

El acuífero kárstico eocénico de Sella (Alicante). Explotación intensiva transitoria y correlación entre piezometría y caudales de manantiales

T. Rodríguez Estrella⁽¹⁾, J.L. Quintana⁽²⁾ y V. Mora⁽³⁾

(1) Área de Geodinámica Externa. Universidad Politécnica de Cartagena. P. Alfonso XIII, 52. 30203 Cartagena.
E-mail: tomas.rodriguez@upct.es

(2) INTECSA. c/ Sánchez Madrigal, 7, 7.º. 30004 Murcia.
E-mail: jlquintana@mu.intecsa-inarsa.es

(3) ENADIMSA (ya extinta). c/ Mariano Vergara, 4, 4.º B. 30003 Murcia.
E-mail: ingenieraguavimo@hotmail.com

RESUMEN

El acuífero eocénico de Sella (Alicante), de 75 km², presenta un carácter arrecifal y kárstico y se encuentra todavía en régimen natural. Sin embargo, entre 1996 y 1997 se llevó a cabo, excepcionalmente y debido a la sequía que se sufría entonces, una explotación intensiva transitoria en los dos únicos sondeos de investigación existentes en el acuífero. Durante la extracción (6,3 meses) y posteriormente a la parada (2,5 meses) se llevó a cabo la medida casi continuada de niveles piezométricos y de caudales en los sondeos y la realización de afros en los manantiales. Se extrajo un volumen de 720.879 m³ (caudal medio de 44,2 l/s, si bien los extremos fueron de 18 y 130 l/s). El comportamiento de este acuífero relativamente pequeño, en régimen de explotación, es el de los típicamente kársticos (las transmisividades deducidas fueron de casi 5.000 m²/d); es decir, los descensos al principio son relativamente lentos, con caudales elevados, pero a partir de un momento se produce un descenso brusco en el nivel, al tiempo que el caudal disminuye enormemente. Por el contrario, cuando se paraliza la extracción (o simplemente se reduce) presenta una capacidad de recuperación casi instantánea, y mucho más si recibe aportes de la lluvia; en este caso, como consecuencia del lavado de las arcillas obstruyentes de los conductos kársticos, se consiguieron en los sondeos niveles piezométricos más elevados que los iniciales y en los manantiales caudales superiores.

Palabras clave: acuífero kárstico de Sella, correlación piezometría-hidrometría, explotación intensiva transitoria, provincia de Alicante

The eocenic karstic aquifer of Sella (Alicante). Transitory intensive exploitation and correlation between piezometry and spring flows

ABSTRACT

Sella's eocenic aquifer (Alicante), with its 75 km², shows a karstic and reef-originated condition and it is still a natural system. However, between 1996 and 1997 was carried out, exceptionally, and due to the drought happened then, a long term pumping in the only two wells in the aquifer. During the extraction (6,3 months) and after the stop (2,5 months) it was continuously measured the piezometric level and also pumping rate and the springflow. It was extracted a 720.879 m³ volume (flow of average of 44,2 l/s, taking into account that the extremes values were 18 and 130 l/s). The behaviour of this relatively small aquifer, at exploitation regime, is one of the usual karstic ones, (the deduced transmisivities were nearly around 5.000 m²/d); that is, at first the descents are very slow with high flows, but from one moment it happens a sudden "removal" in the level, at the same time that the flow diminishes enormously. On the contrary, when the extraction stops (or it is just reduced) it shows a recuperating capacity that is nearly instantaneous, much more if it rains; in our case, as a result of the "karstic obstructive clay washing conducts", there were achieved in the wells higher piezometric levels than at the start and higher flows in the springs.

Key words: Alicante province, piezometry-hidrometry correlation, Sella karstic aquifer, transitory intensive exploitation

Introducción

El acuífero kárstico de Sella está fundamentalmente ubicado dentro del término municipal del mismo

nombre, perteneciente a la provincia de Alicante, y más concretamente a la comarca de la Marina Baja. Constituye una zona montañosa, que ocupa la totalidad de la Sierra Aitana, con vértice homónimo de

1.558 m s.n.m; de dicho macizo parten los ríos Guadalest y Sella y dentro del acuífero están representados los barrancos del Arch y de Tagarina, afluentes del último río referido, que están separados por el Alto de la Peña.

Este acuífero se encuentra, todavía, en régimen natural, ya que el Ayuntamiento de Sella no permite que se realicen explotaciones por bombeo, pues podrían hacer desaparecer los manantiales de su término. Sin embargo, entre 1996 y 1997 se llevó a cabo, excepcionalmente y debido a la sequía que se sufría entonces, una explotación intensiva transitoria (por parte del Consorcio de la Marina Baja) en los dos únicos sondeos de investigación existentes en el acuífero, que perforó el IGME en 1979 ("Sondeo Sella") y en 1985 ("Sondeo Benimantell").

Puesto que no es frecuente controlar este tipo de actuaciones, por su alto coste económico, hemos creído interesante dar a conocer los resultados de las numerosas observaciones de este bombeo de ensayo de larga duración, con el fin de poder contribuir al conocimiento de la Hidrogeología kárstica.

Geología de Sierra Aitana

La Sierra Aitana se halla enclavada, dentro de la Cordillera Bética, en la Zona Prebética y más concretamente en el dominio paleogeográfico del Prebético Meridional (Rodríguez Estrella, 1977 y 1979).

Las características geológicas de dicha sierra fueron descritas por primera vez con detalle en las publicaciones referidas y reflejada mediante un resumen, por el mismo autor, en el Libro de las Aguas Subterráneas de la provincia de Alicante, realizado en 1982 por la Diputación de Alicante y el IGME. Últimamente, Rodríguez Estrella (2002) ha estudiado con mayor detalle para la Generalitat Valenciana los aspectos geológicos, mediante cartografía a escala 1:25.000 y Geofísica; seguidamente, nos referiremos a dicho trabajo (Fig. 1).

Estratigrafía

Afloran en la sierra materiales fundamentalmente terciarios, aunque también aparecen en superficie otros de edad cretácica, concretamente en las Sierras de Realet y Ponocho (Sur de la zona de estudio) y Peña Martí (Norte).

De muro a techo existen los siguientes materiales:

- Más de 500 m de margocalizas y margas de edad Albiense-Cenomaniense. Afloran al Sur de la Sierra del Realet.

- 300 m de calizas micríticas grises, a veces con sílex, y algunas pasadas margosas. Se les atribuye una edad de Cenomaniense. Afloran en la Peña Martí y en el Monte Ponocho. Este tramo se hace algo margoso hacia el Oeste, como ha podido observarse en el sondeo de "El Realet", que el IGME realizó en diciembre de 1979.
- Más de 550 m de calizas, margocalizas rosadas y algunas pasadas de margas blancas con Globotruncanas, de edad Santoniense-Campaniense. Aflora en la depresión del Barranco del Charquer. En el sondeo de "Guadalest", que realizó el IGME en diciembre de 1979, se atravesaron 553 m de Senoniense superior, sin conseguir salir de él.
- 200 m de arcillas verdes, con intercalaciones de margocalizas y areniscas. Presentan abundante fauna de Nummulites y su edad es Ypresiense. Aflora en casi todos los bordes de la Sierra Aitana, en afloramientos continuados y junto a las altas cumbres de la misma, en pequeños asomos.
- 50 a 350 m de calizas organógenas recristalizadas blancas, de carácter arrecifal. Los mayores espesores se han registrado próximos al vértice de Aitana y en el Alto de la Peña de Sella, y se observa una disminución de potencia hacia el Sur y hacia el Oeste; en el primer sentido, la disminución es hasta cierto punto gradual, pero en el segundo es brusca, al tiempo que se producen intercalaciones margosas dentro de las calizas pararecificales (por ejemplo, paraje del Molí Vell); este último fenómeno tiene una causa tectónica, como se verá a continuación. Se ha encontrado fauna abundante de Nummulites y su edad es Luteciense. Este tramo es el que ocupa mayor extensión y el que constituye la Sierra Aitana, propiamente dicha.
- 100-150 m de margas y margocalizas (O₁). Presentan fauna, fundamentalmente, de Lepidocyclinas y Operculinas. Ocupan las depresiones de Arch y Tagarina.
- 50 m, como máximo, de calcarenitas bioclásticas (O₂). La fauna es muy similar a la del tramo anterior. Esta formación se encuentra representada en las depresiones de Arch y Tagarina.
- 50-150 m de margas y margocalizas (O₃) muy similares a las del tramo O₁. Aumentan su potencia hacia el Sur y alcanzan un gran desarrollo al Sur del Collado de Monsempere.
Los tramos O₁, O₂, O₃ tienen una edad de Oligoceno.
- Sólo entre los parajes de Almusement y La Palmera (Sur de la zona estudiada) afloran unas calcarenitas, que alcanzan una potencia de 100 m, y pertenecen al Mioceno medio.

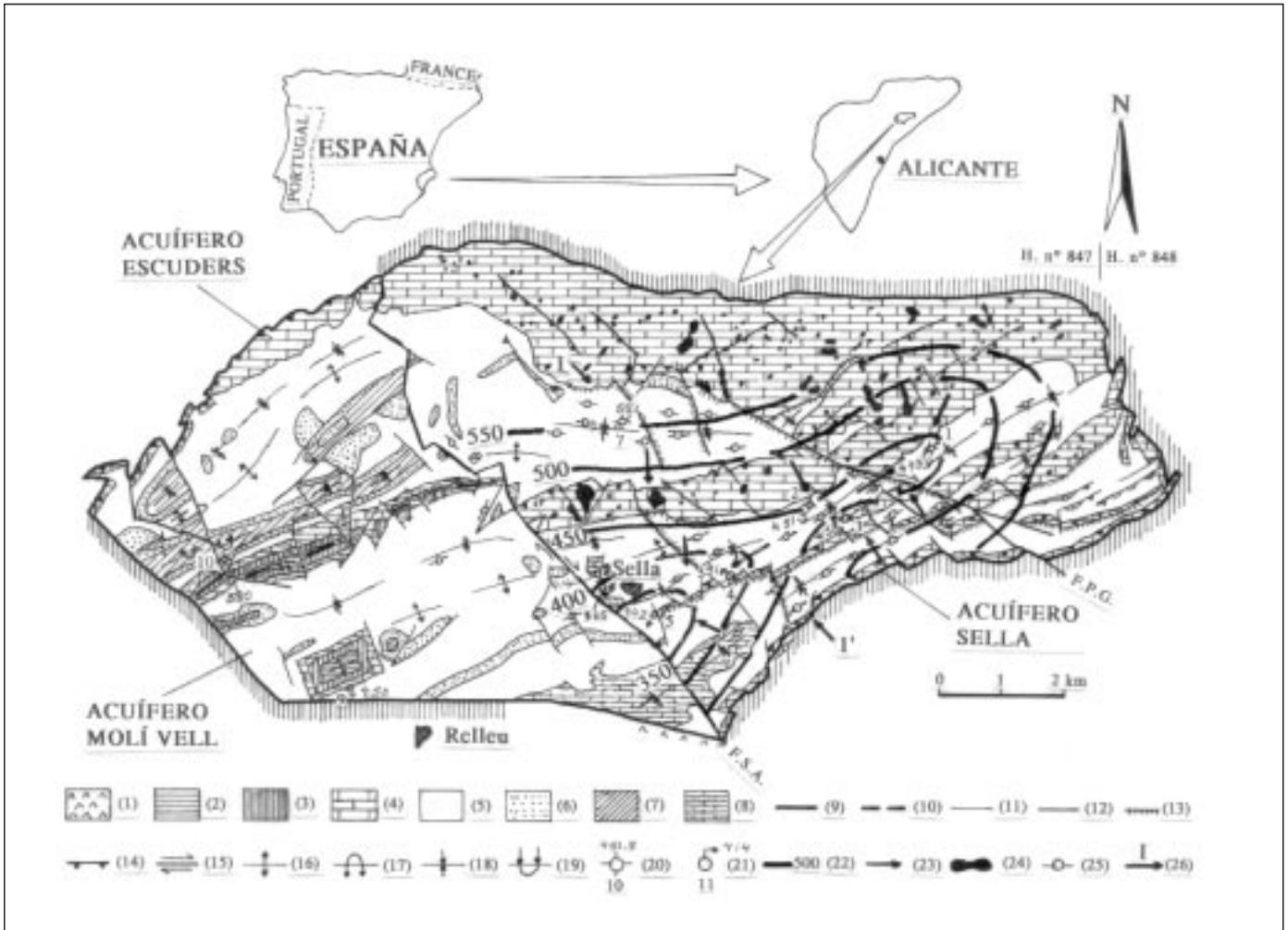


Fig. 1. Mapa geológico e hidrogeológico del Sur de Sierra Aitana. 1: Arcillas con yesos. Triás. 2: Margocalizas rosadas. Senoniense. 3: Arcillas verdes. Eoceno inferior (impermeable de base). 4: Calizas arrecifales. Eoceno medio (permeable principal). 5: Margocalizas y margas. Oligoceno (impermeable de techo). 6: Calcarenitas. Oligoceno. 7: Margocalizas y margas. Oligoceno. 8: Calcarenitas. Mioceno medio. 9: Límite de acuífero. 10: Límite supuesto. 11: Contacto geológico. 12: Falla. 13: Falla normal. 14: Falla inversa. 15: Falla de desgarre. 16: Anticlinal. 17: Anticlinal volcado. 18: Sinclinal. 19: Sinclinal volcado. 20: Sondeo con su nº de identificación y nivel piezométrico. 21: Manantial con su nº de identificación y nivel piezométrico. 22: Isopieza con su valor. 23: Sentido de flujo. 24: Dolina y uvala. 25: SEV. 26: Corte hidrogeológico

Fig. 1. Hydrogeological and geological map of south Sierra Aitana. 1: Gypsum and clays. Triassic. 2: Pink marls limestones. Senonian. 3: Green clays. Lower Eocene (base impermeable). 4: Reefing limestones. Middle Eocene (main permeable). 5: Marls limestones and marls. Oligocene (top impermeable). 6: Calcarenites. Oligocene. 7: Marls limestones and marls. Oligocene. 8: Calcarenites. Middle Miocene. 9: Limit of aquifer. 10: Supposed limit. 11: Geologic contact. 12: Fault. 13: Normal fault. 14: Reverse fault. 15: Transcurrent fault. 16: Anticline. 17: Vergent anticline. 18: Syncline. 19: Vergent syncline. 20: Boring with identification number and absolute piezometric level. 21: Spring with identification number and absolute piezometric level. 22: Isopiezometric contours. 23: Flow line. 24: Doline and uvala. 25: SEV. 26: Hydrogeological section

Tectónica

Observando la cartografía de detalle de la zona de estudio (Fig. 1) se advierte que existen dos sectores con características geológicas diferentes, separados por una falla de dirección N 130° E, que hemos denominado de Sella-Alcolecha (F.S.A.), cuya traza coincide aproximadamente con la carretera entre dichas

localidades. Esta fractura fue originariamente de desgarre del tipo dextrorsa, pero en la actualidad está muy desfigurada por la afección de fallas normales posteriores, especialmente en su tramo septentrional. El carácter dextrorso se deduce por los arrastres que experimentan, por ejemplo, las sierras de la Real o el Collado de Montsempere, de dirección NE-SO, pero que próximo al plano de falla pasan a ser NO-

SE; también, porque en el bloque occidental se han "adelantado" materiales del Eoceno y Oligoceno de carácter ya pelágico y no nerítico, como ocurre en el bloque oriental.

En el sector oriental afloran casi exclusivamente dos tipos de rocas, las calizas arrecifales del Eoceno medio sin intercalaciones margosas y las margocalizas y margas del Oligoceno (O₁). Las estructuras predominantes son las de pliegues-fallas y escamas de vergencia Norte; destacan los sinclinatorios, con ejes que se levantan hacia el Este, de Tagarina y Barranco del Arch, cuyos flancos septentrionales están fracturados por fallas normales, mientras que los meridionales están afectados por fallas inversas; de calizas del Luteciense, ambos sinclinatorios están separados por el anticlinal existen en el Alto de la Peña de Sella con falla inversa en el flanco Norte (que se amortigua hacia el Este) y falla normal en el Sur (Fig. 2).

La estructura en escamas de esta sierra, que condiciona sin duda el comportamiento hidrogeológico ha sido puesta de manifiesto por Rodríguez Estrella (2002). La falla inversa frontal del Alto de la Peña de Sella, se ha podido constatar en profundidad, gracias al levantamiento topográfico realizado en las galerías artificiales de la fuente del Arch (Fig 3).

Dentro de este sector oriental existe una falla de desgarre, de características similares que la Falla de Sella-Alcolecha, aunque de menor envergadura, que presenta una dirección N 120° E y que hemos denominado de Más Pedás-Más el Galeró (F.P.G.); aquí el carácter dextrorso se deduce por el desplazamiento de bloques a uno y otro lado de la falla, como por ejemplo el cerro de la Font de l'Arc que se ve interrumpido hacia el Este y desplazado hasta 500 m

hacia el Sur, al otro lado de la falla, pasando a constituir el cerro de la Sirvienta. También tiene carácter de falla normal, cuyo bloque levantado es el oriental, lo que motiva que el sinclinal de la depresión de Casas del Arch levante su eje hacia la falla (y se estreche dicho sinclinal en esa dirección), lo contrario de lo que ocurría con los sinclinatorios al Oeste de la falla. Además de esta fractura de carácter dextrorso, existen muchas más en este sector del mismo tipo, pero de menor envergadura.

En el sector occidental, las calizas arrecifales tienen un espesor mucho más pequeño y también presentan intercalaciones margosas, propio de una facies más abierta. Además de las calizas del Eoceno medio y de las margocalizas y margas del Oligoceno (O₁), están representadas ya con frecuencia las calcarenitas (O₂) y las margocalizas (O₃); sólo en este sector, afloran las margocalizas rosas del Senoniense superior en el núcleo de los anticlinales, como en la Sierra de la Real o en el paraje del Molí Vell. El estilo tectónico es de pliegues volcados con vergencia norte, aunque existe también alguna falla inversa con la misma vergencia. Son frecuentes las fallas de desgarre dextrorsas de dirección N 130° E.

Hidrogeología del acuífero de Sella

Rocas permeables e impermeables

El acuífero principal está constituido por 50 a 350 m de calizas arrecifales del Eoceno medio; otras rocas permeables, pero secundarias, son las calcarenitas del Oligoceno (O₂) y las del Mioceno medio, ya que

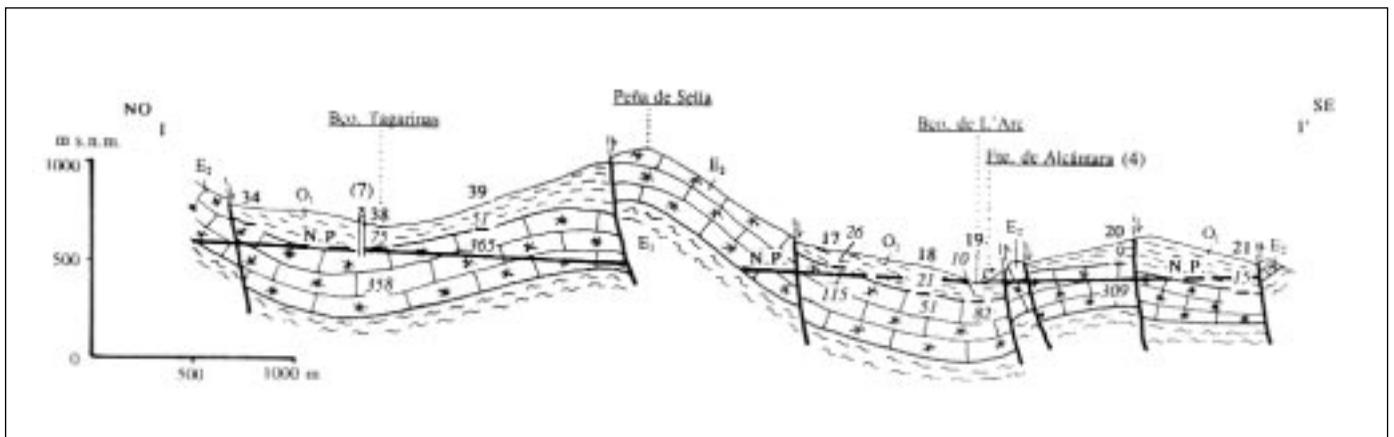


Fig. 2. Perfil hidrogeofísico. E₁: Arcillas verdes. Eoceno inferior. E₂: Calizas arrecifales. Eoceno medio. O₁: Margocalizas y margas. Oligoceno. O₂: Calcarenitas. Oligoceno. O₃: Margocalizas y margas. Oligoceno. N.P.: Nivel piezométrico
 Fig. 2. Hydrogeophysic section. E₁: Green clays. Lower Eocene. E₂: Reefing limestones. Middle Eocene. O₁: Marls limestones and marls. Oligocene. O₂: Calcarenites. Oligocene. O₃: Marls limestones and marls. Oligocene. N.P. Piezometric level

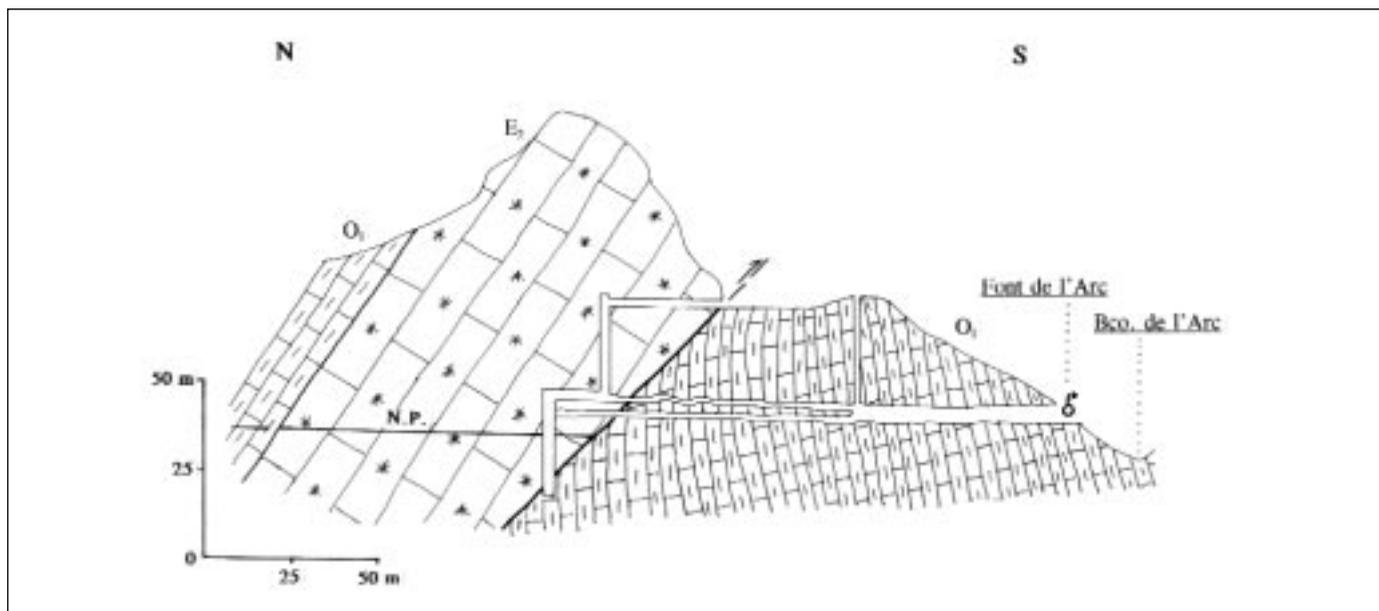


Fig. 3. Perfil de las galerías artificiales de la Font del Arc
 Fig. 3. Section of the artificial galleries of the Font of Arc

sólo están representadas en pequeños afloramientos aislados, sin conexión hidrogeológica unos con otros. El impermeable de base son las arcillas verdes del Eoceno inferior; el impermeable de techo, las margocalizas y margas del Oligoceno (O_1) y el impermeable lateral, las arcillas con yeso del Trias, incluso el mismo Eoceno medio, pero con facies margosa, debido a un cambio de facies.

Piezometría

Está representada por dos sondeos y una decena de manantiales. Las cotas de nivel del agua de los más representativos, después de haber realizado una nivelación de precisión (23-7-1996), son las siguientes: Fuente Mayor (nº 8 de la fig. 1): 414 m s.n.m.; Fuente de Alcántara (nº 4): 391 m; Fuente del Arch o Font de l'Arc (nº 3): 458 m; Fuente de Alfara (nº 5): 342 m; Fuente de Ters (nº 6): 375 m; sondeo "Tagarinas" (nº 7): 651 m; sondeo de "Benimantell" (nº 1): 448,4 m y sondeo de "Sella" (nº 2): 451,5 m.

El sondeo de "Sella" o de "Sabatera" (nº 2) tiene una profundidad de 141 m y tras atravesar 58 m de margocalizas y margas del Oligoceno, se cortaron 83 m de calizas muy fisuradas del Eoceno medio, todas ellas saturadas. El agua apareció en el metro 65 y subió hasta el 62; al llegar al 68, el nivel ascendió hasta el 60; por último, en el metro 90 el agua subió

hasta el 49,47. Por tanto, el acuífero en el lugar del emplazamiento del sondeo está en carga, concretamente 8,5 m. Se tocaron pasos de agua preferenciales en los metros 65, 68 y sobre todo entre 90 y 91,5 m (1,5 m) tratándose esta última de una zona fuertemente karstificada y con gran potencial hídrico. La perforación tiene un diámetro, de arriba a abajo, de 600 mm y la entubación es, en los 141 m del sondeo, de 500 mm.

El sondeo de "Benimantell" (nº 1) tiene una profundidad de 240 m y tras atravesar 66 m de margocalizas y margas del Oligoceno, se cortaron 174 m de calizas muy fisuradas del Eoceno medio, de las cuales 54 m están secas. El agua apareció en el metro 122 y subió hasta el 120, a pesar de que el acuífero en el lugar del emplazamiento del sondeo está libre. Existen pasos de agua preferenciales en los metros 122, 156 y entre 162 y 165 (3 m); este último tramo constituye una zona fuertemente karstificada y con gran potencial hídrico. La perforación hasta el metro 177 tiene un diámetro de 650 mm y desde éste al metro 240 se perforó con 550 mm de diámetro. La entubación es de 550 mm entre 0 y 126 y de 450 mm entre 116 y 240 m.

Se ha confeccionado un mapa de isopiezas correspondiente al 23 de Julio de 1996 (Fig. 1) y en él se puede ver lo siguiente:

- 1 Los niveles piezométricos están comprendidos entre 551 y 342 m s.n.m.

- 2 El sentido del flujo es de NE a SO, en dirección a las fuentes de Sella.
- 3 Existe un eje de drenaje, coincidente con el Barranco del Arc, donde afloran los principales manantiales del acuífero, tales como Font de l'Arc (nº 3) con régimen de "trop plein" y caudales de hasta 2.000 l/s; la Fuente de Alcántara (nº 4), con un caudal bastante constante de 12 l/s y la Fuente de Alfara (nº 5), con un caudal de 1 l/s.
- 4 El gradiente es del 5% en la parte Norte y Noreste del acuífero, mientras que en el Sur y Suroeste pasa a ser del 10%, como consecuencia de que la roca permeable principal presenta menor espesor; además, el gradiente guarda relación con la topografía (es mayor en las zonas de gran pendiente que en los valles) y próximo a las zonas de emergencia aumenta el gradiente, como consecuencia de una pérdida de carga.
- 5 Se aprecia que hay un umbral hidrogeológico, próximo a la Font de l'Arc, ya que el sondeo de "Casas del Arc" o de "Benimantell" (nº 1) tiene un nivel piezométrico más bajo (448,4 m s.n.m.) que el sondeo (nº 2) de "Sabatera" o de "Sella" (451,5); éste fenómeno es motivado por la falla

de Más Pedás-Más el Galeró, ya que levanta el bloque oriental y, en consecuencia, el impermeable de base.

En la evolución piezométrica del sondeo de "Sella", que se trata de un piezómetro de la red nacional, que se mide desde finales del 1979 (Fig. 4), se advierte lo siguiente:

- 1 La cota piezométrica media interanual se sitúa en torno a los 458 m s.n.m. Los niveles más bajos se obtienen en el estiaje (destacando el obtenido en el verano de 1984) y los máximos en primavera.
- 2 Es muy sensible a los cambios climatológicos, como por ejemplo en la sequía entre 1981 y 1983, que el nivel descendió 20 m; lo mismo ocurrió con la sequía de 1993 a 1995. Respecto a las lluvias, su influencia se deja notar en apenas una semana.
- 3 Más sensible aún es a las extracciones por bombeo, que produjeron descensos de más de 40 m, en sólo 4 meses.
- 4 Pero también tiene una gran capacidad de recuperación, pues tan pronto se paró el bombeo (incluso cuando se disminuyó la extracción), los niveles se volvieron a recuperar totalmente, en apenas 3 meses.

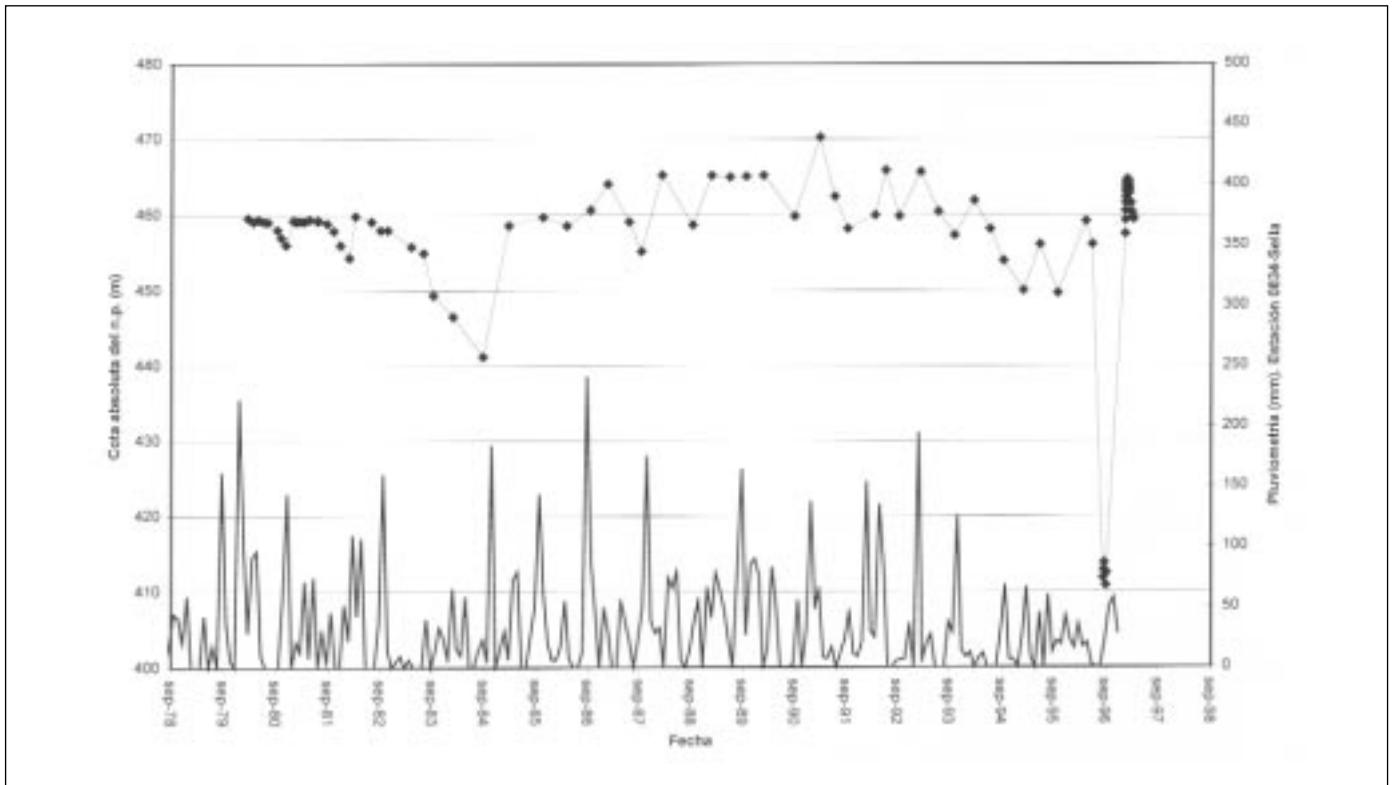


Fig. 4. Evolución piezométrica histórica en el sondeo de "Sella"
Fig. 4. Historic piezometric evolution at Sella's drilling

Definición geométrica

El acuífero de Sella está perfectamente definido por el Norte, Sur y Este, ya que en todos ellos aflora el impermeable de base. El límite que no está tan claro es el occidental; sin embargo creemos que lo constituye la falla de la Carretera Sella-Alcolecha, por las siguientes razones:

- se produce un cambio brusco litológico a nivel de la roca permeable principal, en el sentido de que al Oeste de la falla las calizas arrecifales presentan intercalaciones margosas.
- la piezometría a uno y otro lado de la falla es distinta; en efecto, si continuamos hacia el Oeste, por ejemplo, la isopieza de valor 350 del acuífero de Sella, nos encontramos que en el paraje de Molí Vell existe un manantial (nº 9) de cota 450 m s.n.m., es decir, 100 m más alta; lo mismo ocurre con la isopieza de valor 500 m s.n.m. del acuífero de Sella, que nos encontramos con el sondeo (surgente originariamente, hoy puesto en explotación) del "Maset del Vicari" (nº 10) con una cota de 597 m s.n.m. (97 m más alto).

El acuífero así definido tiene una extensión de 75 km².

Recarga

Según el estudio climatológico efectuado por el IGME (1978), correspondiente al período 1956-1975 (19 años), la diferencia entre pluviometría media (500 mm) y evapotranspiración real (420 mm) nos da el valor de lluvia útil de 80 mm, que referidos a los 40 km² de afloramientos de roca permeable suponen un volumen de 3,2. hm³/a. Si se aplica un coeficiente de infiltración del 65%, se tiene que la recarga es de 2 hm³/a.

Puesto que el período contemplado por el IGME no considera la sequía del 1982-1987, se ha efectuado otro estudio climatológico referido al período 1953/1992 (39 años). En él se ha visto que los años más lluviosos han sido 1958 (649 mm), 1971 (690 mm) y 1979 (679 mm); y los menos lluviosos 1960 (133 mm), 1963 (206 mm), 1977 (211 mm), 1982 (230 mm) y 1983 (261 mm). También se ha observado que el mes más lluvioso con diferencia, en los 39 años considerados, ha sido octubre, con casi 70 mm; mientras que los más secos han sido julio y agosto, con 2,5 mm y 9 mm, respectivamente mm. Respecto a las temperaturas medias mensuales, los meses más calurosos son julio y agosto, con algo más de 25°C, y los menos enero y febrero, con 12 y 13°C.

Con estos datos se llega a que la pluviometría media anual en el acuífero es de 418,5 mm y la ETR de 354,5; por tanto, la lluvia útil es de 64 mm, que referidos a los 40 km² de afloramientos permeables suponen un volumen de 2,56 hm³/a. Aplicando un coeficiente de infiltración del 65%, se obtiene una recarga de 1,7 hm³. Este valor es inferior al calculado por el IGME, ya que en él no se había considerado el período de sequía del 1982 al 1987.

Resumiendo, se puede decir que la recarga está comprendida entre 1,7 y 2 hm³/a.

Descarga

Con el objeto de realizar una mejor valoración de los recursos del acuífero, se procedió a aforar con micro-molinete, el 27 de abril del 1996, los diferentes manantiales existentes en los barrancos de Tagarina y del Arc. Además de este dato se ha dispuesto de los valores forométricos, de todos los manantiales, que disponía el Ayuntamiento de Sella, correspondientes a julio de 1984; puesto que este último se trataba de un año seco, se ha visto que en los manantiales más constantes, como el de Alcántara, la reducción (en relación con el aforo realizado por nosotros en abril del 1996) fue de un 25%.

En el Barranco de Tagarina, existe una serie de emergencias que se recogen en los azudes denominados La Murtera, Ters de Arriba, Ters de Abajo y Molino Nuevo; se trata de los manantiales: Fuente Mayor (nº 8), Ters (nº 6) y otros más pequeños denominados Molí Nou y de Anouer. La descarga conjunta de todos ellos fue de 23,19 l/s.

En el Barranco del Arc, afloran los manantiales de Alcántara (nº 4), Alfafara (nº 5) y la fuente del Arc (nº 3), esta última de tipo "trop plein". El caudal de los manantiales permanentes es de 18,41 l/s, pero a éste hay que sumarle el del Arc.

La suma de los caudales aforados en 1996 (sin contar los del Arc) fueron de 41,6 l/s.

Dado el limitado número de controles hidrométricos existentes, sobre la totalidad de los manantiales que emergen en el borde meridional del acuífero de Sella, se ha procedido a efectuar una correlación (por mínimos cuadrados) entre los valores determinados en las campañas hidrométricas de Julio de 1984 y Abril de 1996 con respecto a las profundidades de los niveles piezométricos de sondeo de "Sabatera".

Para el cálculo de la descarga del acuífero de Sella se ha optado por, por un lado, evaluar el volumen drenado a través del conjunto de los manantiales de caudal continuo durante el período 1980-1996 y por

otro, estimar el correspondiente a la fuente del Arch, que emerge de manera temporal y de forma irregular a lo largo de los años; ambos son complementarios.

Los caudales se rigen por la ecuación exponencial:

$$Q = mc^n$$

expresado en logaritmos base natural:

$$\ln Q = \ln m + n * \ln c,$$

siendo:

Q el caudal de surgencia,

c la cota del nivel piezométrico y

ln m y n los coeficientes a determinar.

Según estos cálculos, en la fuente del Arc se ha llegado a valorar el coeficiente ln m como de -1.747,10927 y el de n como de 285,196533.

En el caso de los manantiales continuos (Alcántara, Mayor, Ters...), los valores respectivos de esos parámetros son de -36,9678703 y de 6,6425481.

En las figuras 5 y 6 se presenta la evolución histórica del nivel piezométrico del pozo "Sella" en relación con los caudales drenados a través del manantial del Arc, así como del resto de las surgencias naturales por el sector meridional del acuífero de Sella. En la fuente del Arc, el caudal más elevado se registró durante marzo del año 1991 (Fig. 5), que sobrepasó los 2.390 l/s, seguido de otros, también relevantes, como en abril de 1997 (1.086 l/s), febrero de 1991 (826 l/s) y diciembre de 1997 (688 l/s). Por otro lado, se pone de manifiesto la escasa duración de la emergencia en este manantial del Arc (inferior a un mes) debido a su condición de "trop-plein". Por el contrario, las salidas por el resto de los manantiales son bastante uniformes y mantienen sus caudales (exceptuando el período de explotación de 1996-97) en valores medios que rondan los 40 l/s.

Las figuras 7 y 8 presentan la correlación que existe entre la cota del nivel piezométrico del sondeo "Sella" y los caudales de la fuente del Arc, así como de los manantiales que emergen por el sector meridional del acuífero de Sella, respectivamente.

En el caso de los manantiales continuos meridionales, los caudales se han deducido mediante la planimetría del área comprendida entre la línea de caudales y los ejes de coordenadas y que ha resultado ser de un caudal medio de 41 l/s; curiosamente, coincide con el drenado por los manantiales durante el mes de abril de 1996, lo que representa un volumen anual de 1,3 hm³/año.

Respecto a los caudales de la fuente del Arc, se han deducido considerando los testimonios suminis-

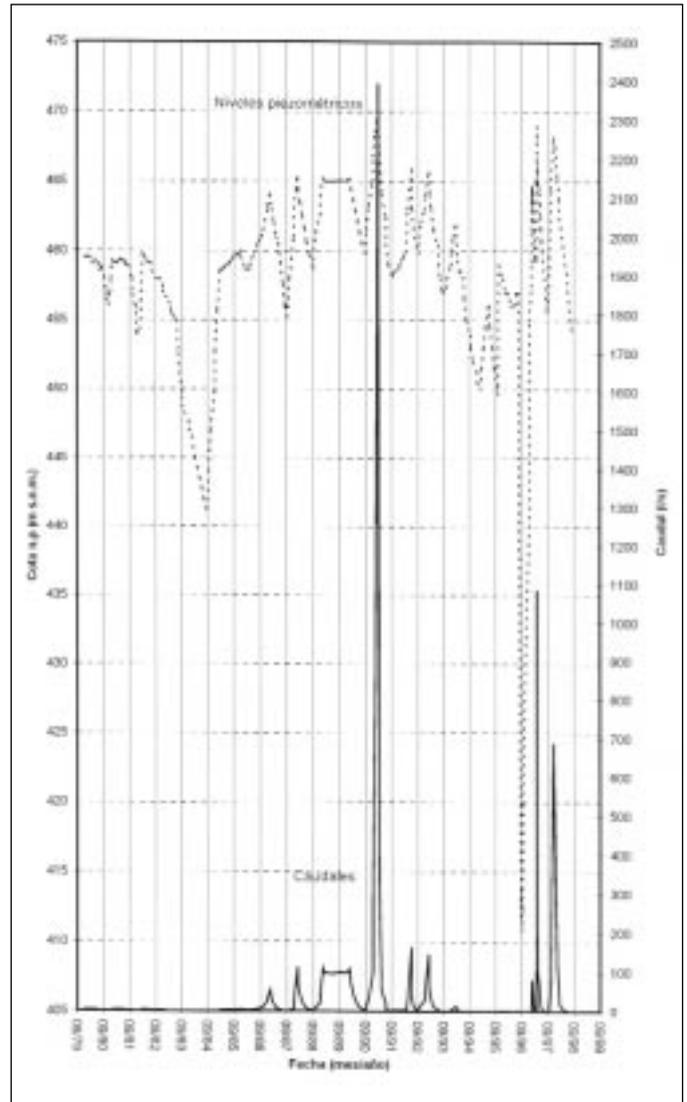


Fig. 5. Evolución del caudal de la Fuente del Arc, en relación con el nivel piezométrico del sondeo de "Sella"

Fig. 5. Flow evolution of the Fuente del Arc, according to the piezometric level at Sella's drilling

trados por personas cultas de la zona (especialmente el alcalde de Sella, D. Vicente Más, que lleva un celoso control de todos los manantiales). Según estos datos (y los observados por nosotros, a consecuencia del bombeo de ensayo de larga duración, como veremos más adelante) se ha establecido que la fuente del Arc emerge cuando la cota absoluta del nivel piezométrico en el sondeo "Salvatera" se encuentra a 463 m s.n.m. (profundidad del nivel de 46 m).

Esto ha permitido calcular (mediante el planimetrado de las superficies de los picos que están por encima de la línea horizontal de 463 m s.n.m.) el volumen drenado por el manantial del Arc (fig. 9) a lo

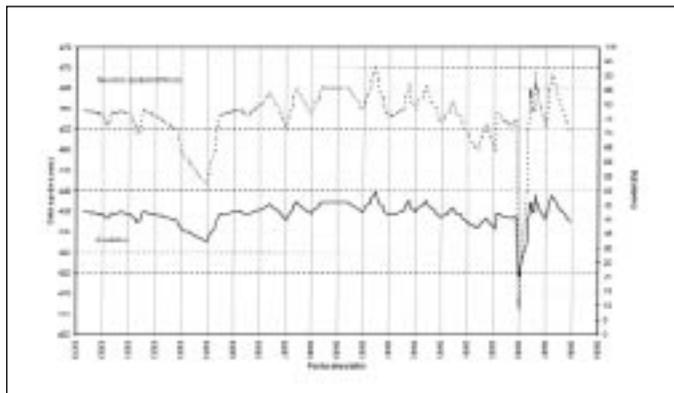


Fig. 6. Evolución del caudal conjunto de las surgencias continuas del sector meridional del acuífero, en relación con el nivel piezométrico del sondeo de "Sella"

Fig. 6. Flow evolution of the continuing springs of the meridional sector of the aquifer, according to the piezometric level at Sella's drilling

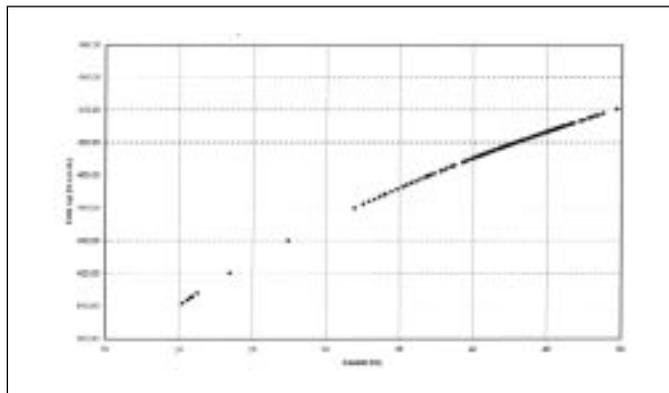


Fig. 8. Correlación entre el caudal conjunto de las surgencias continuas del sector meridional del acuífero y el nivel piezométrico del sondeo de "Sella"

Fig. 8. Correlation between the flow of the continuing springs of the meridional sector of the aquifer and the piezometric level at Sella's drilling

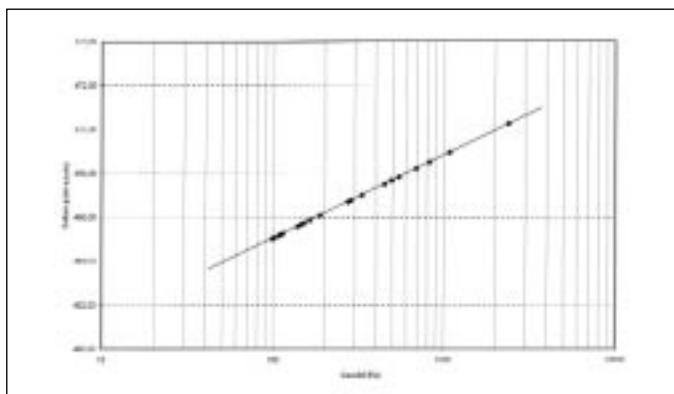


Fig. 7. Correlación entre los caudales de la Fuente del Arc y el nivel piezométrico del sondeo de "Sella"

Fig. 7. Correlation between the flows of Fuente del Arc and the piezometric level at Sella's drilling

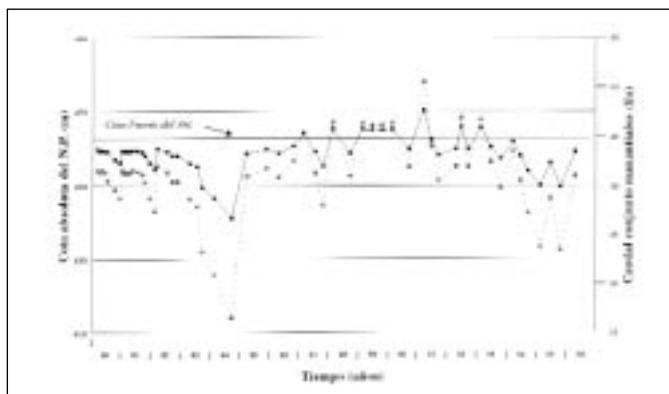


Fig. 9. Relación entre la piezometría del sondeo de "Sella" y la Fuente del Arc

Fig. 9. Relationship between the piezometry at Sella's drilling and the Fuente del Arc

largo del período analizado (1980-1996), y que se cifra en 5,51 hm³, distribuidos en el período 1988 a 1993. Este volumen representa un caudal medio, para el citado período, de 10 l/s (0,32 hm³/a).

Por tanto, integrando los dos caudales, 41 l/s (1,3 hm³/a) procedentes de los manantiales permanentes y 10 l/s (0,32 hm³/a) de la fuente del Arch, se puede asignar un valor medio de la descarga de 51 l/s, que equivalen a 1,62 hm³/año.

Balance hídrico

Comparando el valor de la recarga (1,7 a 2 hm³/a) con el de la descarga (1,62 hm³/a) se deduce que aquella se ajusta más al valor que hemos calculado que al del

IGME (1978), ya que en su caso no pudieron considerar el período de sequía del 1982-87.

Recursos

Según los datos obtenidos para recarga y descarga parece deducirse, aplicando un criterio conservador, que los recursos medios plurianuales del acuífero de Sella son de 1,7 hm³/a.

Reservas

Para el cálculo de las reservas se ha confeccionado (mediante numerosos cortes geológicos de detalle)

un mapa de isohipsas del techo del impermeable de base. Con base en el mismo y considerando que el nivel piezométrico más elevado es de 560 m s.n.m., (deducido por gradientes) se ha construido un mapa de isopacas de acuífero mojado o saturado, simplificando como espesor máximo (en la zona confinada) el de 300 m. De los 75 km² que tiene el acuífero, 52 están saturados (14 en zona libre y 38 en zona cautiva) y 23 secos.

Por planimetrado entre dos curvas y multiplicando su superficie por el espesor medio, se han obtenido los siguientes valores de roca mojada y de reservas, según sectores y profundidades:

- en la zona libre existe un volumen de roca mojada de 2.175 hm³ y en la cautiva de 8.400; en total el volumen de roca mojada del acuífero es de 10.935 hm³.
- las reservas totales del acuífero pueden ser de 211 hm³, de 317 hm³ o de 423 hm³, según se aplique al volumen de roca mojada un valor de porosidad eficaz del 2, 3 ó 4%; de ellos, el intermedio es el más probable.
- en la zona libre, los valores de reservas, siempre considerando los valores de porosidad eficaz establecidos, son de 43, 65 ó 87 hm³, respectivamente. De ellos 10, 15 ó 20 hm³, corresponden al sector de Tagarina y 33, 50 ó 67 hm³ al del Arc.
- en la zona cautiva los valores de reservas, también considerando los valores de porosidad eficaz establecidos, son de 168, 252 ó 336 hm³, respectivamente. De ellos 72, 108 ó 144, corresponden al sector de Tagarina y 96, 144 ó 192 al del Arc.
- las reservas económicamente explotables, referidas a 150 m por debajo de la cota actual del nivel piezométrico y considerando como más probable un valor de porosidad eficaz del 3%, se han evaluado en unos 65 hm³.

Hidroquímica

Con base en dos análisis de agua disponibles muy completos, pertenecientes a la Fuente Mayor (27-7-1990) y Fuente de Alcántara (20-11-1995), puede afirmarse que:

- el agua de la Fuente Mayor presenta buena calidad para uso agrícola; sin embargo, para uso urbano hay que destacar que las concentraciones de magnesio (97 mg/l) y clostridios (1 en 20 ml) exceden los límites máximos admisibles, según la Reglamentación Técnico-Sanitaria del 14 de Septiembre del año 1990. De ésta fuente es de la que se abastece el pueblo de Sella. Por el contrario, el agua de la Fuente de Alcántara presenta una

calidad excelente, tanto para uso doméstico como para regadío.

- las dos muestras de agua presentan una facies química de bicarbonatada cálcica y su residuo seco está comprendido entre 306 y 355 mg/l.
- el mayor contenido de sulfatos y cloruros de la Fuente Mayor (48 y 28 mg/l, respectivamente), en relación con la fuente de Alcántara (0,85 y 14,2 mg/l) podría venir explicado por el hecho de encontrarse aquella próxima a la Falla de Sella-Alcolecha (F.S.A), por la que se habría inyectado en profundidad el Trías diapírico, hecho que reforzaría la teoría que proponemos de situar el límite occidental del acuífero en este accidente tectónico. Este mismo argumento serviría para justificar el mayor contenido de magnesio en la Fuente Mayor (97 mg/l), en relación con la fuente de Alcántara (5,35 mg/l), ya que dicha fractura pondría en contacto en profundidad las calizas del Eoceno medio, en el bloque oriental, con materiales margocalizos dolomíticos del Cretácico superior, en el occidental.

Bombeo de ensayo de larga duración

Primeramente, se realizaron dos pequeñas pruebas de bombeo de ensayo en el pozo "Sella" de 865 y 1.865 minutos, respectivamente, para programar la fase de explotación. Puesto que los caudales fueron controlados mediante un caudalímetro y éste presentó problemas en todo el ensayo (por tanto los caudales fueron variables), no se pudo interpretar el descenso y sólo se hizo la interpretación de la recuperación, considerándose un caudal ponderado de 87,6 l/s, en la segunda prueba, que había comenzado en la madrugada del 20 de julio. El valor de transmisividad encontrado fue de 3.528 m²/d.

Por otro lado, en el pozo "Benimantell", el 8 de Mayo de 1985 el IGME llevó a cabo un aforo de 80 l/s durante 1.400 minutos, obteniéndose un descenso de sólo 2,3 m y un valor de transmisividad de 4.872 m²/d. Después de 300 minutos, una vez parada la extracción, se consiguió la recuperación total.

Por tanto, la transmisividad está comprendida entre 3.528 y 4.872 m²/d, valores que como se ve, son muy elevados y propios de acuíferos fuertemente karstificados. El coeficiente de almacenamiento calculado fue de $1,2 \times 10^{-4}$, que confirma la situación de cautividad del sondeo "Sella".

La fase de explotación comienza, en ambos pozos, el día 23 de julio de 1996 y termina el 28 de enero de 1997, en el pozo "Sella", y el 3 de octubre de 1996, en el pozo "Benimantell"

El tiempo de explotación en el sondeo de "Sella"

fue de 271.955 minutos (6,3 meses), mientras que en el sondeo "Benimantell" sólo fue de 104.165 minutos (2,4 meses). Después de parado definitivamente el sondeo de "Sella" (que fue el que continuó), se efectuaron medidas de recuperación durante 2,5 meses.

El volumen total extraído en todos los bombeos fue de 720.879 m³ (caudal medio de 44,2 l/s, si bien los extremos fueron de 18 y 130 l/s), de los que 420.400 corresponden al pozo "Sella" y 300.469 al de "Benimantell".

Las depresiones máximas registradas fueron de 41,59 m, en el pozo "Sella" y de 45,36 m, en el de "Benimantell".

En el sondeo de "Sella", comienza la explotación con un nivel piezométrico de 57,46 m y un caudal de 97 l/s; este último se mantiene con algunas pequeñas variaciones (entre 90 y 97 l/s), mientras que el nivel desciende lentamente. Pero en el minuto 30.810, al rebasar el metro 91,5 (que sería la base del conducto kárstico más bajo atravesado) el caudal desciende bruscamente (el nivel no lo puede hacer mucho más -lo máximo que llega es a 100 m-, pues la bomba estaba colocada a 110 m de profundidad) y pasa primero a 70 l/s, luego a 53 y termina siendo de 20 l/s de media.

En el sondeo de "Benimantell" pasa algo similar. Comienza la explotación con un nivel piezométrico de 123,6 y un caudal de 130 l/s; este último va disminuyendo lentamente (entre 130 y 108 l/s), lo mismo que lo hizo el nivel piezométrico. Pero en el minuto 17.265, al rebasar el metro 156 (que sería la base de un conducto kárstico intermedio atravesado) el caudal baja a 97 l/s y el nivel a 161 m. Los caudales y niveles siguen bajando paulatinamente hasta que, alcanzado el minuto 24.135 y el metro 166 (base del último conducto kárstico atravesado) el caudal pasa bruscamente a 88 l/s (el nivel no lo puede hacer mucho más -lo máximo que llega es a 167 m-, pues la bomba estaba colocada a 175 m de profundidad) y va disminuyendo hasta alcanzar, en el minuto 104.165, los 24 l/s.

Sin embargo, la recuperación fue muy rápida. En el sondeo de "Benimantell" se consiguió la total recuperación transcurrido sólo 3,8 meses (hay que tener en cuenta que se produjo un vaciado de parte de las reservas hídricas dinámicas), pero el nivel siguió subiendo al menos 12,5 m, un mes después de la estabilización. En el sondeo de "Sella" fue más espectacular todavía, pues cuando se paró la extracción el nivel estaba 2,81 m por encima del nivel inicial (tan sólo con disminuir el caudal de extracción y sin la influencia de las lluvias) y transcurrido sólo medio mes de la parada, el nivel había ascendido 10 m más (ahora, por la influencia de las lluvias), alcanzando la cota piezométrica de 465 m s.n.m., que es la más alta

registrada, si se exceptúa una de marzo de 1991, con 470 m s.n.m., fruto de las generosas lluvias (135 mm) caídas en enero de ese mismo año. Y todo esto, sorprende aún más si se considera, por un lado, que las lluvias que cayeron entre 23-1-97 y 8-4-97 sólo fueron de 80,1 mm y que, en esta ocasión, dichas precipitaciones tuvieron primero que rellenar un vacío de reservas (al menos en las zonas próximas a los sondeos) de 45 m de espesor.

En las figuras 10 y 11 puede verse la evolución piezométrica de los sondeos de "Sella" y "Benimantell", respectivamente, durante la fases de explotación y de recuperación posterior.

El fenómeno del ascenso del nivel piezométrico por encima del inicial es debido a que se produce una limpieza de materiales que obstruían los conductos kársticos, (en especial arcillas de descalcificación como consecuencia del bombeo, de ahí que el agua saliera rojiza en los cambios de caudal hasta, incluso, próximo al final de la explotación), dado que el agua (en las proximidades de los sondeos) circula con mayor facilidad y la carga hidrostática se manifiesta sin pérdidas. La recuperación tan rápida, al cesar o disminuir el bombeo y además recibir aportes de lluvia, tiene que ver con la gran capacidad de recuperación que poseen este tipo de acuíferos de carácter kárstico tan acusado.

Por tanto, el acuífero es muy sensible a las extracciones importantes por bombeo, pero también tiene una gran capacidad de recuperación ante el aporte de las lluvias, o ante la disminución de aquellas.

Durante el período que se realizó la explotación se apreció, lógicamente, una disminución progresiva de los caudales de los manantiales, incluso alguno desapareció temporalmente. Así, en la fuente Mayor de Sella (de 4,5 l/s) empieza a observarse un descenso de caudal a primeros de agosto de 1996 y el día 10 de ese mismo mes se secó completamente. En el caso del manantial de Alcántara (de 11,6 l/s), el día 4 de octubre alcanzaba el caudal más bajo (1 l/s), sin llegar a secarse completamente.

Como consecuencia de la disminución de las extracciones, primero, y de la paralización, después, así como de las lluvias caídas (entre el 23 y 25 de Enero de 1997 caen 35 mm), el día 29 de enero de 1997 (un día después de parado el sondeo de "Sella" y 4 días después de caídas las referidas lluvias) emerge nuevamente la fuente Mayor, aforándose un caudal de 3 l/s y el día 5 de Febrero, 6 l/s (una semana después), valor nunca alcanzado hasta el momento. Del mismo modo, la fuente *trop plein* del Arc (normalmente seca, por encontrarse a una cota superior de la del resto de las fuentes) se manifiesta el día 31 de enero de 1997, y el día 15 de febrero de ese mismo

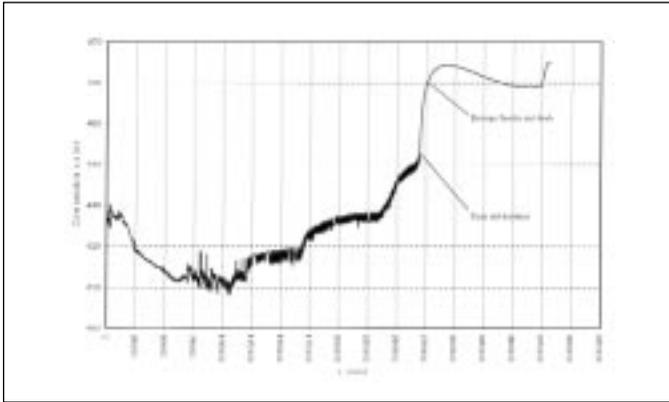


Fig. 10. Evolución piezométrica del sondeo de "Sella", durante y después del bombeo de larga duración
 Fig. 10. Piezometric evolution at Sella's drilling, during and after the long term pumping

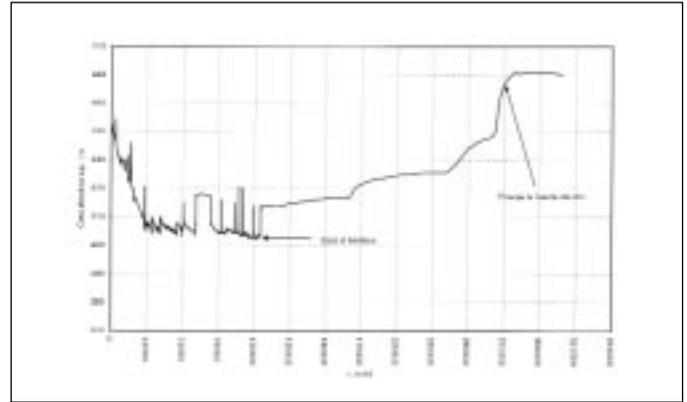


Fig. 11. Evolución piezométrica del sondeo de "Benimantell", durante y después del bombeo de larga duración
 Fig. 11. Piezometric evolution at Benimantell's drilling, during and after the long term pumping

año alcanzaba un caudal de 100 l/s; así mismo, el 15 de marzo el caudal era de 10 l/s y el 12 de abril superaba los 1000 l/s, como consecuencia de la lluvia caída el día 8 de abril, que fue de sólo 25 l/m².

Por tanto, la explotación intensiva transitoria efectuada en el acuífero de Sella contribuyó a la desobstrucción de muchos de los conductos kársticos y, con ello, a la elevación del nivel piezométrico por encima del habitual y al aumento del caudal de los manantiales.

Conclusiones

1. El acuífero kárstico de Sella, de 75 km², es uno de los pocos de la provincia de Alicante que todavía presenta un estado natural de equilibrio (existen manantiales), ya que el Ayuntamiento prohíbe realizar captaciones mediante sondeos.
2. Es muy sensible a los cambios climatológicos, como por ejemplo en la sequía del 1981 al 1983, que el nivel descendió 20 m; lo mismo ocurrió con la sequía del 1993 al 1995. Respecto a las lluvias, aunque sean pequeñas, su influencia se deja notar en apenas una semana.
3. Más sensible aún es a las extracciones por bombeo, pues aunque presenta un alto valor de transmisividad (próximo a 5.000 m²/d), no permite que se extraigan todos los recursos anuales en tan sólo cuatro meses, como se quiso hacer. En efecto, como consecuencia de la excepcional puesta en explotación, entre 23-7-1996 y 28-1-1997, de los dos únicos sondeos existentes en el acuífero ("Sella" y "Benimantell"), tras extraer un volumen de 0,7 hm³ se produjeron descensos piezométricos de más de 40 m, en sólo 4 meses. Estas bajadas

fueron al principio relativamente lentas, mientras se iba vaciando un conducto kárstico preferencial, pero rebasada la base de éste se producía un "descuelgue" piezométrico, que no se amortiguaba hasta que no alcanzaba otro más inferior. Durante el período que se realizó la explotación se apreció también, lógicamente, una disminución progresiva de los caudales de los manantiales, incluso alguno desapareció temporalmente, como la fuente Mayor de Sella, que presenta un caudal muy constante de 4,5 l/s.

4. Sin embargo, la recuperación fue muy rápida. En el sondeo de "Benimantell" se consiguió el nivel inicial transcurrido sólo 3,8 meses, pero el nivel siguió subiendo al menos 12,5 m, un mes después de la estabilización. En el sondeo de "Sella" la recuperación fue más espectacular todavía pues, cuando se paró la extracción, el nivel estaba ya 2,81 m por encima del inicial (tan sólo con disminuir el caudal de extracción y sin la influencia de las lluvias) y transcurrido sólo medio mes de la parada, el nivel había ascendido 10 m más (ahora, por la influencia de las lluvias), alcanzando una de las cotas más elevadas de las registradas. Hay que considerar que las lluvias que cayeron entre 23-1-97 y 8-4-97 fueron de 80,1 mm y que, en esta ocasión, dichas precipitaciones tuvieron primero que rellenar un vacío de reservas (al menos en las zonas próximas a los sondeos) de 45 m de espesor.

También los manantiales se recuperaron muy rápidamente, pues tan sólo un día después de parado el sondeo de "Sella" y 4 días después de caídos 35 mm de lluvia emerge nuevamente la fuente Mayor, aforándose un caudal de 3 l/s y el

día 5 de Febrero, 6 l/s (una semana después), valor nunca alcanzado hasta el momento. Del mismo modo, la fuente en "trop plein" del Arc (normalmente seca) el día 15 de febrero irrumpió con un caudal de 100 l/s.

5. Los fenómenos de ascenso del nivel piezométrico por encima del inicial y el aumento de caudal de los manantiales, después de la explotación por bombeo, se interpretan como debidos a que durante ésta se produce una limpieza de materiales obstruyentes en los conductos kársticos, en especial de arcillas de descalcificación.
6. Por tanto, la explotación intensiva transitoria efectuada en el acuífero de Sella tuvo consecuencias positivas en el acuífero, ya que elevó el nivel piezométrico por encima del habitual y aumentó el caudal de los manantiales.

Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo dentro de los proyectos IGCP 448 de la UNESCO y PI/08 del IEH del Consejo de Europa. La obtención de los datos de base ha sido subvencionada por la Divisió de Recursos Hidráulics de la Generalitat Valenciana.

Referencias

- Diputación de Alicante-IGME. 1982. *Las aguas subterráneas de la provincia de Alicante*. Publicación restringida. 754 pp.
- IGME. 1978. *Estudio climatológico de las Cuencas Costeras de Alicante*. Informe interno.
- IGME-IRYDA. 1978. *Estudio Hidrogeológico del Bajo Segura y Costeras de Alicante*. Informe interno nº 7. Prebético de Alicante.
- IGME. 1979. *Informe de los sondeos Puig Campana, Srra. de Parcent, Srra. Aitana y El Realet para abastecimiento público a la Marina Baja (Alicante)*. Informe interno.
- Rodríguez Estrella, T. 1977. Síntesis geológica del Prebético de la Provincia de Alicante. I y II. *Bol. Geol. y Min. de España*. IGME. t. LXXXVIII-III y IV. 183-214 y 273-299. Madrid.
- Rodríguez Estrella, T. 1979. Geología e Hidrogeología del sector de Alcaraz-Liétor-Yeste (prov. de Albacete). Síntesis geológica de la Zona Prebética. Tesis doctoral. Univ. de Granada. 97: 566 pp. *Colección Memorias. IGME*. Madrid.
- Rodríguez Estrella, T. 2002. Definición geométrica del acuífero calizo eocénico, kárstico y arrecifal, de Sella (Alicante), perteneciente a la Sierra Aitana. *Geogaceta*, 21: 51-54.

Recibido: septiembre 2003

Aceptado: enero 2004