

# Origen y distribución de la salinidad en el acuífero costero de Chipiona (Cádiz)

## Origin and distribution of salinity in the coastal aquifer of Chipiona (Cádiz)

Mercedes Vélez-Nicolás<sup>1</sup>, Verónica Ruiz-Ortiz<sup>1</sup>, Santiago García-López<sup>1\*</sup>, Juan Francisco Muñoz Muñoz<sup>2</sup>, Rocío Villegas Santos<sup>2</sup> y Francisco Javier Pérez Gamarra<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación Geociencias-UCA. Facultad de CC. del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz. Campus Río San Pedro, s/n 11510 Puerto Real (Cádiz).

[mercedes.velez@uca.es](mailto:mercedes.velez@uca.es), [veronica.ruiz@uca.es](mailto:veronica.ruiz@uca.es), [santiago.garcia@uca.es](mailto:santiago.garcia@uca.es)

<sup>2</sup> Dirección General de Recursos Hídricos. Secretaría General del Agua. Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía. Avd. Grecia, s/n 41020 Sevilla.

[juanf.munoz@juntadeandalucia.es](mailto:juanf.munoz@juntadeandalucia.es), [roocio.villegas@juntadeandalucia.es](mailto:roocio.villegas@juntadeandalucia.es), [franciscoj.perez.gamarra@juntadeandalucia.es](mailto:franciscoj.perez.gamarra@juntadeandalucia.es)

\*Corresponding author

### ABSTRACT

This work analyzes the changes undergone by the coastal aquifer of Chipiona during the last half century, as a consequence of agricultural transformations and water management in the region. Initially, the aquifer suffered overexploitation and salinization due to marine intrusion in the 1990s and subsequently, an increase in storage as result of reduced pumping and increased recharge caused by the use of allochthonous surface water for irrigation. These modifications led to significant changes in groundwater hydrochemistry: (i) the salt wedge retreated notably and (ii) salinity increased owing to the agricultural soil washing and the application of irrigation water of poor quality from the lower basin of the Guadalete River. Finally, some management guidelines aimed at improving and protecting groundwater quality are proposed.

**Key-words:** groundwater, Chipiona aquifer, salinization, marine intrusion, hydrochemistry.

### RESUMEN

Se analizan los cambios en el acuífero costero de Chipiona durante el último medio siglo, motivados por las transformaciones agrarias y la gestión de los recursos hídricos en la comarca. El acuífero pasó de sufrir procesos de sobreexplotación e intrusión marina en los años 90, a un incremento en el almacenamiento por la reducción de bombeos y la mayor recarga asociada al uso de agua superficial alóctona para el riego de cultivos. Estas modificaciones conllevaron cambios significativos en la hidroquímica de las aguas subterráneas: (i) se detecta retroceso de la cuña salina y (ii) se ha incrementado la salinidad por el lavado de suelos agrícolas y la aplicación de agua de riego de calidad mediocre procedente de la cuenca baja del río Guadalete. Finalmente, se plantean algunas pautas de gestión dirigidas a la mejora y protección de la calidad.

**Palabras clave:** aguas subterráneas, acuífero de Chipiona, salinización, intrusión marina, hidroquímica.

Geogaceta, 76 (2024), 47-50

<https://doi.org/10.55407/geogaceta105013>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 29/02/2024

Fecha de revisión: 19/04/2024

Fecha de aceptación: 07/06/2024

## Introducción y antecedentes

El acuífero de Chipiona ha experimentado cambios hidrodinámicos e hidroquímicos en el último medio siglo derivados de la gestión del agua y del territorio. Desde el primer estudio promovido por FAO en 1966 hasta hoy, se han detectado en el acuífero episodios de intrusión marina consecuencia de la sobreexplotación, seguidos de la recuperación de niveles producida por la sustitución en los regadíos del agua subterránea por agua captada del río Guadalete (IGME, 2010). El incremento de la recarga por excedentes de riego, junto con la reducción de los bombeos, ha favorecido el encharcamiento temporal de tierras agrícolas (unas 350 ha) durante algunos episodios de abundantes lluvias. Adicionalmente, se ha detectado también un paulatino incremento general de la salinidad de las aguas del acuífero.

Esta investigación pretende aportar una visión de conjunto del estado hidroquímico actual del acuífero e interpretar los factores que condicionan su evolución a la luz de los cambios hidrodinámicos experimentados. Ello puede resultar de utilidad para la gestión de este acuífero y de otros sistemas hidrogeológicos con características similares.

Este trabajo se basa en los resultados obtenidos en un estudio realizado por la Universidad de Cádiz (UCA), promovido por la Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía (JA). En el marco de éste, se realizó una síntesis de la información histórica disponible, además de realizar labores de monitorización y modelización del sistema.

Los principales hitos en el conocimiento/gestión del sistema son:

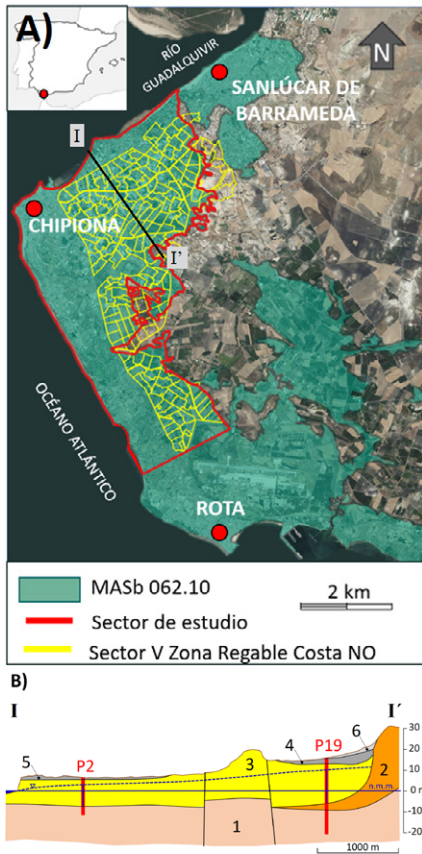
- 1966: Inicio de la investigación del acuífero a cargo del IGME-FAO.
- 1975: Inicio de monitorización pie-

zométrica del sistema (IGME).

- 1980-1986: Realización de estudios sobre modelización matemática (IGME, 1983) y prospección geofísica del acuífero (IGME, 1986).
- 1992: Declaración provisional de sobreexplotación del acuífero.
- 1995-2000: Puesta en servicio del Sector V de la Zona Regable Costa Noroeste.
- 2007: Construcción de red de piezómetros por parte de la JA.
- 2010: Propuesta por parte del IGME de un plan de gestión de uso integrado de aguas en el Sector V.
- 2021: Proyecto UCA-JA.
- 2022: Muestreo hidroquímico UCA.

## Zona de estudio

El presente estudio se centra en un sector de unos 55 km<sup>2</sup> ubicado en el extremo occidental de la masa de agua



**Fig. 1.- A) Zona de estudio. B) Corte geológico esquemático (situación en A). 1: Margas grises (Paleoceno-Mioceno inf.); 2: Margas blancas (Mioceno); 3: Arenas, conglomerados y limos (Plioceno); 4: Aluvial: (Pleistoceno sup.); 5: Glacis (Pleistoceno sup.); 6: Manto eólico (Holoceno).**

Fig. 1.- A) Study area. B) Geological section (location in A). 1: Gray marls (Paleocene-lower Miocene); 2: White marls (Miocene); 3: Sands, conglomerates and silts (Pliocene); 4: Alluvial: (upper Pleistocene); 5: Glacis (upper Pleistocene); 6: Aeolian mantle (Holocene).

subterránea (MASb) 062.10 «Sanlúcar-Rota-Chipiona-Puerto Santa María» que cuenta con una superficie total de 152 km<sup>2</sup> y que pertenece a la Demarcación Hidrográfica Guadalete-Barbate. En adelante, dicho sector acuífero será referido como “acuífero de Chipiona” (Fig. 1).

Se trata de un acuífero costero, de naturaleza detrítica y régimen libre que se localiza en el sector NO de la provincia de Cádiz, y abarca la totalidad del término municipal de Chipiona y parcialmente los de Rota y Sanlúcar de Barrameda.

El acuífero está constituido por arenas, calcarenitas y conglomerados de edad Pliocena, Pliocuaternaria y Cuaternaria con disposición tabular y una porosidad eficaz estimada entre el 2 y 5% (IGME, 2010). La potencia de los materiales acuíferos, determinada a partir de sondeos mecánicos y campañas de geofísica (IGME, 1986), varía normalmente entre 5

y 27 m, aunque puede superar los 35 m en la parte nororiental del área de estudio.

El borde oriental del acuífero está definido por arcillas y margas con escasos niveles de areniscas calcáreas de origen turbidítico (Paleoceno-Mioceno inferior) y margas blancas silíceas conocidas como albarizas (Mioceno), ambas de carácter alóctono o para-autóctono, que constituyen también la base impermeable del acuífero (Díaz-Pérez, 2003; IGME, 2010). El borde septentrional es el estuario del río Guadalquivir, mientras que los bordes occidental y meridional están constituidos por el Océano Atlántico.

El territorio se caracteriza por relieves muy suaves y un clima mediterráneo subtropical con régimen térmico semicálido, de acuerdo con la clasificación de Köppen. La precipitación y temperatura media anual están en torno a 550 mm y 17°C, respectivamente, con fuertes estiajes. La recarga del acuífero se produce mayoritariamente por infiltración por lluvia (20%) y, en menor medida, por los retornos de regadío. La agricultura es la actividad económica principal, aunque la actividad turística y el desarrollo urbano en la franja litoral también son importantes. El territorio está ocupado por unas 4500 ha de cultivos de regadío, de las cuales unas 3200 ha pertenecen al Sector V de la Zona Regable Costa Noroeste y se abastecen actualmente con agua superficial.

**Materiales y métodos**

Se han recopilado datos históricos de piezometría e hidroquímica procedentes del IGME (1966-2009) y de la JA (2017-ac-

tualidad). Se contó también con datos mensuales de la Comunidad de Regantes de conductividad eléctrica del agua de riego (entre 2003 y 2021). Entre 2021 y 2022, los autores llevaron a cabo dos campañas piezométricas, de medida de parámetros *in situ* y toma de muestras.

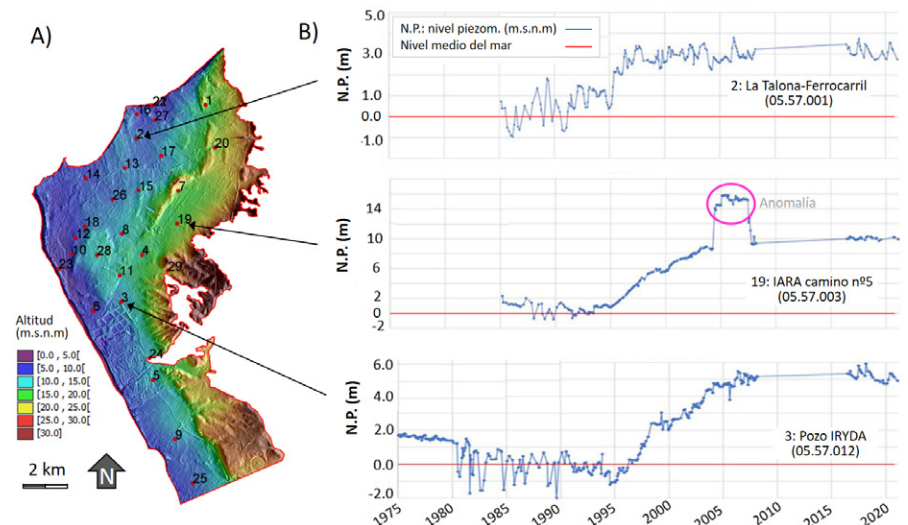
Las medidas de nivel piezométrico se realizaron con un hidronivel modelo Nordmeyer de 50 m, mientras que la temperatura, conductividad eléctrica, pH y potencial de oxidación-reducción (ORP) con una sonda Hanna HI 98194 *in situ*. Adicionalmente, se realizaron 10 perfiles verticales de conductividad eléctrica y temperatura en sondeos con una sonda Heron de 100 m.

Se realizaron muestreos hidroquímicos en los que se tomaron un total de 27 muestras: 19 en pozos abiertos de gran diámetro, 4 en sondeos y 4 en aguas superficiales (mar, conducciones de riego y cauces). Los iones mayoritarios (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, y Ca<sup>+2</sup>) fueron analizados en los laboratorios de la UCA mediante cromatografía iónica, excepto la alcalinidad, que se determinó mediante titulación con HCl. La red de control se muestra en la figura 2.A.

**Resultados y discusión**

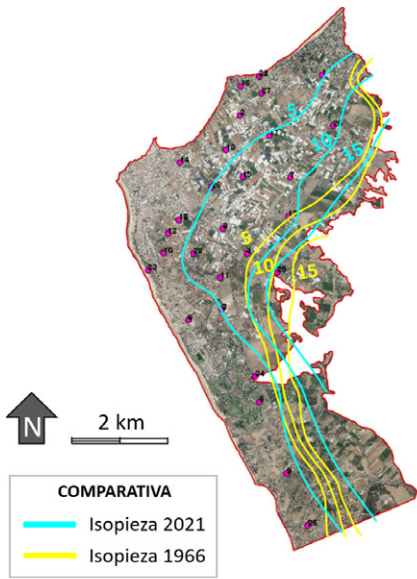
*Evolución piezométrica*

En la figura 2.B se muestra la evolución piezométrica en tres puntos representativos de la red de control. El punto 3 (código JA 05.57.012), que es el que tiene registro más largo, presenta una clara tendencia descendente entre 1975



**Fig. 2.- A) Red de control considerada en este estudio, representada sobre el MDT. B) Registro histórico del nivel piezométrico en 3 puntos de control de la red.**

Fig. 2.- A) Control network considered in this study, represented on the MDT. B) Historical record of the piezometric level at 3 control points of the network.



**Fig. 3.- Mapa de isopiezas de la zona de estudio para los años 1966 y 2021.**

*Fig. 3.- Map of isopiezas of the study area for the years 1966 and 2021*

y 1980. En la siguiente década se suceden descensos bruscos que alcanzan cotas negativas atribuibles a bombeos.

Entre 1992 y 1996 se registran, casi de manera continua, niveles piezométricos bajo el nivel del mar, lo que pone de manifiesto una situación crítica. Una evolución parecida, aunque menos acusada, con valores negativos que no llegan a superar los -1 m.s.n.m. se observa en los demás puntos; con un posterior ascenso sostenido a partir de 1996. El periodo previo a 1996 evidencia la etapa de sobreexplotación por bombeos que favoreció la salinización por intrusión marina (Díaz-Pérez, 2003).

A partir de 1995, cuando se inicia la transformación agraria de los terrenos de la Sector V de la Zona Regable Costa Noroeste, el suministro basado en recursos subterráneos comienza a ser reemplazado por aguas superficiales del río Guadalete. La tendencia al descenso generalizado se invierte, lo que da lugar a un progresivo ascenso en los niveles piezométricos, (incremento entre 3 y 9 m, según el punto) hasta el año 2006-07, momento en el que el ascenso se ralentiza o incluso se estabiliza.

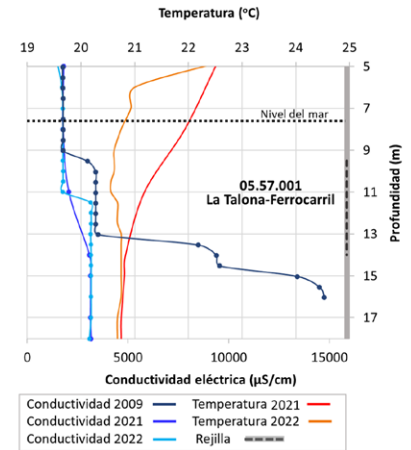
Cabe destacar el ascenso de casi 7 m entre 2005 y 2008 en el punto 19 (código JA 05.57.003, Fig. 2B), que puede ser interpretado como resultado de algún proceso de recarga artificial del que no hay constancia documental. En este sentido, es ilustrativo que la salinidad actual en ese punto es inferior a la de su entorno.

A modo de síntesis, la figura 3 muestra la variación en el almacenamiento

del acuífero entre 1966 y 2021, que implica que en la actualidad el volumen de material saturado se haya incrementado notablemente especialmente en el sector meridional del acuífero, lo que se atribuye al incremento de la recarga asociada al retorno de regadíos y la reducción de bombeos. En el sector sur, sin embargo, en el que se cuenta con escasos puntos de observación, no se identifica ese efecto.

**Registros verticales de conductividad eléctrica en sondeos**

En los sondeos más profundos, ubicados en el sector nororiental del acuífero (puntos 20, 19 y 4, Fig. 2A), se detecta un incremento notable de la conductividad eléctrica hasta superar 10000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a profundidades entre 15 y 21 m. Por otra parte, un resultado particularmente interesante se obtiene en el sondeo 2 (código JA 05.57.001), situado en un sector que fue afectado por intrusión marina en los 90 (Fig. 4). Al comparar los registros de conductividad eléctrica de 2021 y 2022 con los obtenidos por el IGME en 2009 se observa una notable dilución que afecta a los 2 m superiores de la rejilla (entre 9 y 11 m de profundidad) de forma que la conductividad eléctrica pasa de 3400 a 1770  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Igualmente, se observa una dilución significativa en el extremo inferior de la rejilla, a 14 m de profundidad, en donde cambia de 9400 a 3160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este hecho evidencia que el incremento de la recarga y del almacenamiento está contribuyendo a la reducción de la concentración de sales ligadas a la intrusión marina.

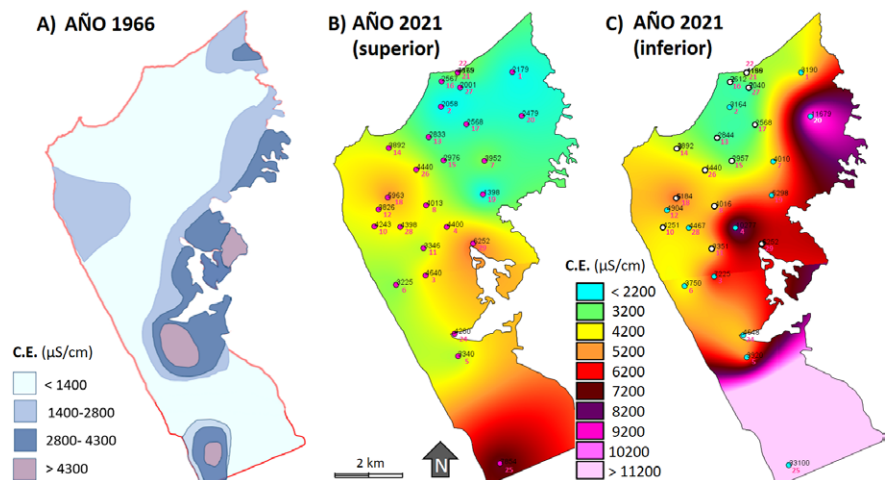


**Fig. 4.- Registros verticales (conductividad eléctrica y temperatura) llevados a cabo en el punto 05.57.001 en 2009 (IGME) y 2021 y 2022 (UCA). Localización en figura 2.**

*Fig. 4.- Vertical records (electric conductivity and temperature) at point 05.57.001 in 2009 (IGME) and 2021 and 2022 (UCA). Location in Figure 2.*

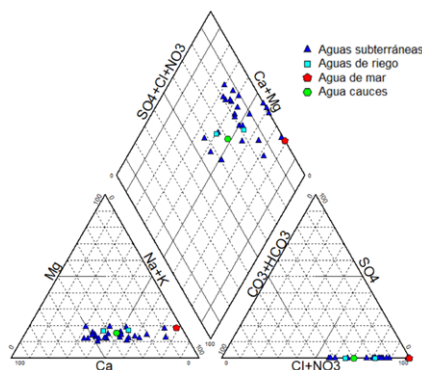
**Distribución espacial de la conductividad eléctrica**

La figura 5.A muestra la distribución espacial de la conductividad eléctrica de las aguas del acuífero en 1966 a partir de datos de residuo seco obtenidos en el estudio IGME-FAO (IGME, 2010), para lo cual se consideró un factor de conversión de 0.7 (Walton, 1989). Más del 50% de la superficie del acuífero estaba ocupada entonces por aguas con valores de conductividad eléctrica inferiores a 1400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y sólo en algunos sectores de pequeña extensión, muy localizados, había aguas muy mineralizadas, con más de 4300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Aunque se desconoce la



**Fig. 5.- Mapa de distribución de la conductividad eléctrica de las aguas del acuífero. A) Año 1966 (modificado de FAO, 1970). B) Año 2021 (parte superior de la columna). C) año 2021 (parte inferior de la columna).**

*Fig. 5.- Distribution map of the electrical conductivity in the aquifer A) Year 1966 (modified from FAO, 1970). B) Year 2021 (top of the column). C) year 2021 (bottom of column).*



**Fig. 6.- Diagrama de Piper**

Fig. 6.- Piper diagram.

profundidad de las medidas, estos datos sirven para caracterizar la situación previa a la explotación intensiva del acuífero.

Las figuras 5.B y 5.C representan la distribución de la conductividad eléctrica en la campaña de 2021. Se dispone en cada punto de observación de dos medidas: (i) en la parte superior de la columna de agua del pozo o sondeo y (ii) en la parte inferior. En los pozos someros apenas hay diferencias, no así en los sondeos más profundos en donde se detecta una conductividad eléctrica más elevada en profundidad, como se ha indicado en el apartado anterior. Este aspecto, puesto ya de manifiesto por IGME, (1980; 2010), se atribuye a la presencia de aguas connatas, la existencia de minerales solubles en la base del acuífero o a la persistencia de los efectos de la intrusión salina del pasado. Al considerar la parte superior de la columna (Fig. 5.B), la conductividad eléctrica promedio en 2021 fue de 3750  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un rango entre 1398 y 7854  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este último valor se obtuvo en el sector meridional del acuífero con escasos puntos de observación. Si se consideran las medidas más profundas la mineralización es mayor, con un valor medio de conductividad eléctrica de 5680  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

De la comparación de la situación en 2021 con la de 1966, se concluye que se ha producido un notable empeoramiento de la calidad atendiendo a los valores de conductividad eléctrica, lo que se interpreta por el importante aporte externo de sales del agua de riego.

### Características hidroquímicas

Las aguas de riego, de procedencia superficial, presentan facies clorurada-sulfatada cálcico-sódica consecuencia de la disolución de materiales evaporíticos triásicos (yeso y halita) que forman parte del Complejo Caótico Subbético, que aflora extensamente en la cuenca baja del río

Guadalete. La conductividad eléctrica media de este tipo de agua, calculada partir de datos mensuales en el periodo 2003-2021, es de 1840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que equivale a una salinidad de 1.3 g/l, considerando el factor de conversión anteriormente indicado (0.7). A partir de los volúmenes de riego, se ha podido calcular el aporte anual de sales asociado a esta actividad, que estaría comprendido entre 7400 y 11500 t/año, con un valor medio de 9400 t/año.

Las aguas subterráneas presentan facies predominantemente cloruradas sódicas o sódico-cálcicas altamente mineralizadas, de tipo duras a muy duras.

En un diagrama triangular aniónico, las muestras de agua subterránea se disponen alineadas y en un extremo se encuentra el agua de mar, lo que denota la influencia marina en su composición, ya sea por mezcla con aguas connatas o por influencia de aerosoles e intrusión.

En el diagrama triangular catiónico, las muestras de agua subterránea presentan una mayor dispersión respecto de la línea orientada al mar, como consecuencia de concentraciones variables de calcio y sodio, aunque se disponen alrededor de las muestras de agua superficial. Todo ello estaría en concordancia con la importancia de la aportación de agua superficial en el quimismo del agua subterránea.

Adicionalmente, la concentración de nitratos ha resultado muy elevada, con un valor medio de 165 mg/l y un máximo de 646 mg/l.

### Conclusiones

La problemática principal del acuífero de Chipiona, tras superar la etapa de sobreexplotación e intrusión marina en los años 90, básicamente responde a dos cuestiones: (i) el deterioro de la calidad química del recurso subterráneo, agravado por las aportaciones superficiales procedentes del Guadalete utilizadas para riego y (ii) como efecto secundario, el anegamiento de terrenos agrícolas tras episodios de fuertes lluvias, consecuencia de la escasa explotación del sistema hidrogeológico, lo que se justifica, al menos en parte, por la mala calidad química del recurso. Las transformaciones agrarias han conducido a procesos de salinización no previstos, cuya mitigación debe de priorizarse para alcanzar los objetivos de calidad ambiental y de desarrollo sostenible.

Para mitigar a medio-largo plazo el problema de salinidad que afecta a la

globalidad del acuífero, se plantean algunas medidas:

- Fomentar la recarga del acuífero con aguas poco mineralizadas (de lluvia o regeneradas) y al mismo tiempo, favorecer el drenaje al mar de las aguas de mala calidad.
- Reducir la salinidad del agua superficial empleada para el riego en el Sector V, eligiendo periodos en los que las aportaciones al Guadalete procedan directamente de los embalses de regulación y no de las escorrentías sobre los materiales triásicos.
- Reducir los riegos con agua subterránea, por cuanto implican la recirculación de sales, la salida de agua del sistema y la minoración de la descarga natural que es la principal salida de sales.
- Mantener y mejorar la red de control, ampliándola a aquellos sectores con poca densidad de puntos, especialmente en la zona meridional.

### Contribución de los autores

Estructura del trabajo: SGL; metodología: MVN, VRO, SGL; adquisición de datos: SGL, FJPG, edición y figuras: VRO, MVN; investigación/análisis: MVN, VRO, SGL; coordinación y supervisión: JFMM, RVS y FJPG.

### Agradecimientos

El presente trabajo deriva de un proyecto financiado por la Secretaría General del Agua-Dirección General de Recursos Hídricos de la Junta de Andalucía.

### Referencias

- Díaz-Pérez, A. (2003). En TIAC-2003. IGME, Madrid.
- IGME (2010). Asistencia técnica a materia de aguas subterráneas en Andalucía, expte. 1922/2007/01/00. 39 pp.
- IGME (1980). El manto acuífero de Chipiona. Recursos explotables. Evolución futura. 19 pp.
- IGME (1983). Modelo matemático del manto acuífero de Sanlúcar-Chipiona-Rota. 85 pp.
- IGME (1986). Investigación geoelectrica en la zona de Rota-Chipiona-Sanlúcar. 63 pp.
- UCA-JA (2021). Estudio para la mejora de la gestión de los RRHH en el sector V Zona Regable Costa NO. 146 pp.
- Walton, N.R.G (1989). Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids-What is Their Precise Relationship? Desalination, 72. 275-292. 0011-9164/89/\$0350