

Olías, S, M., J. Cruz San Julian, J. Benavente e C. Almeida (1994)

Evolución hidroquímica temporal en algunos puntos de observación en el acuífero Almonte-Marismas (Huelva)

Bol. Geológico y Minero, vol. 105-4, pp. 362-371.

Evolución hidroquímica temporal en algunos puntos de observación en el acuífero Almonte-Marismas (Huelva).

Por M. OLIAS (*), J. CRUZ SAN JULIAN (**), J. BENAVENTE (**)
y C. ALMEIDA (***)

RESUMEN

El control hidroquímico durante casi tres años, con una periodicidad aproximadamente mensual, en siete piezómetros y pozos poco profundos de distintos sectores de la parte libre del acuífero Almonte-Marismas, ha puesto de manifiesto variaciones importantes de algunas de las variables estudiadas (temperatura, conductividad, pH y concentración de componentes mayoritarios). El análisis de la evolución temporal de las variables en relación con los principales episodios pluviométricos, junto al tratamiento estadístico (Análisis Factorial) de los resultados y la simulación de procesos hidrogeoquímicos en uno de los puntos, permite distinguir un comportamiento diferente entre la parte meridional del acuífero, que coincide aproximadamente con la superficie del Parque Nacional de Doñana, y la zona norte del mismo. La evolución hidroquímica general está condicionada, principalmente, por los períodos de recarga que producen: a) el incremento del contenido en algunos componentes por lixiviado del suelo (sulfatos) durante las primeras lluvias de otoño, b) fenómenos de dilución durante episodios de recarga intensa y c) elevadas conductividades eléctricas del agua, en los puntos de la zona sur, cuando el nivel piezométrico se sitúa próximo a la superficie del terreno, probablemente debido a la influencia de ciertos horizontes edáficos ricos en sales.

Palabras clave: Evolución hidroquímica, Análisis factorial, Simulación hidrogeoquímica, Acuífero Almonte-Marismas.

ABSTRACT

Over a period of three years, on approximately a monthly basis, the hydrochemical monitoring of seven shallow piezometers and wells, in various sectors of the unconfined part of the Almonte-Marismas aquifer has shown significant variations in the variables studied: temperature, electrical conductivity, pH, and major constituents. Differences in behavioral patterns between the control points in the southern area -coinciding roughly with the Doñana National Park- and the monitoring points in the northern area have been pointed out from: a) analysis of the time evolution of hydrochemical characteristics versus the principal rainfall episodes, b) statistical study (Factor Analysis) of the analytical data obtained and c) the simulation of the hydrogeochemical processes in one of the monitoring points. The general hydrochemical evolution is conditioned principally by the periods of recharge, which give rise to: a) higher levels of concentration of certain components (mainly sulphates) due to the leaching of soil during the first autumn rains, b) dilution processes during periods of heavy recharge and c) high conductivities, recorded at the monitoring points in the southern area, when the piezometric level is close to the ground surface, probably due to the influence of soil horizons rich in salts.

Key words: Hydrochemical evolution, Factor analysis, Hydrogeochemical modeling, Almonte-Marismas aquifer.

1. INTRODUCCION

El acuífero Almonte-Marismas, situado en la parte baja de la Depresión del Guadalquivir (provincias

de Huelva y Sevilla), tiene una extensión próxima a 2.400 km² (IGME, 1983), de la que el 75 por 100 corresponde a un acuífero libre y el resto está confinado bajo los sedimentos arcillosos de las marismas del Guadalquivir (fig. 1). Los materiales que constituyen el acuífero son el producto del relleno de la cuenca durante el Neógeno y Cuaternario. Las principales formaciones litológicas del acuífero son (IGME, 1983):

(*) Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada. C/. Severo Ochoa, s/n. 18071 Granada.

(**) Instituto del Agua. Universidad de Granada. C/. Rector López Argüeta, s/n. 18071 Granada.

(***) Departamento de Geología. Universidad de Lisboa. Campo Grande. Edificio C2, 5.º piso. 1700 Lisboa.

limos del Plioceno, arenas finas amarillentas del Pliocuatnario, *formación roja* (gravas, arenas y conglomerados del Cuaternario antiguo), conglomerados fluvio-marinos del Cuaternario antiguo, y otros depósitos recientes (arenas de barrera litoral, arenas de dunas fósiles y actuales, terrazas fluviales, etc.).

Estas formaciones están conectadas hidráulicamente de modo que podría considerarse la existencia de un único acuífero de tipo multicapa. No obstante, según CUSTODIO et al. (1992), sería más exacto distinguir entre un nivel profundo, más transmisivo, y un recubrimiento superficial (de hasta decenas de metros de espesor) de arenas con intercalaciones arcillo-arenosas, de menor permeabilidad.

El substrato impermeable del sistema está constituido por un potente paquete de margas azules de edad Tortonense, que constituye, asimismo, el límite norte del sistema. Las margas azules buzan suavemente hacia el sur; por ello, la potencia del acuífero aumenta en esta dirección y llega a alcanzar espesores de hasta 200 m bajo las marismas (IGME, 1983). La superficie piezométrica en el acuífero libre se dispone, en términos generales, muy próxima a la topografía, adaptándose a ésta. La recarga del sistema procede casi exclusivamente de la infiltración de las precipitaciones. La descarga se produce por:

a) drenaje subterráneo al océano, b) evapotranspiración, principalmente en el contacto acuífero libre-confinado, c) surgencias difusas hacia cursos superficiales, d) extracciones por bombeo, y e) flujo ascendente a través de las capas semiconfinantes de marismas.

Las cifras asignadas a los recursos de este acuífero varían ampliamente de unos a otros autores. De hecho, en el reciente trabajo de la Comisión Internacional de Expertos (1992), las entradas al sistema se consideran comprendidas entre 155 y 425 hm³/año. Las extracciones son evaluadas en dicho trabajo entre 73 y 82 hm³/año; la mayor parte de esta cifra corresponde al regadío en el Plan Almonte-Marismas (55-60 hm³/año), que cubre principalmente la zona central del acuífero (sector del Rocío) y el borde norte de la Marisma (ver fig. 1); comparativamente menores (12-15 hm³/año) son los bombeos realizados para el regadío en el sector occidental del acuífero (áreas próximas al río Tinto, ver fig. 1) y para el abastecimiento urbano (6-7 hm³/año) de los núcleos del sector, entre los que el consumo más

elevado (2,5-3 hm³/año) corresponde a Matalascañas, en el borde sur del sistema.

Son varios los estudios hidrogeoquímicos que se han realizado sobre el acuífero Almonte-Marismas: PLATA et al. (1983); BAONZA et al. (1984); MANZANO et al. (1991), y PONCELA et al. (1992). También se aporta información hidroquímica en los estudios hidrogeológicos de carácter regional, bien sea de la totalidad del acuífero (IGME, 1983) o de sectores concretos del mismo (RODRIGUEZ AREVALO, 1984, y VELA, 1984). Por otro lado, el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) y el Instituto Andaluz de Reforma Agraria (IARA) disponen de redes de observación en las que, con diferente periodicidad, realizan controles de la calidad de las aguas subterráneas.

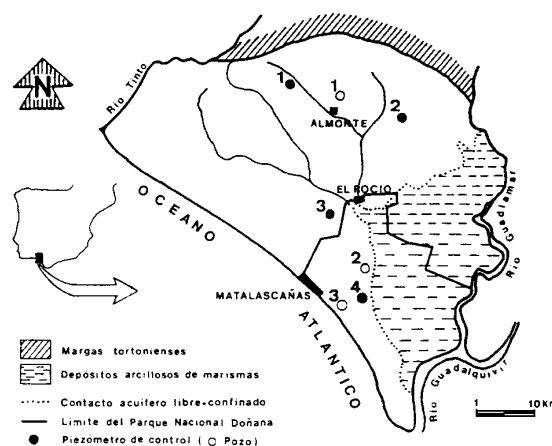


Figura 1.-Mapa esquemático del acuífero Almonte-Marismas con la situación de los puntos controlados.

2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION Y CARACTERISTICAS DE LOS PUNTOS DE OBSERVACION

En ninguna de las publicaciones antes citadas en el capítulo de Introducción se trata la evolución temporal de los parámetros hidroquímicos, que pueden sufrir grandes cambios en acuíferos detríticos someros (MONTGOMERY et al., 1987; HOYLE, 1989). El presente trabajo forma parte de una investigación más amplia, en el marco

de la cual se realizan muestreos hidroquímicos, con una periodicidad aproximadamente mensual, en varios piezómetros y pozos de la parte libre del acuífero. Los resultados que aquí se presentan, correspondientes al período comprendido entre octubre de 1989 y Junio de 1992, han mostrado una variación temporal importante de algunas de las principales características hidroquímicas. Desde el punto de vista hidrológico, conviene reseñar que en el año 1989-90 se produjeron importantes precipitaciones durante el otoño e invierno que dieron lugar a una notable recarga del acuífero; en el año 1990-91 la recarga se concentró en primavera, mientras que durante 1991-92 apenas existió recarga significativa concentrada.

Los puntos controlados están situados en la parte libre del acuífero (fig. 1); corresponden a cuatro piezómetros someros (profundidades entre 8 y 20 m, totalmente ranurados) y a tres pozos abiertos manualmente.

La selección de estos puntos responde al objetivo de disponer de información relativa a las principales unidades litológicas del acuífero, a los tipos de vegetación y cultivos más abundantes y a los distintos tipos de suelos (OLIAS, CRUZ-SANJULIAN y BENAVENTE, 1992).

El piezómetro número 1 y el pozo número 1, ambos con 10 m de profundidad, están situados en afloramientos de limos del Plioceno; en este sector, al lado de cultivos tradicionales, se encuentran áreas de regadío para el cultivo intensivo de fresas.

El piezómetro número 2, de 15 m de profundidad, está situado en afloramientos de arenas finas amarillentas del Pliocuaturnario; bajo ellas, a una profundidad de 12 m, el piezómetro corta las margas azules atribuíbles al Mioceno, que constituyen el sustrato impermeable del acuífero; entre 1,7 y 1,9 metros de profundidad se ha puesto de manifiesto la presencia de un horizonte edáfico endurecido de *fragipán* (OLIAS, CRUZ-SANJULIAN y BENAVENTE, op. cit.), denominación utilizada en el Proyecto de la FAO-IGME (1972). En este sector existen extensas superficies cubiertas de eucaliptos.

El piezómetro número 3, de 20 metros de profundidad, atraviesa arenas finas amarillentas del Pliocuaturnario; los suelos presentes en este sector son los denominados *tipo Arrayán* (FAO-IGME, 1972). Este sector, al sur de El Rocío, es una de las zonas transformadas en el Plan Almonte-

Marismas y en él predominan los cultivos de frutales y fresas en regadío.

El pozo número 2, con cuatro metros de profundidad, y el piezómetro número 4, de 8 metros de profundidad, están situados en las proximidades del límite acuífero libre-acuífero confinado (ecotono de la Vera), en la parte meridional del acuífero, al ENE de Matalascañas (ver fig. 1). Ambas perforaciones atraviesan suelos arenosos correspondientes a las dunas eólicas estabilizadas y manto eólico arrasado, en los que la vegetación está representada por matorral.

El pozo número 3 atraviesa también las arenas de dunas estabilizadas y el manto eólico arrasado, en un área ocupada también por matorral. Su profundidad es de 4 metros.

A pesar de que el número de puntos utilizado en esta investigación podría parecer reducido, lo cierto es que los pozos y piezómetros controlados están distribuidos por un área extensa que representa más de la mitad de la superficie del acuífero libre, de modo que se aporta información de los sectores septentrional, central y meridional del acuífero. Por todo ello, y teniendo en cuenta, además, la coherencia de la información obtenida del conjunto de puntos estudiados, las conclusiones pueden considerarse suficientemente representativas.

3. SINTESIS DE LAS CARACTERISTICAS HIDROQUIMICAS DEL ACUIFERO

Atendiendo a las características hidroquímicas, se distinguen dos zonas en el acuífero, con marcadas diferencias entre ellas:

- Las aguas del acuífero libre son poco mineralizadas, con conductividades entre 200 y 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (PLATA et al., 1983), de facies clorurada sódica, agresivas y con una relativamente elevada presión parcial de CO_2 (BAONZA et al., 1984). En la zona de contacto acuífero libre-acuífero confinado las aguas son algo más mineralizadas y con facies entre clorurada sódica y bicarbonatada cálcica (MANZANO et al., 1991). En la zona norte las aguas son fundamentalmente bicarbonatadas cálcico-magnésicas,

debido a la presencia de limos arenosos calcáreos (limos del Plioceno).

De acuerdo con MANZANO et al. (1991), los rasgos hidroquímicos de la parte libre del acuífero están condicionados por la infiltración del agua de lluvia, con la incorporación de pequeñas cantidades de sales procedentes del aerosol marino, en terrenos mayoritariamente silíceos. Existen variaciones locales debidas a la mayor influencia relativa de: a) procesos de evapotranspiración, b) presencia de sedimentos calizos biogénicos, y c) actividades agrícolas (actuales o pasadas).

- Bajo la zona de marismas existe una interfase de dirección aproximada NNE-SSO entre agua dulce (al oeste) y agua salada o salobre (al este), congénita del depósito de los sedimentos (IGME, 1983). En general, las aguas de este sector del acuífero son más mineralizadas y presentan facies cloruradas sódicas (aunque en algunos casos son bicarbonatadas cálcicas), con una presión parcial de CO₂ muy baja (MANZANO et al., 1991).

4. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Las muestras se han tomado en la parte superior de la zona saturada mediante un tomamuestras prototipo del Instituto del Agua de la Universidad de Granada. Las determinaciones realizadas *in situ* fueron la temperatura, la conductividad y el pH; las muestras se transportaron al laboratorio en nevera portátil y los análisis se iniciaron antes de que transcurrieran 24 horas desde el momento de muestreo. En laboratorio se analizaron cloruros y bicarbonatos por volumetría, sulfatos mediante espectrofotometría de luz ultravioleta y sodio, calcio, magnesio y potasio por espectrofotometría de absorción atómica.

El número de análisis realizados está comprendido entre 24 y 27 en los piezómetros (tabla 1) y es menor en los pozos (entre 10 y 21 muestras). La evolución de las características hidroquímicas que se observan en estos últimos puntos es muy similar a la de los piezómetros.

En la tabla 1 se presentan los estadísticos básicos de las variables físico-químicas determinadas para

los cuatro piezómetros. Aunque el objetivo primordial del presente trabajo consiste en el análisis de la evolución temporal, puede señalarse que los resultados obtenidos respecto a la distribución espacial de las variables consideradas coinciden con las conclusiones de otros trabajos realizados con anterioridad (IGME, 1983; BAONZA et al., 1984, y MANZANO et al., 1991). Así, las aguas de la zona norte del acuífero presentan facies bicarbonatadas cálcico-magnésicas mientras que al sur predominan las aguas cloruradas sódicas. La conductividad eléctrica del agua y el pH son más elevados en las muestras situadas al norte. Por otro lado, también es de destacar el bajo contenido en sulfatos en la mayor parte de los puntos y las altas concentraciones de sílice en la zona norte.

TABLA 1

Resumen de las características hidroquímicas en los piezómetros controlados

	Temp. °C	Conduc. µS/cm	pH	Cl- mg/l	HCO ₃ - mg/l	SO ₄ = mg/l	Na+ mg/l	Ca++ mg/l	Mg++ mg/l	K+ mg/l	SiO ₂ mg/l
Piezómetro 1											
Nº Datos	24	24	21	24	24	24	24	24	24	24	8
Media	18.5	936.2	7.1	58.3	351.1	94.8	29.0	87.5	49.1	13.6	41.5
Mínimo	17.0	670.0	6.7	39.0	198.0	52.2	23.0	56.0	26.7	7.0	38.0
Máximo	20.0	1080.0	7.7	65.7	404.1	172.0	34.0	109.0	62.0	22.0	47.0
Dev. Típica	0.9	108.7	0.3	6.0	49.4	35.1	2.4	13.6	7.9	3.3	2.8
Coef. Variación	4.6	11.6	3.8	10.3	14.1	37.0	8.3	15.6	16.1	24.1	6.7
Piezómetro 2											
Nº Datos	26	26	24	26	26	26	26	26	26	26	9
Media	17.8	692.5	6.9	18.5	462.4	26.8	17.8	84.0	38.5	1.4	43.6
Mínimo	14.0	376.0	6.6	10.6	228.7	11.4	8.0	44.0	19.4	0.4	31.4
Máximo	21.9	884.0	7.3	39.1	610.0	46.2	21.0	112.0	58.0	6.0	56.0
Dev. Típica	2.2	118.5	0.2	5.6	92.6	10.5	2.7	17.9	8.2	1.2	6.4
Coef. Variación	12.1	17.1	2.9	30.1	20.0	39.3	15.1	21.3	21.2	84.3	14.7
Piezómetro 3											
Nº Datos	27	27	25	27	27	27	27	27	27	27	9
Media	19.0	336.6	6.6	41.7	76.5	38.4	32.6	18.8	11.4	4.1	12.3
Mínimo	14.5	160.0	5.9	10.6	45.7	10.0	8.0	10.0	2.4	2.3	10.8
Máximo	26.0	498.0	10.1	85.0	213.5	58.4	65.0	52.0	26.7	10.0	16.0
Dev. Típica	3.4	112.6	0.8	27.4	44.8	12.7	20.2	10.2	4.2	1.9	1.8
Coef. Variación	18.0	33.5	11.5	65.8	58.6	33.1	63.4	54.5	37.0	45.6	14.5
Piezómetro 4											
Nº Datos	27	27	21	27	27	27	27	27	27	27	9
Media	18.4	482.7	6.6	118.9	62.4	31.2	70.2	15.1	12.3	3.7	14.2
Mínimo	13.0	250.0	6.3	60.0	38.1	10.0	35.7	6.4	4.5	2.3	11.9
Máximo	25.0	756.0	7.0	220.0	91.5	64.0	129.0	24.0	22.0	9.0	18.0
Dev. Típica	3.5	160.6	0.2	44.7	18.9	15.5	26.0	5.1	5.4	1.5	1.8
Coef. Variación	19.0	33.3	2.8	37.6	30.3	49.8	37.1	33.5	44.1	41.1	12.8

4.1. Evolución temporal

En cuanto a la evolución temporal, los datos muestran variaciones, en algún caso importantes, en casi todas las variables controladas.

La temperatura muestra oscilaciones estacionales, que son mayores, de hasta 12° C, en la zona sur del acuífero, donde el nivel piezométrico se sitúa muy próximo a la superficie del terreno (a menos de 2 m, durante todo el año, en los piezómetros 3 y 4 y pozos 2 y 3). Dichas oscilaciones son menores, con algún desfase respecto a la temperatura atmosférica, en los puntos de la zona norte, donde los niveles, aunque eventualmente pueden ascender hasta cerca de la superficie del terreno, se sitúan generalmente entre 3 y 6 m de profundidad.

La conductividad eléctrica presenta cambios considerables en todos los puntos. Algunos de estos cambios son debidos a la dilución que se produce durante fuertes episodios lluviosos, al llegar el agua de recarga de las precipitaciones al acuífero, que -con la excepción de los sulfatos- origina un descenso de la concentración de todos los iones. Después de estos periodos se recuperan los valores de la conductividad eléctrica hasta alcanzar los anteriores a la recarga. Este fenómeno de dilución se ha comprobado a partir de una unidad automática de adquisición de datos, instalada en el piezómetro 4 (OLIAS et al., 1991), con control en continuo de la piezometría, temperatura y conductividad eléctrica del agua y está de acuerdo con las experiencias de trazado de MANZANO et al. (1991), que ponen de manifiesto la importancia de los flujos verticales en los metros superiores del acuífero libre. No obstante, existen otras variaciones estacionales en los puntos situados en la parte sur (fig. 2), que presentan, en contradicción con lo expuesto anteriormente, los valores más elevados durante el invierno-primavera, mientras que los más bajos se dan en verano. Ello parece ocurrir como consecuencia de la elevación del nivel piezométrico hasta un determinado nivel edáfico, como se explica más adelante.

Cloruros y sodio también muestran una clara fluctuación estacional en los puntos situados al sur, con valores altos durante el invierno y menores en verano. En los puntos de la zona norte estas variaciones son mucho menores (fig. 3). La evolución del sodio es similar a la de los cloruros.

En la zona sur, la conductividad eléctrica muestra una correlación muy alta con cloruros y sodio, con coeficiente de correlación mayor de 0,9. Los valores máximos registrados en la conductividad

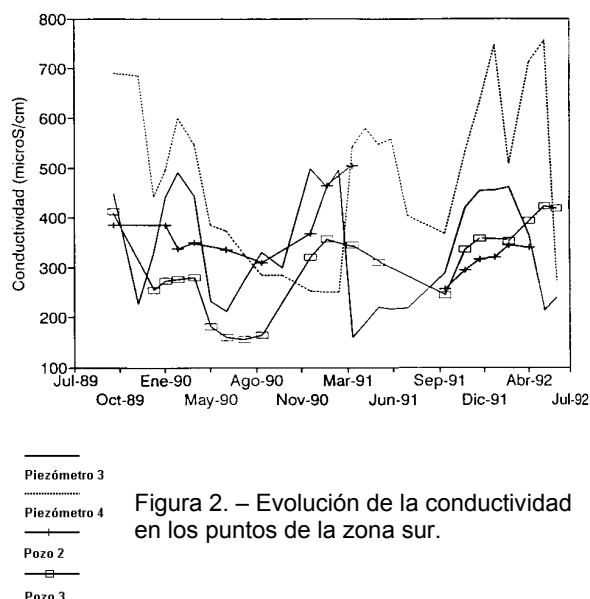


Figura 2. – Evolución de la conductividad en los puntos de la zona sur.

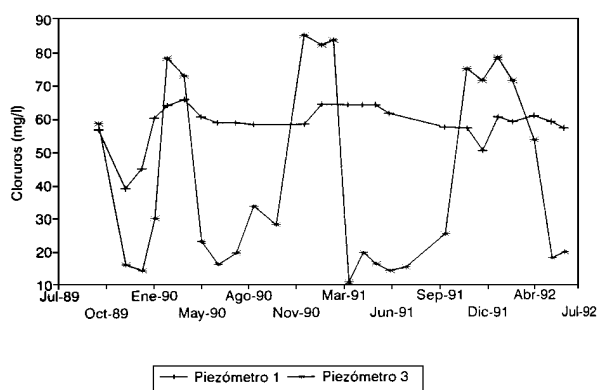


Figura 3. – Evolución de la concentración de cloruros en dos de los puntos controlados

eléctrica del agua (y, por tanto, en los iones Cl^- y Na^+) parecen estar originados por la presencia de una zona de salinidad relativamente elevada en los horizontes más superficiales del suelo, como pone de manifiesto SILJESTRÖM (1985) en varios perfiles edáficos de la zona de contacto entre arenas eólicas y marismas (conocida como *La Vera*). No obstante, resta por explicar por qué, si existe ese horizonte, no se detecta un incremento de conductividad eléctrica como consecuencia del posible lavado de las sales durante la infiltración

de la recarga que precede al ascenso de nivel piezométrico.

Los bicarbonatos, el calcio y el magnesio presentan, en los sectores más meridionales, una evolución similar a la de los anteriores iones y otras variaciones, más difíciles de interpretar y de mayor rango, en la zona norte. Hay que tener en cuenta que en esta última zona las aguas son bicarbonatadas cálcico-magnésicas, mientras que en los puntos de la zona sur las concentraciones medias de bicarbonatos son muy bajas, entre 40 y 80 mg/l (tabla I).

El contenido en sulfatos también presenta variaciones importantes en el tiempo; los contenidos suelen aumentar al principio de la época de recarga y presentan valores más bajos durante el verano y otoño. En el piezómetro 1 y en el pozo 1 las variaciones en el contenido en sulfatos de las aguas subterráneas son especialmente marcadas (fig. 4) y pueden ser atribuidas a la aplicación de fertilizantes (muchos de ellos en forma de sulfatos), dado que en esta área son abundantes los cultivos de fresas en regadío. Un muestreo reciente en el que se ha determinado el contenido en nitratos ha revelado una concentración máxima (85 mg/l) para el piezómetro 1, lo que apoya la hipótesis anterior. Como se puede observar en la figura 4, la elevación del contenido en sulfatos se produce tras la época de estiaje, como consecuencia de episodios lluviosos importantes. Es, pues, patente el efecto de lixiviado de los sulfatos presentes en el suelo por parte de las aguas de infiltración.

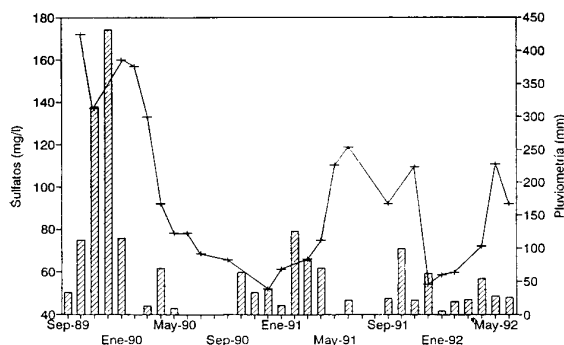


Figura 4 – Evolución de la concentración de sulfatos en el piezómetro 1 y datos mensuales de precipitación (barras).

En otros casos, sin embargo, la inexistencia de actividades agrícolas en las proximidades de los puntos de muestreo del interior del Parque (piezómetro 4 y pozos 2 y 3) obliga a invocar otras causas; en este sentido se han detectado variaciones en el contenido en sulfatos del agua de precipitación (controlada mensualmente en estaciones situadas junto a los piezómetros 2 y 4) que podrían explicar dichas fluctuaciones, teniendo en cuenta, además, la concentración en dicho anión producida por la evaporación en el suelo. Las lluvias presentan una concentración de sulfatos entre 5 y 10 mg/l durante gran parte del año, pero en las primeras lluvias del otoño (y en algunos casos en primavera) muestran contenidos sensiblemente más altos (entre 30 y 35 mg/l).

Todas estas variaciones en la composición química del agua se producen, posiblemente, en los primeros metros de la zona saturada y deben amortiguarse en profundidad.

4.2. Análisis Factorial

Se ha realizado un análisis factorial, denominado en modo R y Q simultáneos (DAVIS, 1986), que tiene la ventaja de que los pesos de las variables y de los objetos (modos R y Q, respectivamente) se pueden representar en un mismo diagrama, de forma que la relación entre un objeto y una variable quedará ilustrada gráficamente por la distancia entre los puntos correspondientes. El programa para el tratamiento de los datos ha sido confeccionado, siguiendo a DAVIS (1986), por uno de los autores de este trabajo (C. ALMEIDA).

El análisis factorial se ha realizado, en cada uno de los puntos de control, para la totalidad de datos analíticos disponibles. Las variables consideradas son las incluidas en la tabla 1, menos el pH y la sílice, que no se analizaron en todas las muestras.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto ciertas diferencias entre los puntos situados en la parte norte y la parte sur. Como ejemplo, se discuten los correspondientes a los piezómetros 2 y 4.

El primer factor (50 por 100 y 60 por 100 del total de la varianza muestral, respectivamente) es de tipo general, pues retiene los pesos más elevados

tanto de la conductividad eléctrica como de los iones más importantes en la mineralización de las aguas subterráneas. Hay que señalar dos particularidades: en el piezómetro 4 la temperatura condiciona también este factor, aunque en la parte negativa, mientras que en el número 2 la situación de los sulfatos y el potasio, alejados del resto de los iones, sugiere un origen hidroquímico de aquéllos independiente de los procesos mayoritarios de adquisición de sales (fig. 5). En el caso de la temperatura, hay que tener en cuenta la escasa profundidad del agua en el sector sur y, por lo tanto, la notable influencia ambiental en dicha variable, por lo que la circunstancia indicada traduce el hecho de que los incrementos en la mineralización tienden a producirse en los períodos de invierno-primavera, como ya ha sido comentado.

En el piezómetro 4 el segundo factor (13 por 100 de la varianza) está determinado, en su parte positiva, por los sulfatos, mientras que temperatura y bicarbonatos presentan pesos intermedios en la parte negativa (fig. 5). En el piezómetro 2, el sulfato -y, en menor proporción, sodio y potasio-determinan el tercer factor, con casi un 15 por 100 de la varianza explicada. Se trata de circunstancias que reflejan el comportamiento diferente para el caso de los sulfatos al que antes se hizo alusión. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que el

ámbito hidrogeológico de ambos puntos es, dentro de la semejanza, ligeramente distinto tanto en lo que se refiere a las características litológicas como edáficas (en el entorno del piezómetro 2, a diferencia del número 4, existe un suelo relativamente bien desarrollado sobre materiales con cierta componente carbonatada).

A la vista de la figura 5, en el piezómetro 4 y para cada uno de los años hidrológicos del período de control, se identifican los siguientes procesos hidroquímicos: al final del estiaje las aguas tienen valores bajos de conductividad eléctrica y de los contenidos en Cl^- , Na^+ y Mg^{2+} ; en el inicio de la recarga se produce un aumento del contenido en SO_4^{2-} , mientras que disminuye la temperatura; con la subida importante del nivel piezométrico (en respuesta a fuertes episodios de precipitación) se produce un ascenso apreciable de la conductividad eléctrica acompañado, principalmente, de incrementos en las concentraciones de Cl^- y Na^+ ; posteriormente, durante primavera y/o verano, las aguas se hacen nuevamente menos salinas y aumenta la temperatura hasta alcanzar la situación de estiaje.

En el piezómetro 2 no se identifican ciclos anuales tan bien marcados (fig. 5), debido a que, por la presencia de un suelo bien desarrollado y la menor pluviometría en el año 91-92, no hubo ningún episodio de recarga apreciable (fig. 6).

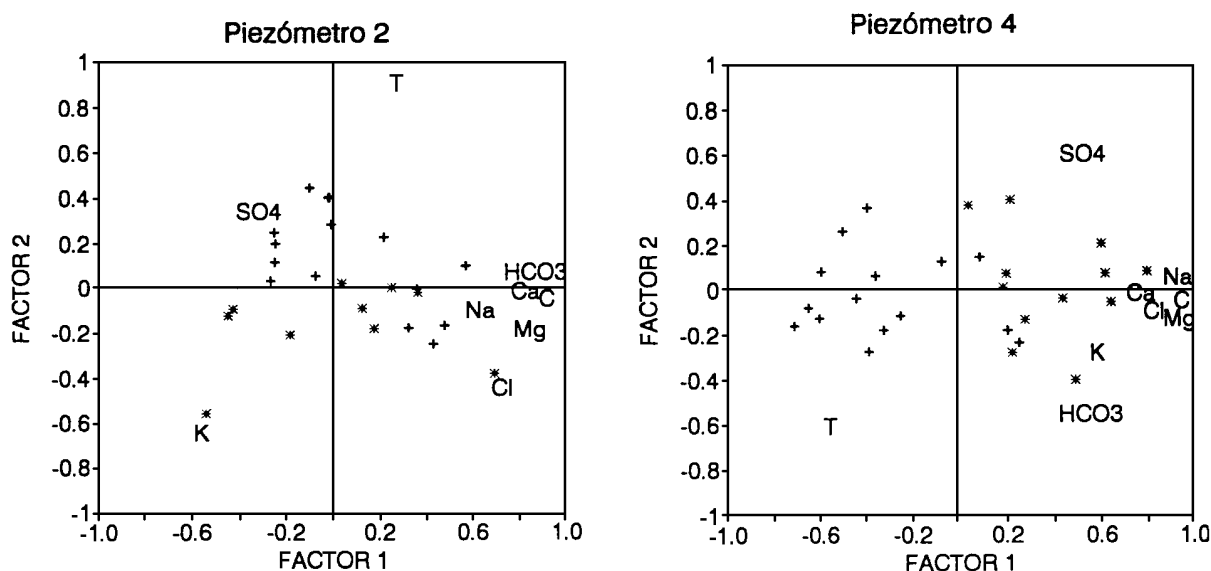


Figura 5. – Resultados del análisis factorial en los piezómetros 2 y 4 (C: Conductividad, T: Temperatura, *: Período de recarga, + muestras de otras épocas).

4.3. Estado de saturación del agua. Simulación hidrogeoquímica

El estado de saturación del agua con respecto a distintas fases minerales se ha determinado mediante el programa HIDSPEC (CARVALHO y ALMEIDA, 1989). Todas las aguas muestran una elevada presión parcial de CO_2 , con contenidos medios entre $1,8 \times 10^{-2}$ y $5,5 \times 10^{-2}$. La causa de estos elevados valores es la actividad edáfica de la vegetación (MANZANO et al., 1991), aunque en algún caso deben estar relacionados con la existencia de una capa arcillosa rica en materia orgánica en el perfil del suelo (por ejemplo en el piezómetro 2).

Los puntos de la zona sur presentan aguas muy subsaturadas respecto a casi todas las fases minerales. En la zona norte (piezómetros 1 y 3 y pozo 1), los resultados son parecidos, excepto para los minerales carbonatados, dadas las altas concentraciones de HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; el logaritmo del índice de saturación para la calcita presenta valores medios cercanos a cero (entre -0,40 y -0,16) y son algo más bajos respecto a la dolomita. No obstante, estos valores varían en el tiempo desde subsaturados hasta claramente sobresaturados.

En el piezómetro 2 se ha realizado una simulación de disolución de dolomita en sistema abierto al CO_2 mediante el programa de modelización hidroquímica MISOLEQ (ALMEIDA y SILVA, 1990). Este punto ha sido seleccionado porque el contenido en los iones Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y K^+ es muy bajo, mientras que la concentración de HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} es elevada (ver tabla 1); además, se comprueba que la suma de los miliequivalentes de calcio y magnesio es igual, aproximadamente, a los del ión bicarbonato y su evolución es similar. La dolomita provendría de los limos del Plioceno que afloran en la zona norte del acuífero.

El método en que se basa dicho programa consiste en resolver un sistema lineal de ecuaciones constituido por las ecuaciones de acción de masas linearizadas y las ecuaciones de balance de masas específicas de cada problema (ALMEIDA y SILVA,

1990). Los datos de entrada son la temperatura, presión parcial de CO_2 y el índice de saturación.

Los resultados obtenidos (fig. 6) muestran que la concentración de HCO_3^- se ajusta bien a una disolución de dolomita en sistema abierto al CO_2 . El pH muestra, asimismo, un ajuste muy bueno. Los procesos que afectarían a la concentración de estos iones y el pH son la dilución producida por el agua de lluvia y las variaciones de la presión parcial de CO_2 . Los efectos debidos al cambio de temperatura sólo podrían explicar (con un rango de variación de 8°C en este punto) diferencias del orden de 1,5 meq/l para los bicarbonatos.

La evolución temporal (fig. 6) muestra los valores mínimos del contenido en bicarbonatos en enero de 1990, debido a las elevadas precipitaciones que causaron un fuerte ascenso del nivel piezométrico, y a partir de ese momento los contenidos ascienden hasta diciembre de 1990. En la primavera de 1991 se produce un nuevo descenso que coincide con otro episodio de recarga notable (fig. 6). No parece que esta disminución se deba al incremento de la evapotranspiración en primavera (HOYLE, 1989; DUTTON, 1990) ya que en los otros dos años de control no se detecta dicho efecto. Estas variaciones, pues, parecen deberse a la dilución por mezcla del agua de lluvia, como se ha expuesto anteriormente para la conductividad eléctrica en los puntos de la zona sur, pero en este

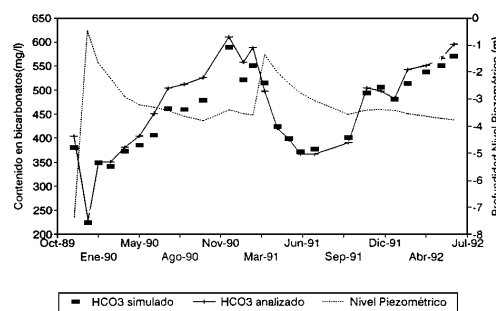


Figura 6.- Evolución de la concentración de bicarbonatos en el piezómetro 1 (datos reales y datos obtenidos a través de una simulación por disolución de dolomita en sistema abierto al CO_2) y variación del nivel piezométrico.

caso la recuperación de los valores habituales es mucho más lenta. Por otro lado, con los ascensos del nivel piezométrico se produce una disminución de la presión parcial de CO_2 , lo que a su vez produce un aumento del índice de saturación de calcita que favorece el descenso del contenido en bicarbonatos. A partir de la primavera de 1991 comienza la recuperación de las concentraciones de HCO_3^- que continúa hasta junio de 1992 (último análisis). Durante el año 91/92 no se produce una disminución en la concentración de bicarbonatos, debido a que no existe ningún episodio de recarga importante (fig. 6).

Los contenidos en magnesio y en calcio, aunque siguen las mismas tendencias que el de los bicarbonatos, presentan una desviación entre valores reales y simulados algo más pronunciada, probablemente debido a que estos cationes están sujetos a fenómenos modificadores de intercambio iónico. Para el calcio, a partir de marzo de 1991, los valores reales son superiores (aproximadamente 1 meq/l) a los obtenidos en la simulación.

5. CONCLUSIONES

En una serie de puntos de control, localizados en distintos sectores del acuífero Almonte-Marismas, se han puesto de manifiesto variaciones relativamente importantes en las variables hidroquímicas controladas (temperatura, conductividad, pH y concentración de componentes mayoritarios), la mayoría de ellas con carácter estacional en relación con los períodos de recarga y estiaje más o menos prolongados. En todos los casos las observaciones corresponden a la franja inmediatamente por debajo del nivel freático.

La evolución de la conductividad eléctrica está condicionada por procesos de dilución debidos al efecto del agua de lluvia durante fuertes episodios de recarga; de manera local, en los puntos de la zona sur, la conductividad aumenta (debido, principalmente, al incremento de Cl^- y Na^+) durante los meses de invierno y primavera y es menor en el verano, lo que puede atribuirse a que la elevación del nivel piezométrico provoca que la zona saturada alcance un horizonte edáfico sub-superficial con mayor contenido en sales.

Durante buena parte del período estudiado, el contenido en sulfatos registra una evolución que sigue pautas distintas a las del resto de los iones mayoritarios; presenta también oscilaciones estacionales, con máximos al principio de la época de recarga, que deben ser resultado de proceso de concentración y lixiviado de las sales depositadas en el suelo de forma natural (precipitación) o como consecuencia de las labores agrícolas.

El análisis factorial realizado confirma todas las conclusiones anteriores. En los diagramas de factores las muestras se ordenan según ciclos anuales condicionados, fundamentalmente, por la conductividad eléctrica del agua: en verano y otoño las aguas suelen presentar una conductividad menor, mientras que en invierno y primavera los valores de la conductividad son más elevados.

Las aguas presentan una elevada presión parcial de CO_2 , con valores medios entre $1,8 \times 10^{-2}$ y $5,5 \times 10^{-2}$.

Se ha realizado una modelización hidroquímica en el piezómetro 2, simulando las concentraciones de HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} y el pH a partir de una disolución de dolomita (presente en los limos del Plioceno), en sistema abierto al CO_2 . Los resultados muestran un ajuste muy bueno entre los valores de HCO_3^- y pH y algo peor para el Ca^{2+} y Mg^{2+} . La evolución temporal está influida sobre todo por los episodios de recarga especialmente importantes, con fuertes ascensos del nivel piezométrico, lo que provoca un descenso del índice de saturación en dolomita por dilución.

REFERENCIAS

- ALMEIDA, C., y SILVA, C. (1990): *MISOLEQ - Um programa para simulação de processos reativos envolvendo minerais, gases e água*. Geolis, IV (1 y 2), 217-227.
- BAONZA, E.; PLATA, A., y SILGADO, A. (1984): *Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia*. Cuadernos de Investigación del CEDEX, C7. Madrid, 139 pp.
- CARVALHO, M. R., y ALMEIDA, C. (1989): *HIDSPEC, um programa de especiação e cálculo de equilíbrios água/rocha*. Geociências, Rev. Univ. Aveiro, 4 (2), 1-22.
- Comisión Internacional de Expertos (1992): *Dictamen sobre estrategias para el desarrollo socioeconómico sostenible del entorno de Doñana*. Informe técnico, Sevilla, 131 pp. más Anexos.

- CUSTODIO, E.; DOLZ, J.; GUIMERA, J.; MANZANO, M.; PONCELA, R.; SAMPER, J.; SANCHEZ-JUNY, M., y VELASCO, E. (1992): *Aportaciones al conocimiento hidrológico de los acuíferos del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Madrid, XVI, 425-439.
- DAVIS, J. C. (1986): *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, 2ª ed., Singapur, 646 pp.
- DUTTON, A. R. (1990): *Vadose zone recharge and weathering in an eocene sand deposit, East Texas, USA*. J. Hydrol., 114, 93-108.
- FAO-IGME (1972): *Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir. Estudio detallado de los suelos de la zona: Villamanrique de la Condesa-Hinojos-Almonte-El Rocío*. Informe Técnico, Sevilla, 58 pp.
- IGME (1983): *Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Informe Técnico, Madrid, 185 pp.
- HOYLE, B. L. (1989): *Ground-Water quality variations in a silty alluvial soil aquifer, Oklahoma*. Ground Water, 27 (4), 540-549.
- MANZANO, M.; CUSTODIO, E., y PONCELA, R. (1991): *Contribución de la hidrogeoquímica al conocimiento de la hidrodinámica de los acuíferos del área de Doñana*. III Simposio sobre el Agua en Andalucía, Córdoba, v. I, 475-486.
- MONTGOMERY, R. H.; LOFTIS, J. C., y HARRIS, J. (1987): *Statistical characteristics of ground-water quality variables*. Ground Water, 25 (2), 176-184.
- OLIAS, M.; CRUZ-SANJULIAN, J., y BENAVENTE, J. (1992): *Investigación hidrogeológica en el Proyecto Efectos ecológicos de la explotación de acuíferos en el Parque Nacional de Doñana*. Informe Técnico, Univ. de Granada, 171 pp. y Anexos.
- OLIAS, M.; CRUZ-SAN JULIAN, J.; BENAVENTE, J.; GARCIA-NOVO, F., y MUÑOZ-REINOSO, J. C. (1991): *New data about the Almonte-Marismas aquifer from the hydrogeological monitoring (1989-1990)*. Proc. XXIII IAH Intern. Congress Aquifer Overexploitation, Islas Canarias, t. I, 159-162.
- PLATA, A.; BAONZA, E., y SILGADO, A. (1983). *Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia*. Isotopes in Hydrology, Viena, 321-340.
- PONCELA, R.; MANZANO, M., y CUSTODIO, E. (1992): *Medidas anómalas de tritio en el área de Doñana*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Madrid, XVII, 351-365.
- RODRIGUEZ-AREVALO, F. J. (1984): *Estudio hidrogeológico de la zona de contacto entre los depósitos eólicos y de marisma en el área de Doñana (La Vera-La Retuerta)*. Tesis de Licenciatura, Univ. Complutense de Madrid, 175 pp.
- SILJESTRÖM, P. (1985): *Geomorfología y edafogénesis de las arenas del Parque Nacional de Doñana*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 467 pp.
- VELA, A. (1984): *Estudio preliminar de la hidrogeología e hidrogeoquímica del sistema de dunas móviles y flecha litoral del Parque Nacional de Doñana*. Tesis de Licenciatura, Universidad Complutense de Madrid, 221 pp.

Original recibido: 16 de Diciembre de 1993.

Original aceptado: 26 de Abril de 1994.