

Respuesta de un acuífero kárstico mediterráneo a un ciclo climático húmedo-seco: el caso de la Sierra de Estepa, Sevilla

M. Vázquez Mora, M. Martín Machuca y A. Díaz Pérez

Instituto Geológico y Minero de España. Plaza de España, Torre Norte, 41013 Sevilla. E-mail: sevilla@igme.es.

RESUMEN

La Sierra de Estepa (Sevilla) es un acuífero kárstico cuyas aguas subterráneas constituyen la única fuente para el abastecimiento de los habitantes de la comarca y el regadío de casi 1400 ha de olivar, cultivo que mueve la economía de esta zona eminentemente agrícola.

El Instituto Geológico y Minero de España viene realizando investigaciones hidrogeológicas en esta zona desde 1975. El análisis de los datos obtenidos nos permite establecer conclusiones útiles como herramienta de ayuda a la toma de decisiones sobre la gestión de las aguas subterráneas del acuífero de la Sierra de Estepa.

La tasa de infiltración media del acuífero se sitúa en torno al 40%, con valores cercanos al 20% en los períodos normales, secos o muy secos, y valores que pasan del 70% en los períodos muy húmedos. Se observa en el período analizado, que va desde 1975 hasta finales de 1999, cómo la recarga está muy influenciada por el modo en que se distribuyen las lluvias, produciéndose habitualmente un déficit anual de 2 hm³ en la reserva, que se ve repuesto con creces con la llegada de períodos de abundantes lluvias que suceden de media cada 5 ó 6 años.

La capacidad mínima de almacén del sistema acuífero de la Sierra de Estepa se estima, considerando sólo los primeros 100 m saturados de los más de 700 de potencia que puede alcanzar el tramo de la serie que se considera acuífero, en 96 hm³. Por lo tanto, se considera que el sistema está infrarregulado y puede satisfacer nuevas demandas, siempre con las garantías necesarias para no alcanzar la sobreexplotación.

Palabras clave: acuíferos kársticos, Andalucía, ciclos climáticos, hidrogeología, sequía.

Mediterranean karstic aquifer response to a dry-humid climatic cycle: the case study of Sierra de Estepa, Seville

ABSTRACT

The Sierra de Estepa, Andalusia, south of Spain, is a karstic aquifer that constitutes the sole urban water supplier of the region and irrigates almost 1400 ha of olive groves, the main economical resource of this agricultural region.

The Instituto Geológico y Minero de España (IGME) has carried out hydrogeological research in this area since 1975. The analysis of the data obtained allows useful conclusions as tools to help in the decision making on the Sierra de Estepa groundwater management.

The average infiltration rate is 40%, with values between 20% in normal, dry and extremely dry periods, and 70% in humid and extremely humid periods.

The recharge is affected by rainfall distribution, and in average, there is annual deficit of about 2 hm³, which is compensated with the next high precipitations period, every 5 or 6 years.

The minimum storage capacity of this aquifer system, estimated using only the first 100 m of saturated layer (out of more than 700 m of aquifer formation), is about 96 hm³. We consider that the system is under-regulated and it could satisfy some new demands, while guaranteeing the sustainability of the exploitation regime.

Key words: Andalusia, climatic cycle, drought, hidrogeology, karstic aquifer.

INTRODUCCIÓN

La comarca de Estepa está situada en la región central de Andalucía, en la provincia de Sevilla, al sur de España. Posee un clima árido por lo que el conocimiento y evaluación precisa de los recursos hídricos, la planificación y una buena gestión de los mismos, son fundamentales para el desarrollo de la región.

La principal fuente de suministro de agua de la comarca es el acuífero de la Sierra de Estepa, de origen kárstico, por lo que se plantea el presente trabajo como un estudio específico del mismo, en el que se pretende mejorar el conocimiento del funcionamiento hidráulico, la respuesta a los estímulos externos y su capacidad de regulación.

La comarca está poblada por unos 60.000 habitantes, de los cuales la mitad se concentra en las localidades de Estepa y Osuna y el resto repartido en pequeñas poblaciones. En esta comarca se han sufrido episodios de sequía que han hecho plantearse a las autoridades el grado de garantía que tienen en la actualidad los abastecimientos de agua potable a las poblaciones. Es necesario por tanto cuantificar y regular con criterios de preservación los acuíferos de la Sierra de Estepa como fuente de abastecimiento de la comarca.

Por otro lado, la actividad económica principal es la agricultura, especialmente el olivar, para producción de aceite, del que es una afamada comarca. Hoy día el avance en las nuevas técnicas agrícolas está permitiendo el uso de sistemas de riego por goteo, que con dotaciones mucho menores que las clásicas, consiguen un aumento importante en la producción. Sin embargo, la escasez de recursos hídricos superficiales limita el desarrollo agrícola de la comarca, por lo que se recurre a las aguas subterráneas.

La Sierra de Estepa se extiende por una superficie de unos 100 km² y destaca por formar un relieve que alcanza los 845 m de cota, constituido por materiales calizos del Subbético Externo. Estos afloramientos calizos se elevan entre 300 m y 400 m sobre el resto de la comarca que tiene un carácter más peniplanizado.

En este ámbito, el Instituto Geológico y Minero

de España viene realizando desde 1975 diversos estudios de carácter geológico e hidrogeológico, que incluyen técnicas geofísicas, sondeos de investigación, estudios paleontológicos y estructurales, campañas de aforos, y el establecimiento de unas redes piezométricas y de calidad de las aguas, que junto con la información meteorológica y los datos de las extracciones y salidas naturales del sistema, permiten en la actualidad disponer de la infraestructura necesaria y aplicar criterios científicos que ayuden a la gestión de las aguas subterráneas de este acuífero.

MARCO GEOLÓGICO. HIDROGEOLOGÍA

Marco Geológico

La Sierra de Estepa se encuadra, desde el punto de vista paleogeográfico, en el dominio Subbético Externo. Conforman un acuífero constituido fundamentalmente por los afloramientos calcáreo-dolomíticos del Jurásico, teniendo como zócalo impermeable los materiales arcillosos del Triásico (Cruz, 1974) (Fig.1).

La serie carbonatada que sustenta el acuífero comienza con un tramo de dolomías con una potencia de entre 50-60 m que tiene un escaso afloramiento y en el que hay muestras de un proceso avanzado de karstificación, con presencia de dolinas, seguido de un tramo calcáreo que ocupa la mayor parte de la superficie de la sierra y que se compone de calizas micríticas, oolíticas y pisolíticas fuertemente karstificada (Cruz Sanjulián, 1974), con una potencia media estimada de 700 m (Peyre, 1974), en la que se distinguen en superficie, entre otras manifestaciones kársticas, grandes campos de lapiaz (zona alta de Becerrero) en las que se produce una elevada infiltración.

La serie termina con un paquete de 25 m de potencia compuesta por calizas margosas, nodulosas y falsas brechas que alcanzan hasta el Cretácico inferior. En algunos puntos de la sierra, esta formación está cubierta por materiales cuaternarios, travertinos o piedemontes, que contribuyen a aumentar la permeabilidad del conjunto de la superficie acuífera.

La disposición estructural es reflejo de los rasgos principales frecuentes en la Cordillera Bética,

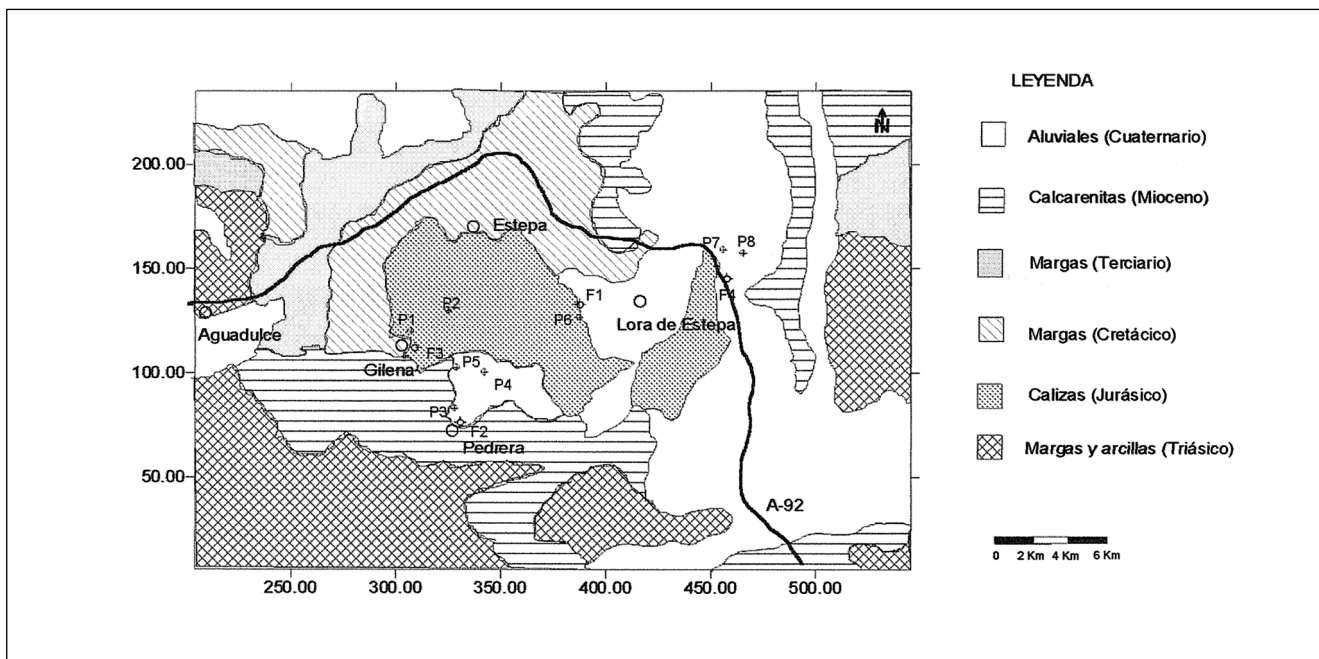


Fig. 1. Esquema geológico de la Sierra de Estepa

Fig. 1. Sierra de Estepa geological scheme

empujes tangenciales de dirección NW, diapirismo parcial del Keuper y diferente comportamiento de los potentes macizos calcáreos frente a las formaciones margosas de su techo y muro. Atendiendo a esto, la Sierra de Estepa responde a una especie de domo anticlinal jurásico cabalgante hacia el N (IGME, 1986).

Hidrogeología

Los trabajos de cartografía geológica de la sierra concluyen que la superficie aflorante del acuífero es de 32,7 km², (Martín Machuca *et al.*, 1983), principalmente calizas oolíticas que conforman un relieve de fuertes pendientes y elevaciones entre los 500 m y los 850 m y que constituye el área de recarga del acuífero de la Sierra de Estepa.

De acuerdo con los trabajos de Peyre (1974), Cruz Sanjulián (1974) y las campañas de sondeos realizadas por el IGME (Martín Sosa, 2000), el espe-

sor del tramo de la serie que tiene una mayor importancia como acuífero, es decir las calizas oolíticas, es de más de 700 m en el núcleo de la formación, si bien se aprecian cambios laterales de relativa importancia. Por esto, y a los efectos de considerar la formación lo más homogénea posible se consideran para los cálculos los primeros 100 m de calizas saturadas, en los que la karstificación, a tenor de los estudios realizados (Martín Machuca, 1983 y Martín Sosa, 2000), está bien desarrollada y es conocida aunque, no obstante, no deben despreciarse los restantes metros de calizas oolíticas como material acuífero que debe ser objeto de estudios posteriores.

El acuífero está limitado en profundidad por la presencia de un substrato impermeable de arcillas y yesos del Triás y lateralmente por las margas cretácicas y terciarias que también son impermeables.

El acuífero de la Sierra de Estepa, como ya se ha dicho antes, es de naturaleza kárstica, y su fun-

cionamiento está dominado por fenómenos kársticos. Existen zonas de recarga con manifestaciones de lapiares y dolinas que implican áreas de infiltración preferentes que justifican, en determinadas circunstancias, importantes volúmenes de la recarga. Análogamente, en lo que respecta a las salidas del sistema, son los manantiales, actualmente regulados con obras de captación para abastecimiento urbano, los que, en régimen natural, representan la mayor parte de las salidas del sistema (Fig. 1)(F1 Fuente de Santiago, F2 Ojo de Pedrera, F3 Ojo de Gilena, y F4 Almajar).

Desde el año 1976 se tienen datos, con relativa periodicidad, de medidas piezométricas y caudales aforados en los manantiales de la Sierra de Estepa. Esto permite tener una serie suficientemente larga de registros que son almacenados en la Base de datos del Inventario de Puntos de Agua y Redes de Control de Piezometría, Calidad e Hidrometría del IGME y que contempla la mayoría de las circunstancias posibles, períodos normales, secos y lluviosos.

También se han realizado sucesivas campañas de análisis hidroquímicos con el objetivo de caracte-

rizar las facies hidroquímicas de las aguas subterráneas y controlar la evolución de la calidad de las aguas. Estas son bicarbonatadas cálcicas, de mineralización media y duras.

En este trabajo se plantea estudiar la respuesta de este acuífero a ciclos climáticos húmedo-seco para obtener conclusiones que permitan aplicar criterios acertados para una mejor gestión de los recursos hídricos y mejorar su protección para el abastecimiento de la comarca.

HIDROMETEOROLOGÍA Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS

El presente estudio ha sido realizado con los datos de precipitaciones de las estaciones meteorológicas más próximas a la Sierra de Estepa (Estepa, Lora de Estepa, Casariche, Aguadulce, Gilena). Los datos de estas estaciones han sido tratados con el Método de las Isoyetas y Polígonos de Thiessen, además de la restitución de series (Llamas, 1993) en los casos en que ha sido necesario, obteniéndose una pluviometría media.

	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80	80/81	81/82	82/83	83/84	84/85	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97
SEP	2,5	42,6	1,0	12,1	57,0	23,6	13,6	22,5	0,0	39,9	0,0	10,8	13,9	0,0	28,0	22,4	56,5	19,9	13,3	14,4	4,1	32,5
OCT	3,8	115,9	43,6	23,7	185,0	63,4	8,8	23,5	0,8	16,9	0,0	77,8	115,4	96,8	34,0	87,4	124,5	141,7	91,8	34,6	0,4	40,2
NOV	25,9	49,2	75,4	15,8	28,6	77,6	0,0	219,9	175,5	177,8	68,3	58,7	46,0	25,8	262,3	45,7	44,2	11,4	0,0	0,0	49,0	93,3
DIC	88,2	153,8	95,7	125,7	26,9	1,5	185,6	41,8	90,8	22,1	83,9	19,0	147,3	0,0	135,5	33,7	25,2	5,2	1,5	8,9	152,7	287,0
ENE	20,3	143,9	31,0	173,1	32,2	0,0	95,2	0,0	19,5	101,1	56,0	120,8	121,3	34,6	64,2	0,0	10,0	30,3	50,0	35,7	181,5	151,0
FEB	92,3	71,4	90,1	138,0	49,4	3,2	54,9	16,0	48,9	78,8	111,9	91,9	43,3	59,2	0,0	101,4	63,6	11,8	77,8	27,1	43,0	0,0
MAR	46,0	10,3	55,0	62,2	49,4	42,2	24,9	43,1	72,6	14,4	68,8	8,1	10,9	56,6	19,5	103,2	36,3	13,6	3,0	44,9	42,2	0,0
ABR	100,9	0,0	71,5	65,5	25,6	127,1	57,8	83,8	50,1	43,0	56,5	69,5	51,7	56,3	91,4	16,2	23,5	52,7	53,4	15,3	33,4	19,9
MAY	45,7	7,2	42,9	0,0	44,8	33,5	31,8	6,0	82,4	83,7	10,7	0,0	53,2	47,6	9,2	5,8	8,4	74,8	36,4	0,8	79,9	79,1
JUN	8,5	81,7	36,0	3,2	0,5	4,2	1,0	0,0	5,7	0,0	3,9	0,0	24,4	2,5	0,0	5,5	29,5	0,7	0,4	15,8	0,3	8,1
JUL	0,0	10,7	0,0	11,1	0,0	0,0	26,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,6	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	2,0	0,4
AGO	15,4	2,0	0,5	0,0	0,0	1,6	3,6	5,5	0,0	0,0	0,0	58,5	0,0	3,0	0,0	0,0	10,2	0,0	0,0	25,9	24,3	16,3
	449,2	688,4	542,6	630,2	499,2	377,7	503,1	462,0	546,0	577,3	459,9	555,5	627,2	382,7	644,5	421,1	431,9	361,9	327,4	223,6	612,6	727,7
MEDIA= 502,3 mm/año																						
Pi/Pmedia	0,9	1,4	1,1	1,3	1,0	0,8	1,0	0,9	1,1	1,2	0,9	1,1	1,2	0,8	1,3	0,8	0,9	0,7	0,7	0,4	1,2	1,4
	N	VH	H	VH	N	D	N	N	H	H	N	H	H	D	MH	D	D	D	S	VD	VH	VH

Tabla 1. Precipitación en la Sierra de Estepa. Datos procedentes de los registros del Instituto Nacional de Meteorología

Table 1. Precipitation data of Sierra de Estepa

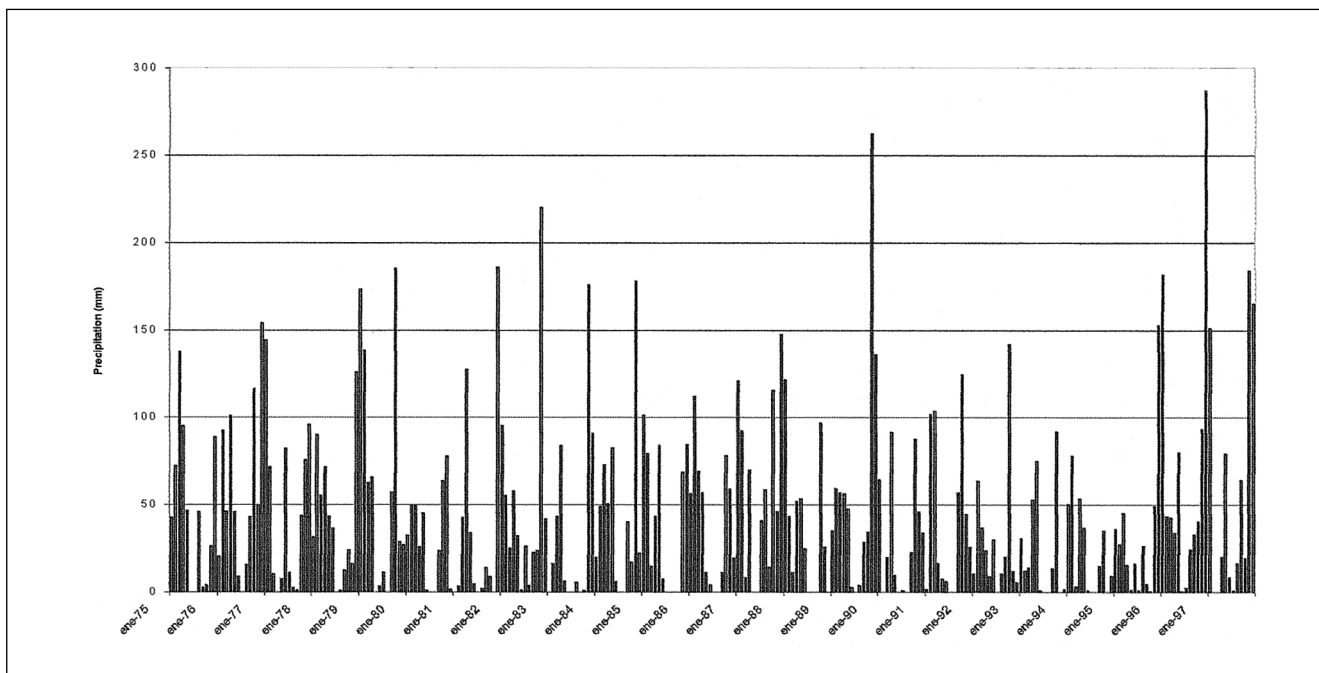


Fig. 2. Evolución pluviométrica durante el período 1975-1999 en la estación 5618 Estepa

Fig. 2. Precipitation evolution in the Sierra de Estepa, between 1975-1999

Como se puede apreciar (fig. 2), las series pluviométricas son lo suficientemente extensas para abarcar situaciones extremas en ambos sentidos, tanto en ciclos secos como húmedos.

Respecto a la información de la piezometría en la sierra de Estepa, se dispone de series largas de datos con valores mensuales desde 1977 de tres sondeos de control representativos y series más cortas pero también con varios años de seguimiento en al menos seis puntos más.

Desde 1998, se encuentra instalado en las proximidades de Gilena, en el sondeo P2 (Fig. 3), con número 154140044 del Inventario de Puntos de Agua del IGME, de modo experimental, un sensor piezométrico de medición en continuo que facilita información cada 6 h de la situación del nivel de la superficie piezométrica.

La evolución de los datos de esta sonda puede verse en la figura 3 y aporta información complementaria al poder captar la respuesta del acuífero a fenómenos meteorológicos de carácter inter-

mensual, además de conocer la evolución completa y precisa de los ascensos y descensos del nivel piezométrico en ese punto.

En la gráfica de piezometría (fig. 3) puede observarse la ausencia de datos en el período 1987-95 debido a una prolongada sequía que afectó a la zona y que provocó la aparición de bombeos extraordinarios que hicieron que los niveles medidos fuesen dinámicos, al estar los sondeos en continua explotación, y no comparables por tanto con las series estáticas obtenidas hasta el momento.

Así mismo, puede observarse que en la evolución de la superficie piezométrica del acuífero, existe un umbral de precipitaciones y una distribución temporal de las mismas a partir de las cuales la respuesta del sistema aumenta de forma geométrica. Este fenómeno será objeto de posterior comentario.

Finalmente, el otro parámetro hidrogeológico medido en la Sierra es el caudal de los manantia-

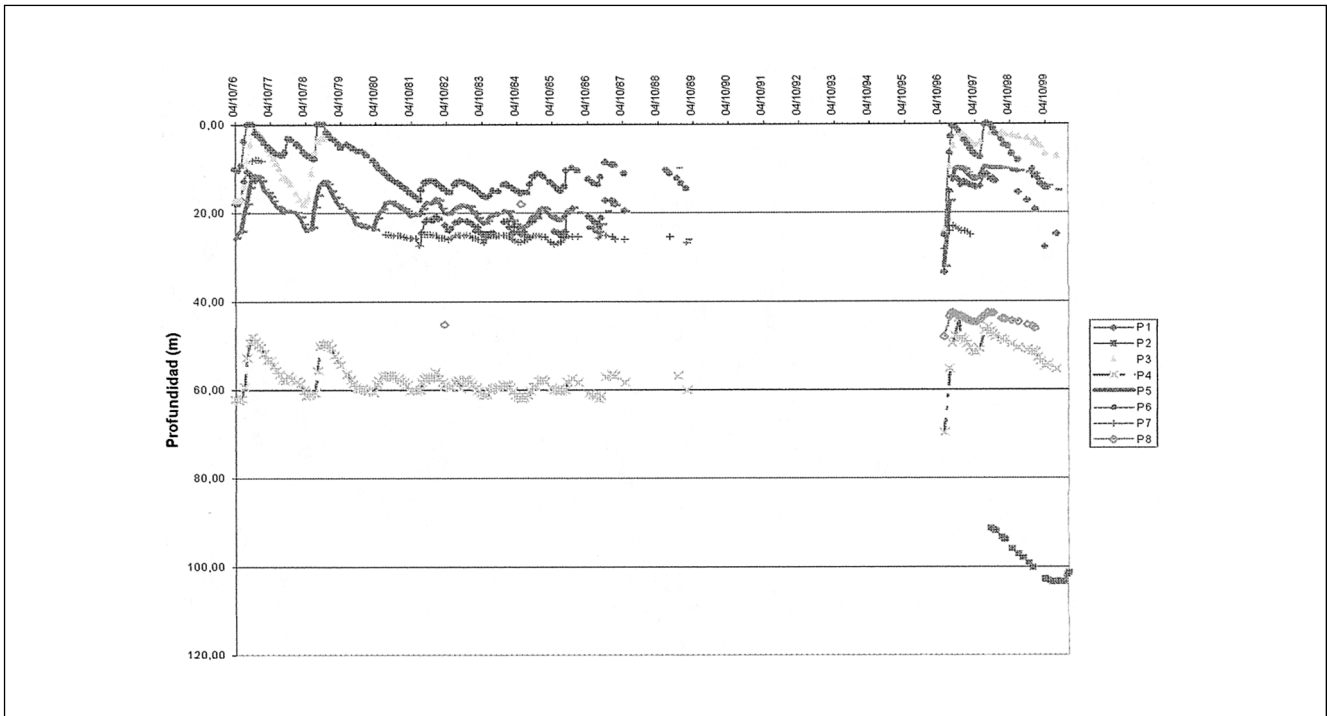


Fig. 3. Evolución piezométrica de algunos sondeos del acuífero de la Sierra de Estepa. Los números de la leyenda hacen referencia a los sondeos marcados en la fig. 1

Fig. 3. Sierra de Estepa groundwater table evolution. Numbers correspond to wells located in fig. 1

les que forman la salida natural del acuífero. En este caso, la figura 4 muestra una serie continua de medidas de uno de los manantiales más importantes (F3, Ojo de Gilena) cuando el régimen del mismo no estaba influenciado. Desde mediados de los 80 hasta la actualidad ha existido una regulación de dichos manantiales que modifica su régimen natural.

A partir de los datos expuestos se han realizado diversas estimaciones del coeficiente de almacenamiento (S) de la formación acuífera, seleccionando períodos sin precipitaciones y en los que las salidas del sistema eran conocidas, bien por ser únicamente las extracciones al estar secos los manantiales o bien porque el caudal drenado por los manantiales también era conocido. En estos períodos, al no haber entradas, las salidas son proporcionales al descenso de nivel de la superficie piezométrica; así tenemos:

$B = \Delta H \times A \times S$, donde:

B = Extracciones

ΔH = Variación nivel de la superficie piezométrica.

S = Coeficiente de almacenamiento.

A = Área del acuífero

Por ejemplo, en los períodos de estiaje de 1979 (mayo-agosto) y 1980 (junio-agosto) las salidas respectivas fueron de 2,6 hm³ y 0,85 hm³ y los descensos medios observados de 2,7 m y 0,95 m, y por tanto los coeficientes de almacenamiento estimados fueron de S =0,029 y S'=0,027. Así mismo, en el período octubre del 1998 a octubre de 1999, sin apenas precipitaciones, se produjo un descenso continuado de niveles con un valor medio de 7.75 m y la salida del sistema se estimó en 8 hm³, por lo que el coeficiente de almacenamiento es de S=0.033

Como resultado de la aplicación de esta fórmula a diversos períodos de tiempo se obtiene el valor medio del coeficiente de almacenamiento $S = 3\%$, que es un valor comúnmente aceptado en la bibliografía (López Geta, 1997) para materiales similares a los de la Sierra de Estepa, calizas oolíticas y micríticas con un grado de desarrollo kárstico medio.

De igual forma, se han considerado períodos de tiempo determinados en los que se conoce con precisión la precipitación, las extracciones, las salidas por manantiales y la evolución del nivel de la superficie piezométrica y se han obtenido las siguientes estimaciones de la tasa de infiltración (T_i):

$$\text{Entradas} = \text{Variación de Almacenamiento} + \text{Salidas}$$

$$P \times T_i = A \times \Delta H \times S + B$$

- P = Precipitación, en hm^3
- T_i = Tasa de infiltración, en %
- A = Superficie, en km^2
- ΔH = Variación del nivel de la superficie piezométrica, en km
- S = Coeficiente de almacenamiento, en %
- B = Extracciones más salidas por manantiales, en hm^3

En los datos de esta tabla se confirma el fenómeno que se cita anteriormente, la existencia de un umbral de precipitaciones, o mejor aún la combinación de un volumen mínimo de precipitaciones en un período de tiempo determinado, que hace que según la infiltración se encuentre

por debajo o por encima de ese nivel umbral, se producirá de una manera o de otra. Puede verse como para dos precipitaciones iguales en cantidad, la respuesta del sistema es diferente, precisamente por que la recarga ha sido también diferente.

Del análisis estadístico de diferentes series se observa que los valores más comunes de la tasa de infiltración para años secos e incluso medios, se sitúan en torno al 20% mientras que para períodos húmedos con gran pluviometría en poco tiempo y en los que se den la circunstancia de que cuando caen las grandes lluvias la capacidad de campo del suelo ya esté saturada, también por coincidir normalmente con los meses de otoño o invierno donde la evapotranspiración es mínima, en esos casos la tasa de infiltración puede superar el 70%. No obstante, el valor medio de la tasa de infiltración es de 44%.

Estos valores tan variables se corresponden con los esperados para este tipo de acuíferos como puede comprobarse en las investigaciones realizadas por Mero (1958) (Issar, 1990), en las calizas cretácicas de Na'aman en Israel, donde la infiltración media calculada fue del 53%, o el caso estudiado por Shacori (1965) (Issar, 1990) en el Monte Carmelo, donde la tasa de infiltración media del período 1958-1965 fue del 47% para una lluvia media de 647 mm.

En general, las respuestas del acuífero a intensas precipitaciones, con ascensos de más 10 m durante un período de lluvias, se producen en las condiciones descritas anteriormente; situación del nivel inicial baja, lluvias previas que saturan

FECHA	P (hm^3)	SALIDAS (hm^3)	VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO (hm^3)	TASA DE INFILTRACIÓN
Oct 76-Mar 77	19,2	2,5	1,83	0,72
Oct 77-May 78	19,2	4	1,24	0,20
Ene 80-Dic 80	12,8	0,5	2,88	0,26
Nov 96-Feb 97	22,4	2	19,12	0,8
May 2000	12,8	0,5	4	0,41
				Media: 0,44

Tabla 2. Cálculo de la tasa de infiltración

Table 2. Infiltration rate calculate

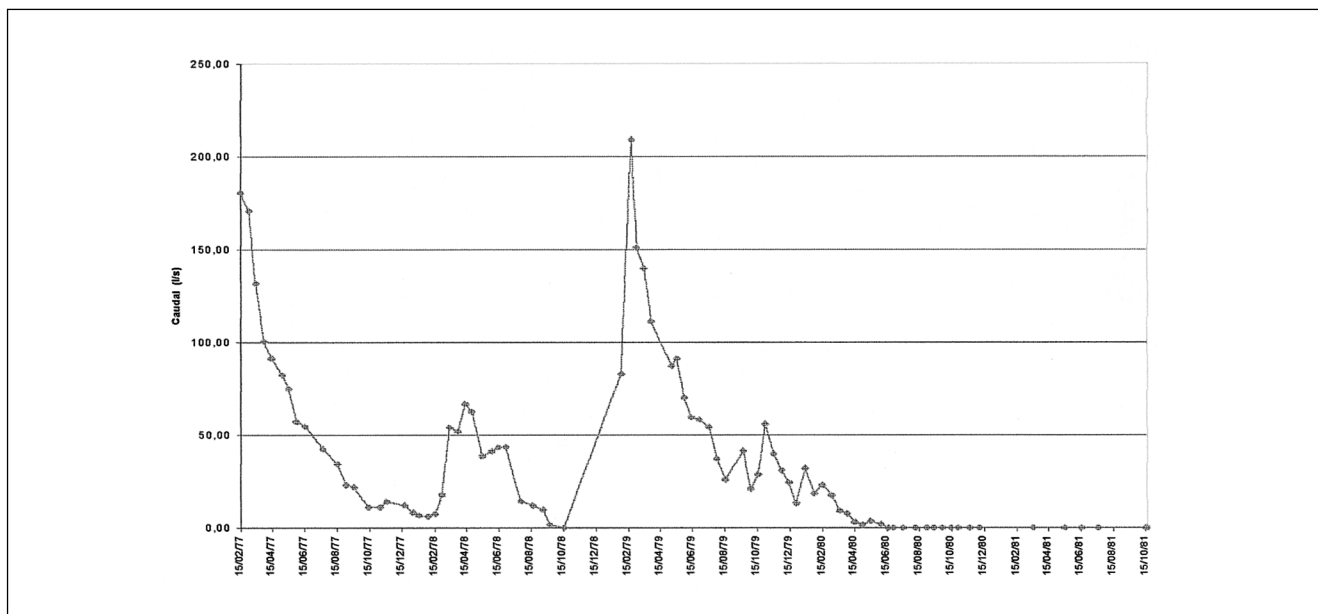


Fig. 4. Hidrograma del manantial F3, Ojo de Gilena, en el período comprendido entre el 15/02/77 y el 15/01/81

Fig. 4. Ojo de Gilena's spring hydrometry, between 15/02/77 and 15/01/81

la capacidad de campo del suelo y luego abundantes precipitaciones que provocan una infiltración elevada.

Como muestra de lo dicho anteriormente, cabe señalar que en octubre de 2000 el piezómetro P2, en que está instalado un sensor automático, tenía una profundidad hasta el nivel freático de 102,3 m y después del período de fuertes lluvias producido en los meses de diciembre de 2000 y enero de 2001, en los que la precipitación media sobre la sierra ascendió a 500 mm, los niveles piezométricos han sufrido un ascenso medio de 7,5 m, cifra que concuerda con una recarga próxima a 7,5 hm³ y con los valores del coeficiente de almacenamiento de 3% y de la tasa de infiltración de 44%.

BALANCE DEL SISTEMA

Se plantean los elementos del balance, estimándose la recarga a partir de la precipitación, considerando como salidas las de los manantiales, bien de forma natural o regulada, las extracciones para regadíos y abastecimiento urbano y

finalmente teniendo en cuenta las variaciones del almacén que se produzcan en un período determinado y que se evalúan en función de la variación de la superficie piezométrica y del coeficiente de almacenamiento.

La precipitación media anual que cae sobre la Sierra de Estepa es de 503 mm/año. La superficie aflorante es de 32,7 km² y la tasa de infiltración media es de 44 %, por lo que los recursos medios se estiman en 7,2 hm³/año.

En cuanto a las salidas del sistema, en un año medio, hay que tener en cuenta las salidas naturales y las extracciones por bombeos. Las salidas naturales se han cuantificado en los años 80, fecha en que fueron significativas. A partir de esos años, se iniciaron las obras de regulación de los manantiales para garantizar el abastecimiento a las poblaciones y en la actualidad estas salidas son muy pequeñas en años normales (0,5 hm³/año), y nulas en los secos, por la regulación anteriormente citada.

Las principales poblaciones abastecidas son Estepa y Osuna, pero existen hasta 8 núcleos

más que hacen un total de 60.000 habitantes y suponen una demanda anual atendida de 6 hm³.

Otra parte de las salidas, en un año normal, son las extracciones para regadíos, que en los últimos años han aumentado hasta convertirse en un volumen importante y que afecta a los términos municipales de Estepa, Gilena, La Roda de Andalucía y Casariche. En la actualidad se riegan con aguas de la Sierra de Estepa unas 1340 ha de olivar (Junta de Andalucía, 2000) con una dotación anual de riego aproximada de 2000 m³/ha/año, lo que supone una demanda atendida de 2,7 hm³/año.

Como resultado del balance de un año normal (Fig. 5), se produce un descenso de la reserva del sistema en 2 hm³/año. Ahora bien, si nos referimos a años húmedos en los que se dan grandes lluvias durante el otoño e invierno, cuando la evapotranspiración es baja y la tasa de infiltración se acerca al 70%, entonces el resultado del balance se invierte y se producen recargas extraordinarias de hasta 20 hm³, como fue el caso de 1996.

Estas recargas permiten recuperar las reservas del acuífero, pero además provocan la salida de grandes caudales por los manantiales de forma incontrolada, no regulada y poco aprovechable. Es este aspecto sobre el que se debe incidir más a la hora de proponer planes de gestión del sistema acuífero, ya que en función de la gestión de esta reserva estará garantizado el abastecimiento

a la comarca y la satisfacción de la demanda hídrica que plantean sus regadíos (Martín Machuca, 1997).

Con la idea de reforzar el conocimiento que se tiene del almacén, e independientemente de que los estudios iniciales de Peyre (1974) y Cruz San Julián, (1976) ya cuantificaran la potencia de la serie de calizas oolíticas, que son las interesantes desde el punto de vista hidrogeológico, en más de 700 m, a efectos prácticos y por el conocimiento directo que dan los sondeos de investigación y de explotación realizados en la comarca (Martín Sosa, 2000), se considera que los 100 m primeros se conocen lo suficientemente bien como para hacer una estimación aceptable de sus parámetros hidrogeológicos y su capacidad de almacenamiento.

En esos primeros 100 m son habituales fenómenos kársticos de featuración y disolución, por lo que se le asigna a ese tramo las mismas características que se han calculado con anterioridad para toda la formación, es decir un coeficiente de almacenamiento del 3%.

Con este coeficiente de almacenamiento, 3%, una superficie de acuífero de 32 km² y una potencia mínima de espesor inundado de 100 m, se tiene que la reserva de este sistema es aproximadamente de 96 hm³. Con estos datos se observa que las posibilidades de regulación del acuífero se encuentran por encima de las demandas planteadas en la actualidad.

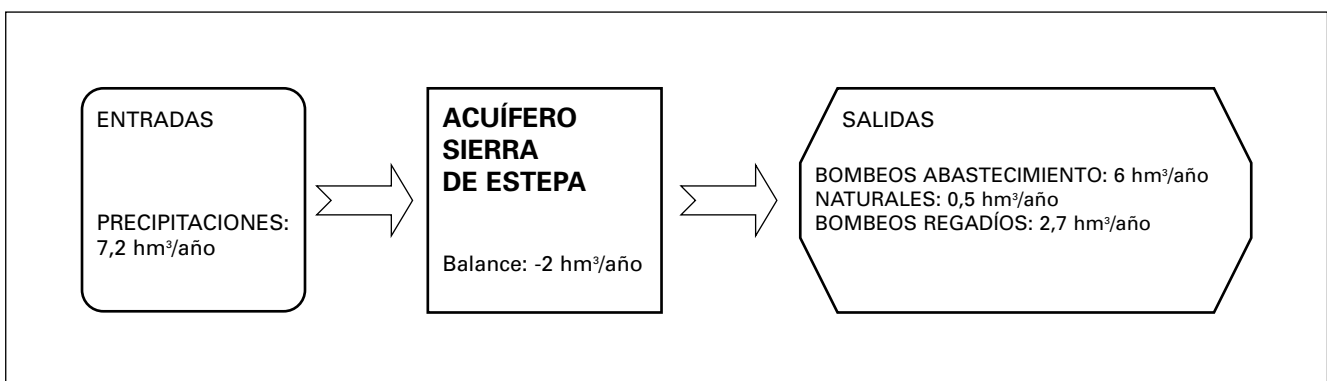


Fig. 5. Balance anual del acuífero de la Sierra de Estepa

Fig. 5. Annual balance of the Sierra de Estepa aquifer

CONCLUSIONES

La Sierra de Estepa constituye un sistema acuífero cuyos recursos son fundamentales para la pervivencia y el desarrollo económico de la comarca en que se ubica por ser la única fuente importante de agua ya que las aguas superficiales pueden considerarse irrelevantes.

En la actualidad, este acuífero abastece a más de 60.000 habitantes y aporta 2,7 hm³/año para regar 1.400 ha de olivar, cultivo que es el motor económico de la misma. El total de la demanda abastecida en la actualidad es de más de 9 hm³/año para unos recursos medios de 7,2 hm³/año.

Se ha actualizado la información existente sobre la infraestructura hidrogeológica, incluidos los sondeos de investigación recientes (Martín Sosa, 2000), y junto con la recopilación de la información meteorológica, las series de medidas de niveles de la superficie piezométrica, las series de aforos hidrométricos en los manantiales y los datos de las extracciones tanto para abastecimiento como para regadíos se ha obtenido una información más precisa del funcionamiento del sistema.

Se ha podido constatar el tipo de respuesta que produce el sistema ante diferentes comportamientos climáticos y se deduce que para unas condiciones climática normales que aporten una precipitación media e incluso un poco por encima de la media, el acuífero responde de forma suave y no se produce una recarga importante, siendo en estos caso la tasa de infiltración cercana al 40% y los recursos anuales cercanos a los 7 hm³/año. El déficit producido en un año medio en las reservas almacenadas en el acuífero es de aproximadamente 2 hm³.

En el caso de años secos y muy secos la tasa de infiltración desciende hasta el 20% o menos y la recarga en esas épocas puede quedar en menos de 3 hm³/año. Sin embargo, periódicamente llegan años muy húmedos, en el período estudiado 1976-77, 1978-79, 1989-90, 1995-96 y 1996-97, que provocan una gran recarga del sistema con tasas de infiltración por encima del 70%, que suponen ascensos del nivel freático de más de 20 m en algunos casos y que producen, en términos generales, una entrada de casi 20 hm³/año.

Por otro lado, se estima que el espesor de la formación acuífera alcanza los 700 m, si bien como caso menos favorable y por el conocimiento físico del medio con obras de captación e investigación realizadas en la zona, se tiene un mejor conocimiento de la zona más superficial, encontrándose generalmente espesores saturados de más de 100 m y con indicios de soportar un aparato kárstico desarrollado. Este dato implica que el almacén o la reserva de que dispone este acuífero se puede cifrar en el caso más desfavorable en 96 hm³.

A partir de estas conclusiones se plantea la necesidad de una mejor regulación del acuífero de la Sierra de Estepa debido a que, si bien la explotación actual provoca una disminución de 2 hm³ de la reserva en los años medios, que puede ser de hasta 3 ó 4 hm³ en los muy secos, también es cierto que periódicamente, al menos una vez cada 5 ó 6 años se dan años muy húmedos que aportan una recarga de hasta 20 hm³ y que al no encontrar almacén suficiente no se puede incorporar a la reserva, produciéndose su salida por manantiales e incorporándose a la red de drenaje superficial.

Se observa, finalmente como el seguimiento de los ciclos históricos en este sistema acuífero permiten contemplar la posibilidad de ampliar la demanda a atender por el mismo y contribuir así a un mayor desarrollo de la comarca, siempre con las debidas garantías para no crear una situación de sobreexplotación, creando por otra parte la suficiente capacidad de almacenamiento para recoger la recarga producida en los períodos de extraordinaria y abundante pluviometría.

REFERENCIAS

- Cruz San Julián, J., 1974: *Estudio geológico del sector Cañete la Real-Teba-Osuna*. Tesis Doctoral Universidad de Granada, Secretariado de Pub. Universidad Granada nº 71, 431 p.
- Díaz Pérez, A., 2000: Redes de control de acuíferos de la cuenca del Guadalquivir. *IGME-DGOH. Informe junio-2000*. 22 p. Anexo 120 p.
- Instituto Geológico y Minero de España, 1986: *Hoja Geológica 1005, Osuna, del Mapa Geológico Nacional*. IGME. Memoria 50 pag. Mapa a escala 1:50.000.
- Issar, A. y Passchier R., 1990: Regional Hydrogeological

Provinces. En Issar, A; Lerner, D. y Simmer, I. Groundwater recharge. *A guide to understanding and estimating natural recharge*. International Association of Hydrogeologists, 8, 55-70.

Junta de Andalucía, 2000: *Inventario y caracterización de los regadíos de Andalucía*. Consejería de Agricultura y Pesca. CD, mem. 25 p.

López, J. A. (coord.), 1997: *Atlas Hidrogeológico de Andalucía*. IGME, Consejería de Obras Públicas y Consejería de Trabajo de la Junta de Andalucía. 216 p.

Llamas, J., 1993: *Hidrología general. Principios y aplicaciones*. Servicio editorial Universidad del País Vasco.

Martín Machuca, M., 1997: *La Sierra de Estepa como fuente de abastecimiento público*. Parte II. Gest Acque. UE. 10 p. 3 fig. 2 planos.

Martín Machuca, M. y Batlle, A., 1983: *Cuantificación de los recursos del macizo calizo de Estepa a partir de su evolución hidrodinámica*. Informe técnico IGME. 14 p. 4 fig.

Martín Sosa, D., Mediavilla, C. y Martín Machuca, M., 2000: *Informe sobre la campaña de sondeos de la Sierra de Estepa*. Informe técnico IGME.

Peyre, Y., 1974: *Géologie d'Antequera et de sa région (Cordillères bétiques, Espagne)*. These, Univ. Paris, 528 p., 77 fig, 5 tab, 2 lám. f.t.

Original recibido: Septiembre 2000.

Original aceptado: Enero 2001.