2), dado que existen relaciones laterales entre ellos, y en algunos puntos se explotan conjuntamente.

Materiales y Métodos

Se realizaron registros verticales de temperatura y conductividad en campo mediante sonda eléctrica Solinst 104 TLC en sondeos localizados a menos de 500 m de la línea de costa. Gracias a estos perfi-

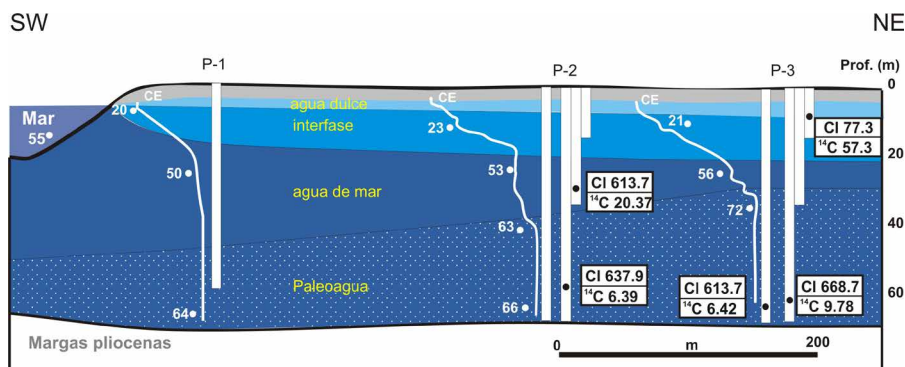


Fig. 2.- Corte del acuífero en zona de estudio 1 (fig. 1), donde se indican las concentraciones de Cl (meq/L) y ¹⁴C (pMC) correspondientes a las muestras de agua subterránea tomadas en profundidad. Se incluyen registros verticales de conductividad eléctrica (CE) en mS/cm. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Aquifer cross-section in the study zone 1 (fig. 1), where Cl (meq/L) and ¹⁴C (pMC) concentrations corresponding to groundwater taken in depth can be observed. Vertical logs of electrical conductivity in mS/cm have been included. See color figure in the web.

les se ha determinado la profundidad de muestreo. Las muestras fueron tomadas mediante un muestreador a intervalos discretos (Solinst Mod. 425).

El contenido en tritio se ha determinado con un contador de centelleo líquido de bajo fondo, mediante previo enriquecimiento electrolítico de la muestra en el laboratorio del CEDEX (Madrid). Los análisis de radiocarbono se realizaron en el Isotope Tracer Technologies laboratory (Waterloo, Canadá).

Se ha utilizado el modelo de Fontes y Garnier (1979), basado en el balance de masas de las principales especies de carbono o isótopos de carbono (¹⁴C y ¹³C) de DIC en el agua, ya que este modelo proporciona edades de carbono realistas como se ha demostrado en muchos estudios (Han y Plummer, 2016).

Franja litoral de Cabo de Gata

En la llanura costera de Cabo de Gata existen varios piezómetros que cortan todo el tramo acuífero hasta su base impermeable, localizada aproximadamente 100 m bajo el nivel del mar. La distancia de estos piezómetros a la línea de costa varía entre 50 y 500 m. Este conjunto de piezómetros constituye una adecuada red de control, que nos aporta información de las características hidrogeoquímicas del acuífero en todo su espesor. Algunos de estos piezómetros forman parte de un enjambre, con diferentes longitudes (fig. 2).

Los perfiles de conductividad eléctrica realizados en estos piezómetros muestran que se trata de aguas salobres a hipersalinas, con valores de conductividad que oscilan entre 6 y 72 mS/cm. En general, los valores de conductividad más altos se registran en las zonas profundas de los piezómetros más alejados de la línea de costa.

Se han tomado 5 muestras de agua subterránea a distintas profundidades para analizar sus concentraciones en ¹³C y ¹⁴C. Los valores de ¹³C varían entre -6 y -9.4 ‰, siendo más negativos cuanto más superficial es la muestra. Por su parte, los valores de ¹⁴C oscilan entre 6.39 y 57.3 pMC, correspondiendo los valores más altos a las aguas más superficiales (Tabla I).

Delta del río Andarax

Se han seleccionado 5 piezómetros alineados perpendicularmente a la línea de costa, y que cortan todo el tramo acuífero, en el delta del río Andarax (zona de estudio 2). Estos puntos de control se en-

ZONA 1	Prof. (m)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	^{14}C (pMC)	Edad (ka)
P-2	30	-6.59	20.37	0.7
P-2	66	-6.00	6.39	10.2
P-3	8	-9.42	57.30	R
P-3	68	-6.49	9.78	7
P-3	69	-6.16	6.42	10.3
ZONA 2	Prof. (m)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	^{14}C (pMC)	Edad (ka)
Agua de mar	0	-0.58	101.31	R
P-4	69	-9.63	68.15	R
P-5	69	-6.37	69.69	R
P-7	80	-8.59	20.14	11.4
P-8	12	-11.25	62.97	R
P-8	95	-7.75	23.60	10.7

Tabla 1.- Resultados analíticos de la edad del agua subterránea (zona 1: franja litoral de Cabo de Gata y zona 2: delta del río Andarax), utilizando el modelo propuesto por Fontes y Garnier (1979). R: agua reciente.

Table 1.- Analytical results for the groundwater age (zone 1: coastal strip of Cabo de Gata and zone 2: delta of Andarax river) using model proposed by Fontes and Garnier (1979). R: recent water.

cuentran a una distancia de entre 50 m y 500 m de la línea de costa (fig. 3).

Al igual que en la zona de estudio 1, se han tomado 5 muestras de agua a distintas profundidades para la determinación de sus concentraciones en ^{13}C y ^{14}C . Los valores de ^{13}C medidos oscilan entre -6.4 y -11.2 ‰, mientras que los valores de ^{14}C están comprendidos entre 20.1 y 69.7 pMC, registrándose de nuevo los valores más altos en las muestras más superficiales (Tabla I). También se ha determinado la concentración en Tritio en 15 muestras de agua subterránea, a distinta profundidad, en los piezómetros de control. Las concentraciones obtenidas en Tritio varían entre 0.2 y 4.8 UT (fig. 3).

Discusión

Los valores de conductividad eléctrica medidos en la llanura costera de Cabo de Gata (hasta 72 mS/cm) superan ampliamente los valores de conductividad del agua de mar (55 mS/cm). Estas aguas de conductividad anómalamente alta registran concentraciones en ^{14}C más bajas. Las edades relativas calculadas mediante el modelo de datación de Fontes y Garnier (1979) registran valores en torno a 10 ka. Por su parte, las aguas más superficiales de este acuífero, con profundidad inferior a 30 m, serían aguas recientes de acuerdo con el modelo de datación utilizado. Re-

sultados similares han sido obtenidos en el delta del río Andarax, si bien en este segundo caso, las conductividades del agua subterránea no superan la conductividad del agua de mar.

La hipersalinidad registrada en la parte inferior del acuífero de la llanura costera de Cabo de Gata sería debida a la presencia de un paleolagoón costero (Sola *et al.*, 2014; Vallejos *et al.*, 2018). Las aguas de este habrían estado expuestas a evaporación, favoreciendo el incremento en la concentración salina de sus aguas. Parte de estas aguas se habrían infiltrado en el acuífero y por densidad, se alojarían en las partes inferiores del mismo.

En el caso del delta del río Andarax, las aguas de paleointrusión marina presentan valores de conductividad eléctrica iguales al agua de mar actual. Solamente los piezómetros más próximos a la línea de costa (P-4 y P-5, fig. 3) registran una salinidad similar al agua de mar, tratándose de aguas recientes de acuerdo con las concentraciones en ^{14}C y ^3H medidas. Por lo tanto, la cuña de intrusión de agua de mar actual se restringe solamente a esta franja más próxima a la costa (fig. 3). Tierra adentro se pueden diferenciar 3 cuerpos de agua en función de su salinidad y edad calculada a partir de los modelos de datación. Desde la superficie hasta la base del acuífero encontramos una franja de agua dulce reciente, una zona de mezcla y un paleoagua de mar en la base.

La distribución de masas de agua en la zona de Cabo de Gata difiere a la observada en el delta del Andarax. Dado que las aguas de la paleointrusión y el agua de mar actual tienen diferente densidad, el agua de mar actual se superpone al paleoagua marina, avanzando tierra adentro varias decenas de metros. En el delta, debido a que el agua de mar actual y el paleoagua tienen igual densidad, no hay una superposición entre ambos cuerpos, y la presencia de este paleoagua impide el avance de la cuña de intrusión actual.

Las características y disposición de las masas de agua observadas en ambas zonas de estudio son fruto de la evolución paleogeográfica que ha tenido esta área costera a lo largo del Holoceno (fig. 4). La transgresión marina Flandriense habría inundado zonas de tierra actualmente emergidas, como el área del actual delta del río Andarax y las zonas más bajas de la llanura de Cabo de Gata. Los aportes de sedimentos arrastrados por el río Andarax y movilizadas posteriormente por las corrientes de deriva litoral, habrían hecho

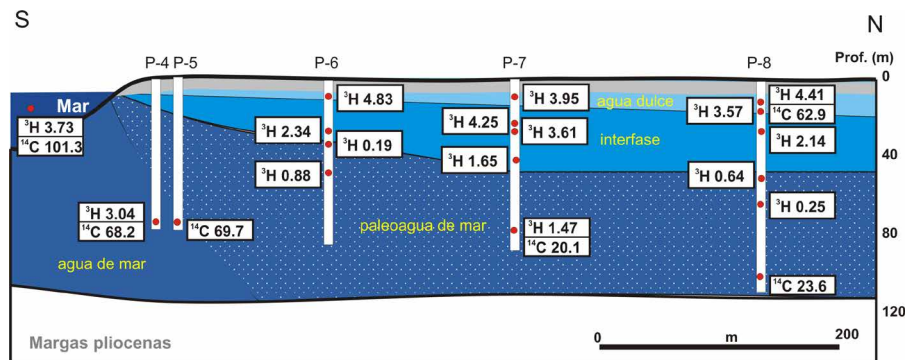


Fig. 3.- Corte del acuífero en zona de estudio 2 (fig. 1), donde se indican las concentraciones de ^3H (UT) y ^{14}C (pMC) correspondientes a las muestras de agua subterránea tomadas en profundidad. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- Aquifer cross-section in the study zone 2 (fig. 1), where ^3H (TU) and ^{14}C (pMC) concentrations corresponding to groundwater taken in depth can be observed. See color figure in the web.

progradar el delta, y por otro lado, generar una barra arenosa costera en la zona de Cabo de Gata, la cual habría encerrado un lagoón costero en esta zona. En la actualidad, el delta ha progradado varios kilómetros respecto a la línea de costa existente al inicio del Holoceno (Hoffman, 1987) y el lagoón costero se ha reducido significativamente hasta su estado actual (Goy *et al.*, 1998).

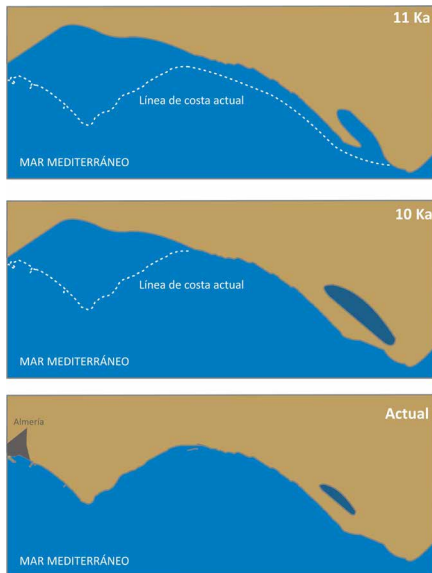


Fig. 4.- Esquema de la evolución del área costera estudiada durante el Holoceno. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- Scheme of evolution of the studied coastal area during the Holocene. See color figure in the web.

Conclusiones

Áreas costeras semiáridas como el litoral almeriense, donde la tasa de recarga es baja, sufren un proceso de renovación del sistema hidrogeológico muy lento, lo que puede favorecer la presencia de cuerpos de agua "fósil". Este es el caso de los acuíferos del delta del Andarax y de la llanura costera de Cabo de Gata. Pese a que en ambos se han registrado paleoaguas de intrusión marina de edades parecidas, se reconocen diferencias significativas entre ellos, debido a la distinta evolución paleogeográfica que han sufrido durante el Holoceno.

De este modo, se observa que la cuña de agua de mar actual avanza en función del contraste de densidad entre esta y los diferentes cuerpos de agua existentes en el acuífero.

Contribución de los autores

F. Sola se ha encargado de adquisición de datos, estructura del trabajo, investigación y análisis.

L. Molina ha llevado a cabo las tareas de investigación y análisis, edición y revisión del manuscrito.

Las tareas llevadas a cabo por A. Vallejos han sido las de metodología, figuras, coordinación y supervisión.

Agradecimientos y financiación

Esta investigación ha sido parcialmente llevada a cabo en el marco de Cei-MAR

y Ceia3 y financiada a través del proyecto PID2019-108832GB-I00 del MICINN. Agradecemos los comentarios y correcciones realizadas por los revisores anónimos.

Referencias

- Fontes, J. y Garnier, J. (1979). *Water Resour. Res.* 15: 399–413.
- Goy, J.L., Zazo, C., Dabrio, J.C., Baena, J., Harvey, A.M., Silva, P.G., González, F. y Lario, J. (1998). *INQUA MBSS Newsl.* 20, 11–18.
- Han, L.F. y Plummer, L.N. (2016). *Earth-Science Reviews* 152: 119–142.
- Han, D.M., Song, X. F., Currell, M.J. y Tsujimura, M. (2012). *Hydrological Processes* 26, 3614–3629.
- Hoffmann, G. (1987). *Holozänstratigraphie und Küstenlinienverlagerung an der Andalusischen Mittelmeerküste*. Berichte aus Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen.
- Lee, S., Currell, M. y Cendón, D.I. (2016). *Sci Total Environ* 15, 544: 995–1007.
- Sola, F., Vallejos, A., Daniele, L. y Pulido-Bosch, A. (2014). *Quaternary Research* 82, 121 - 131.
- Vallejos, A., Sola, F., Yechieli, Y. y Pulido-Bosch, A. (2018). *J. of Hydrology* 557: 55–66.
- Yechieli, Y., Sivan, O., Lazar, B., Vengosh, A., Ronen, D. y Herut, B. (2001). *Radiocarbon* 43(2B), 773–781.
- Yokochi, R., Zappala, J.C., Purtschert, R. y Mueller, P. (2021). *Earth and Planetary Science Letters* 569, 117060.